

반부숙상태 돈분뇨 액비의 저장기간 및 폭기여부에 따른 특성 변화

정광화^a, 박희만^b, 이동준^a, 김종곤^a, 김현종^{a†}

Changes in Characteristics of Semi-cured Pig Manure Liquid Fertilizer according to the Storage Duration and Aeration

Kwang-Hwa Jeong^a, Hoe-Man Park^b, Dong-Jun Lee^a, Jung-Kon Kim^a, Hyunjong Kim^{a†}

(Received: Nov. 3, 2022 / Revised: Dec. 7, 2022 / Accepted: Dec. 8, 2022)

ABSTRACT: Currently, most of the pig manure generated from pig farms in Korea is in the form of a slurry with a moisture content of about 97%. Pig manure slurry is a mixture of pig manure and cleaning water in the pig house. In this study, changes in properties of pig manure liquid fertilizer according to whether air was supplied or not and with the passage of storage period were analyzed for 120 days. During the experimental period, the degree of maturity of the pig manure liquid fertilizer was higher in the experimental closed batch reactors supplied with air than in the same type reactors not supplied with air. As the liquid fertilizer storage period elapsed, there was a tendency that liquid fertilizer was converted to a state of complete maturity. In the batch reactor in which air was supplied, the moisture content of pig manure slurry, which had a moisture content of 97.90%, was reduced to 96.82% at the end of the experiment. On the other hand, the moisture content in the reactor without air was reduced to 97.33%. The pH of the liquid fertilizer, which was 8.82 at the start of the experiment, changed to 7.57 in the reactor with air supplied and 8.75 in the reactor without air at the completion of the experiment. The nitrogen content in the liquid fertilizer was 0.198 mg/L on average at the start of the experiment and it was lowered to 0.076 mg/L in the air supplied reactor at the end of the experiment. On the other hand, the nitrogen content of the liquid fertilizer was lowered to 0.121 mg/L in the reactor to which air was not supplied. The phosphoric acid (P₂O₅) concentration in the liquid decreased higher in the liquid fertilizer filled in the reactor without air than the liquid fertilizer filled in the reactor with air supplied as the storage period elapsed. Considering the experimental results, it is considered that the quality of pig manure liquid fertilizer is improved when air is supplied to pig manure slurry and the storage period of pig manure slurry is longer.

Keywords: Aeration, Liquid fertilizer, Maturation, Pig manure slurry, Storage period

초 록: 현재 국내 양돈농가에서 발생하는 돼지분뇨 성상은 수분함량이 97% 정도인 슬러리 형태가 대부분이다. 돈사에서 배출되는 돼지분뇨 슬러리는 돼지의 분뇨와 돈사 내부 청소 물 등이 혼합된 성상의 액상물질이다. 본 연구에서는 공기공급 여부와 저장기간의 경과에 따른 돼지분뇨 액비의 부숙정도와 특성변화를 분석하기 위하여, 국내에서 운용 중인 액비화시설의 후단 공정에서 채취한 돼지분뇨 슬러리를 재료로 하여 120일 동안 실험을 수행하였다. 밀폐형 회분식 반응조를 이용하여 실험을 수행한 결과, 돼지분뇨 슬러리 액비의 부숙도는 공기공급구가 비공급구에 비해 더 양호하였으며 액비 저장기간이 경과 함에 따라서 액비가 부숙완료 상태로 빨리 전환되는 경향이

^a 국립축산과학원 축산환경과 연구원(Researcher, Animal Environment Division, National Institute of Animal Science)

^b 국립농업과학원 수확후관리공학과 연구원(Researcher, Postharvest Engineering Division, National Institute of Agricultural Sciences)

† Corresponding author(e-mail: hyunjongnt@korea.kr)

있었다. 실험개시 시에 97.90% 수준이던 액비의 수분함량 평균값이 실험 완료 시에는 공기공급구의 경우 96.82%, 비 공급구는 97.33% 수준을 나타냄으로써 공기공급구에서의 수분함량 감소가 상대적으로 더 높았다. 실험개시 시에 8.82 수준이었던 액비의 pH는 실험완료 시에 공기공급구에서는 7.57, 비 공급구에서는 8.75 수준으로 변화하였다. 액비 중의 질소함량은 실험개시 시에 평균 0.198 mg/L 수준이었으나 실험완료 시에는 공기공급구에서는 0.076 mg/L, 비 공급구에서는 0.121 mg/L 수준으로 낮아졌다. 액비 중의 인산(P_2O_5)농도는 저장기간의 경과에 따라 비 폭기처리구가 폭기처리구에 비해 감소 정도가 상대적으로 더 높았다. 실험결과를 종합해볼 때 돼지분뇨 액비에 공기를 공급하는 경우 그리고 저장기간을 길게 하였을 때 액비품질이 개선되는 것으로 판단된다.

주제어: 돼지분뇨, 부숙도, 액비, 저장기간, 폭기

1. 서론

근래 들어 국내 양돈사의 형태는 농장주의 사육 편의성 확보와 돈사 내외부에서의 분뇨처리 작업의 효율을 고려해서 슬러리돈사가 주를 이루고 있다. 실제로 국내 양돈농가를 대상으로 제공되는 돈사표준설계도에도 돈사형태가 슬러리돈사로 제시되어 있다^{1,2)}. 슬러리돈사는 돼지가 사육되는 상부 건축물과 그 건축물의 바닥 하부에 지하실처럼 형성된 비어 있는 공간으로 이루어진 돈사이다. 이 형태의 돈사는 돼지가 딛고 살아가는 바닥에 돼지 발이 빠지지 않을 정도의 넓이로 틈이 형성되어 있어서 돼지분뇨와 청소 물 등이 이 틈을 통해 돈사 하부의 빈 공간으로 이동되어서 일정 기간 저장된다. 저장된 돼지분뇨 슬러리는 필요시 외부로 반출되어져서 액비화나 정화방법에 의해 처리된다. 돼지분뇨 슬러리가 어떤 방법으로 처리되는지를 막론하고 처리 첫 번째 단계에서 고액분리장치에 유입되어져 고형물과 액상물로 분리된다. 분리된 고형물은 퇴비화방법에 의해 유기성 퇴비로 전환되고, 액상물은 액비화방법에 의해 액상비료로 자원화되거나 정화방법에 의해 처리되는 것이 일반적이다. 돼지분뇨 슬러리는 수분함량이 97% 내외에 이르는 액상형태를 띠는 물리적 특성으로 인해 액체비료를 생산하는 액비화방법에 의한 처리비용이 정화방법에 비해 중량기준으로 약 2배 정도 높다³⁾. 지난 2020년도 가축분뇨발생량 통계를 보면 소, 돼지 닭 등의 전체 축종에서 1년간 발생한 분뇨량 5,193만 9천 톤 중에서 양돈분야에서 2,037만 3천 톤이 발생하여 전체발생량의 39.2%에 달하였다³⁾.

또한 발생된 전체 분뇨 중에서 액비화방법에 의해 자원화된 분뇨량은 546만 9천 톤이었으며 이 양은 소와 닭을 비롯한 전 축종에서 발생한 총 분뇨량의 10.5%에 해당된다³⁾. 통계청에서 제시한 2022년도 기준 농림어업조사자료 중 2021년도 돼지분뇨 처리방법별 농가구분을 보면 조사대상 양돈농가 3,162개소 중 퇴비화처리는 635농가(20.08%)이고 액비화는 245농가(7.75%), 퇴비화와 액비화를 병용하는 154농가(4.87%), 정화처리 363농가(11.48%), 위탁처리 1,745농가(55.12%) 그리고 나머지는 기타 또는 자체처리 하는 것으로 나타났다. 그 중에서 액비화방법, 퇴비화와 액비화 병용, 위탁처리 시행농가가 전체 양돈농가의 67.74%를 차지하고, 이들 농가의 분뇨처리 방식이 액상분뇨 처리방법을 적용한다고 볼 수 있다⁴⁾. 그 중에서 액상비료화방법인 액비활용 측면에서 보면 국내에서 돼지분뇨슬러리 액비를 실제로 이용하고 있는 경종농업 현장에서는 곡물씨앗을 파종하거나 작물을 식재하기 전 단계에서 액비저장조에 일정 기간 저장되어진 부숙액비를 수거하여 경작지에 사용하고 있는 상황이다. 식물은 필요한 영양물질을 뿌리부에서 흡수하며 돼지분뇨 슬러리중의 유기물질은 액비화과정 중에 식물이 흡수할 수 있는 형태로 부숙되어지기 때문에 액비의 품질평가 측면에서 액비부숙도가 중요한 요인으로 작용한다. 이로 인해 가축분뇨자원화 관련법률에서도 부숙도 기준을 따로 정하여 농가가 액비를 경작지에 시비할 수 있는지의 여부를 결정하는 기준으로 삼고 있다⁵⁾. 그러나 지금까지의 돼지분뇨슬러리 처리연구는 악취제어 관련 연구⁶⁾나 액비화시설에서 슬러리를 채취하여 분석하

는 연구⁷⁾가 주를 이루었던 반면에 국내에서 실제 운용 중인 가축분뇨 액비화시설의 공정후단부에서 액비화가 어느 정도 진행된 후의 시료를 대상으로 하여 장기간 저장하는 기간 동안 액비의 부숙도나 액비성상과 품질변화를 분석한 연구사례를 거의 찾기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 액비화가 진행되고 있는 돈분뇨 슬러리를 대상으로 하여 폭기를 시행한 처리구와 폭기하지 않은 대조구로 구분하여 각각의 액비성분 변화와 부숙도 변화정도를 조사, 분석하였다.

2. 재료 및 방법

국내의 4개 도에서 운영 중인 돼지분뇨 슬러리 액비화시설 10개소를 선정하여 액비화공정의 후단부의 반응조에서 액비화가 진행되고 있는 돼지분뇨 슬러리 1,000리터씩을 10개의 PE통에 각각 채취하였다. 채취한 즉시 PE통을 실험장소로 운송한 후 응달에서 각각 3일간 정치하여 슬러리를 안정화하였다. 실험개시를 위하여 10개의 각 PE통 내에 교반용도로서의 펌프반송장치를 설치하여 슬러리를 고르게 혼합하면서 시험재료를 수거하는 용도의 또 다른 흡입펌프의 흡입구를 각 탱크의 중간수심 부위에 설치하고 각각의 PE탱크 1개당 200리터씩을 흡입반출하여 100리터 용량의 실험용 반응조에 2개에 각각 이송하였다. 다시 이 두 개의 실험반응조에 채워진 슬러리를 재혼합하여 두 실험반응조에 채워진 액비성상이 같아지도록 균질화 작업을 하였다. 실험용 반응조는 1개 실험재료당 2개를 1세트로 하여 총 10세트로 구성하였다. 각 세트별 실험반응조는 100리터 규모의 원형 용기를 사용하였고 각각 공기공급반응조와 공기를 공급하지 않는 반응조로 구분하여 운용하였다. 각 실험 반응조에는 바닥에 산기장치를 설치하고 액비용적 1m³ 기준으로 한 액비화시설 공기공급량 권고기준인 1분당 30리터의 공기를 공급하였다⁸⁾. 폭기구의 경우 실험 전기간 동안 연속 폭기를 실시하였다. 그리고 대조구로서의 공기 비공급구는 산기시설을 바닥에 똑같이 설치하였지만 실험 전체 기간 동안 공기펌프를 가동하지는 않았

다. 강수와 직사광선 등과 같은 외부영향을 최소화하기 위하여 총 20개의 반응조를 실내에 설치하였다. 가축분뇨의 관리와 이용에 관한 법률 시행규칙 별표 2에 정해진 액비화시설 설치기준에는 축사에서 발생한 가축분뇨를 4개월 이상 저장할 수 있는 저장조를 설치하여야 한다고 규정되어 있다⁹⁾. 이에 따라 본 실험에서는 실험용 반응조를 120일 동안 운용하면서 실험기간의 경과에 따른 액비의 부숙도와 물리화학적 특성변화를 분석하였다. 실험 반응조 내 액비의 부숙환경을 동일하게 유지하기 위하여 각 반응조 모두 다 같은 공간에서 같은 환경조건하에서 운용하였다. 실험수행을 위해 구성한 각 액비화 반응조들의 구조는 Fig. 1에 도시된 바와 같다.

공기공급용 펌프는 실험공간의 바닥에 설치하여 운용하였으며 펌프로 흡입된 공기는 공기배관을 통하여 실험용 반응조의 바닥에 설치된 산기관으로 공급되어 액비 중으로 분산되도록 하였다. 블로워에서 산기관으로 공급되는 공기배관에는 공기여과장치와 유량조절용 밸브를 설치하여 이물질이 제거된 공기가 설정된 양만큼 액비 중으로 공급되도록 하였다. 유량계는 설치 전에 상호 교차검증하여 실험에 사용된 각 유량계 간에 오차가 없도록 하였으며 실험 중에도 유량계를 수시로 점검하여 주입공기량이 액비용량과 대비하여 정량이 공급되도록 하였다. 반응조 상단에는 덮개를 설치하여 액비의 증발과 외부로부터의 이물질 유입을 최대한 방지하였으며, 덮개에는 개폐식 시료채취구를 설치하였다. 총 20개의 반응조 중 10개는 공기공급구 그리고 나머지 10개는

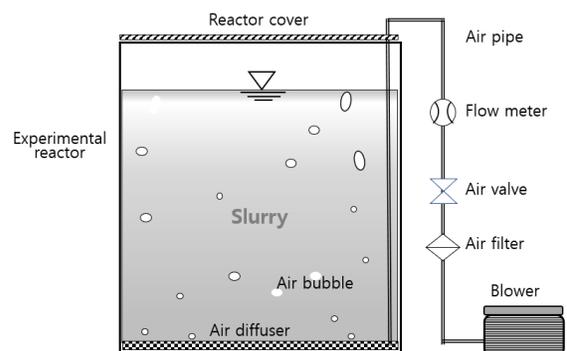


Fig. 1. Schematic diagram of experimental reactor for curing the piggy slurry.

공기 비 공급구로 구분하여 동일한 외부환경조건 하에서 120일 동안 운영하였다. 실험진행 과정에서 채취한 액비시료 중 즉시 분석항목 외의 시료는 냉장상태로 저장하여 공정실험기준에서 정하는 방법에 따라 분석을 실시하였다^{10,11)}. 액비시료 중의 아연은 유도결합플라즈마 발광분광법에 의해 분석하였고 구리와 칼륨 그리고 염분은 원자흡광분광분석법, 질소와 인은 분광광도분석법을 적용하여 분석하였다. 액비의 기계적 부속도 측정은 암모니아와 황화수소의 농도와 분광광도계를 이용한 색도 측정결과를 적용하였다. 종자발아법을 적용한 분석은 액비시료를 침전물이 없도록 완전히 섞어준 후 희석 없이 5ml를 No.2 여과지 2매를 바닥에 간 직경 85mm 페트리디쉬에 가한 후 종자발아법에서 활용하는 서호 무 종자를 사용하여 발아율을 측정하였다. 이때 생육상의 온도를 25±1℃, 습도는 85±1%로 하였고 인공적인 빛을 조사하지 않았다. 종자 처리 후 120~125시간 사이에 발아율을 측정하였으며 아래의 계산법을 적용하여 발아지수가 70 이상이면 부숙완료로 판정하였다.

발아지수(GI)계산

$$GR = \left[\frac{\text{발아율}(\%)}{\text{control 발아율}(\%)} \times 100 \right]$$

$$RE = \left[\frac{\text{뿌리길이}(\text{mm})}{\text{control 뿌리길이}(\text{mm})} \right] \times 100$$

$$GI = GR \times RE / 100$$

3. 결과 및 고찰

본 실험을 수행하는 과정에서 액비의 품질기준이 되는 항목들의 경시적 변화를 분석하였다. 실험 시작 시점부터 실험을 종료하기까지의 120일 동안에 각 1개월 간격으로 총 5회에 걸쳐 채취한 시료의 성분을 분석하였다. 실험을 위해 10개소의 액비화시설에서 채취하여 실험을 개시한 돼지분뇨 슬러리 액비의 성분분석 결과는 Table 1과 같다.

실험에 사용된 10개의 돼지분뇨 슬러리액비의 특성은 시료 7을 제외하고는 거의 비슷한 특성을 가지고 있었다. 시료 7의 경우 수분함량이 98.86%에 달하여서 시험시료 중 가장 묽은 성향을 가지고 있었다 이로 인해 질소와 인산 등의 비료성분 함량이 다른 시료에 비해 상대적으로 낮았고 구리나 아연의 함량도 낮은 수준이었다. 또한 부속도도 완숙수준을 나타냈으며 pH도 가장 낮은 특성을 보였다. 돈분뇨슬러리 액비의 pH는 7.15~9.50 사이의 분포수준을 나타냈다. 비료성분인 질소는 0.791~0.42%, 인산은 0.026~0.14% 그리고 칼리는 0.14~0.54% 사이의 수준이었다. 비료 관련 규정에서는 가축분뇨 발효액비의 질소와 인산 그리고 칼리의 함량을 합산한 값이 0.3% 이상이 되도록 규정하고 있는데, 시료 7을 제외한 다른 돼지분뇨 슬러리 액비는 모두 다 기준을 충족하는 것으로 나타났다. 염분함량에 있어서도 모든 시

Table 1. Characteristics of Piggery Slurry Collected from Each Recycling Facilities for Livestock Manure

Items	pH	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	NaCl (%)	Moisture (%)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Maturity
Sample 1	8.99	0.42	0.056	0.30	0.24	97.26	10.55	48.57	2
Sample 2	9.50	0.16	0.044	0.36	0.70	97.91	21.80	144.32	2
Sample 3	9.07	0.18	0.043	0.34	0.17	97.95	6.30	54.86	2
Sample 4	8.89	0.071	0.026	0.38	0.15	98.09	9.62	44.69	1
Sample 5	8.87	0.19	0.042	0.53	0.25	97.58	6.07	24.98	3
Sample 6	8.95	0.26	0.029	0.35	0.20	98.09	14.55	109.3	2
Sample 7	7.15	0.071	0.047	0.14	0.075	98.86	1.45	13.55	1
Sample 8	8.83	0.25	0.031	0.26	0.12	98.22	13.65	44.16	2
Sample 9	9.15	0.18	0.071	0.29	0.14	98.23	13.45	72.23	2
Sample 10	8.81	0.2	0.140	0.39	0.20	96.77	24.75	150.02	2
Legal stadard	-	(N + P ₂ O ₅ + K ₂ O) ≥ 0.3			≤ 2.0	≥ 95	≤ 70	≤ 170	1

※ Maturity level : 1(Completely mature), 2(Semi-mature), 3(Immaturity)

료가 기준치인 2.0%를 크게 밑돌았으며 아연과 구리함량도 기준에 부합하는 결과를 보였다. 부숙도는 전체 실험시료 중의 20%만이 완숙수준을 나타냈다. Table 1과 같은 특성을 가진 10개의 시료를 대상으로 폭기구와 비 폭기구로 구분하여 120일 동안 실험을 수행하는 과정에서 액비의 품질기준이 되는 항목들의 시기별 변화를 분석한 결과를 정리하였다.

3.1. 부숙도 변화

부숙도는 가축분 액비의 경작지 시용 적정성 여부를 결정하는 데 있어 가장 기초가 되는 요소로서 용어의 법적 의미는 퇴비·액비 원료가 퇴비·액비화 과정을 거쳐 식물과 토양에 대해 안정적인 반응을 나타내는 것을 말한다. 액비는 유기성 비료자원이므로 토양에 시비되는 특성으로 인해 부숙도가 매우 중요한 요소이므로 시용 시에는 부숙이 완료된 상태여야 한다. 액비의 부숙정도에 대한 판정은 측정대상 액비샘플에서 발생하는 암모니아와 황화수소의 농도를 측정하여 부숙정도를 판정한다. 또한 분광광도계의 발광부와 수광부 사이에 놓인 측정대상 액비샘플이 통과하는 광선을 흡수, 굴절, 산란 등에 의하여 얼마만큼의 흡광도를 나타내는가에 따라 부숙정도를 결정하게 된다. 본 실험에서는 총 20개의 시험용 반응조에서 생물학적 처리과정을 거친 돈분뇨슬러리 액비의 부숙도를 측정된 결과 비폭기구에 비해 폭기를 실시한 처리구에서의 부숙완료

판정결과가 더 많은 것으로 나타났고, 저장기간의 경과에 따라 부숙중기 상태였던 액비가 부숙완료 액비로 전환되는 경우가 발생하였다. 실험기간이 경과 함에 따라서 폭기구와 비 폭기구의 부숙도 변화 정도는 Table 2에 나타난 바와 같다.

액비관련 규정인 “퇴비액비화 기준 중 부숙도 기준 등에 관한 고시(환경부고시 제2018-115호)”에서는 액비의 부숙 정도에 따라 미부숙, 부숙중기, 부숙완료 단계로 구분하고 있으며, 액비의 부숙도 적용 기준은 부숙완료로 규정하고 있다. 실험을 위해 총 10개의 액비화시설에서 채취한 시료 10개 중 2개의 돼지분뇨 슬러리 액비는 처음부터 부숙완료 수준이었으나 1개의 시료는 미부숙 수준이었고 나머지 7개 시료는 부숙중기 수준이었다. 이 10개의 시료를 폭기구와 비 폭기구로 구분하여 총 20개의 실험용 반응조를 설치하고, 이 반응조를 120일간 운용하면서 경시적인 부숙도 변화 정도를 측정된 결과, 최종적으로 총 20개의 반응조 중에서 5개의 반응조를 제외한 15개의 반응조 내의 시료가 부숙완료로 판정되었다. 폭기여부에 따른 부숙도 변화결과를 분석해 보면 폭기를 실시한 실험구가 폭기를 하지 않은 경우에 비해 부숙에 필요한 기간이 상대적으로 짧은 것으로 조사되었으며 120일간의 실험이 종료된 후에 부숙완료에 도달한 시료의 수가 더 많았다. 이 결과는 공기를 공급하는 처리구에서는 공기 중에 포함된 산소가 액비중에 존재하는 호기성 미생물의

Table 2. Changes in the Maturation of Samples according to the Lapse of the Experimental Period

Items	No aeration					Aeration				
	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5
Sample 1	2	2	1	2	2	2	1	1	1	1
Sample 2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
Sample 3	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1
Sample 4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sample 5	3	2	1	2	1	3	2	1	2	1
Sample 6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Sample 7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sample 8	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1
Sample 9	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1
Sample 10	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1

※ Maturity level : 1 (Completely mature), 2 (Semi-mature), 3 (Immaturity)

활력을 증가시켜서 유기물 분해활동이 더 잘 일어나도록 함과 동시에 암모니아나 황화수소를 산화시키는 등 액비의 생물화학적 분해효과를 증가시킨데에 기인한 것으로 판단할 수 있다. 실험과정 전 기간에 있어서 1개의 시료는 폭기구와 비 폭기구 모두가 실험개시 후부터 완료할 때까지도 부숙중기 수준이 지속적으로 유지되는 결과를 보였다. 따라서 이 처리구의 120일 째 시료를 대상으로 하여 발아율 실험을 2 처리 3 반복으로 수행한 결과 폭기처리구에서의 발아율이 모두 다 70% 이상을 나타냄으로써 이 시료 역시 폭기처리가 액비부숙에 더 효과가 좋은 결과를 확인하였다.

3.2. 액비 수분함량 변화

실험용 액비반응조에 덮개를 하여 증발로 인한 수분감소를 최소화하였다. 그러나 폭기처리구의 경우 산기장치를 통해 주입된 공기의 배출로 수분이 감소하는 현상을 제어하기가 어렵다고 판단되었으며, 또한 국내에서 운용 중인 산업현장의 돼지분뇨 슬러리 액비화시설이 폭기장치를 통해 유입된 공기를 별도로 정제하거나 회수하지 않고 배기하는 현실을 반영하여 실험반응조를 완전 기밀상태로 하거나 배기 중의 수증기를 회수하는 장치를 설치하지는 않았다. 폭기처리 반응조 10개와 비 폭기처리 반응조 10개 등 총 20개의 반응조를 모두 동일한 조건에서 120일간 운영하는 과정에서 각 시료의 수분함량 변화 정도를 Fig. 2에 나타내었다.

액비의 수분함량은 실험 시작 후 1개월 이후부터

감소율이 높아지는 경향을 보였으며 폭기를 실시한 처리구에서 감소 정도가 비 폭기구에 비해 상대적으로 더 높은 경향을 보였다. 수분함량 평균값의 경우 처음 97.90% 수준이었으나 4개월의 저장기간이 지난 후에 수분함량은 폭기처리구의 경우 96.82% 수준으로 낮아졌지만, 비 폭기처리구의 경우에는 97.33% 수준을 나타냄으로써 액비를 폭기하는 경우에 수분함량의 감소 정도가 비 폭기처리구에 비해 상대적으로 더 높은 것으로 조사되었다. 각 시험구의 액비 수분함량은 저장기간이 경과 함에 따라 점차 낮아지는 결과를 보였다.

3.3. 액비 pH 변화

돼지분뇨 슬러리 액비의 pH 수준은 일반적으로 7보다 높게 나타난다. 돼지분뇨 슬러리는 인위적인 화학물질이나 강산 성분 같은 물질을 함유하지 않으므로 돼지분뇨 슬러리 중의 탄산이나 수산이온 등의 존재 양상에 영향을 받게 된다. 유기물이 생물학적으로 분해되는 과정에서 발생하는 CO₂는 물에 쉽게 용해되는 특성을 가지며 물속에 수소이온이 생성되는 역할을 하여 산도를 낮추는 요인이 된다. 변 등(2020)도 폭기 조건에서 pH가 증가하는 원인은 폭기처리에 의해서 CO₂ 가스가 액 중에 용해되지 못하고 제거되는 점과 연관된다고 하였다¹²⁾. 반면에 암모니아나 암모늄처럼 수중에 수산이온을 형성하는 요인이 더 강하게 작용하면 돼지분뇨 슬러리는 7 이상의 pH 값을 갖게 된다. 또한 동일 조건이라면 슬러리의 온도가 높아질수록 pH 값이 미세하게 낮

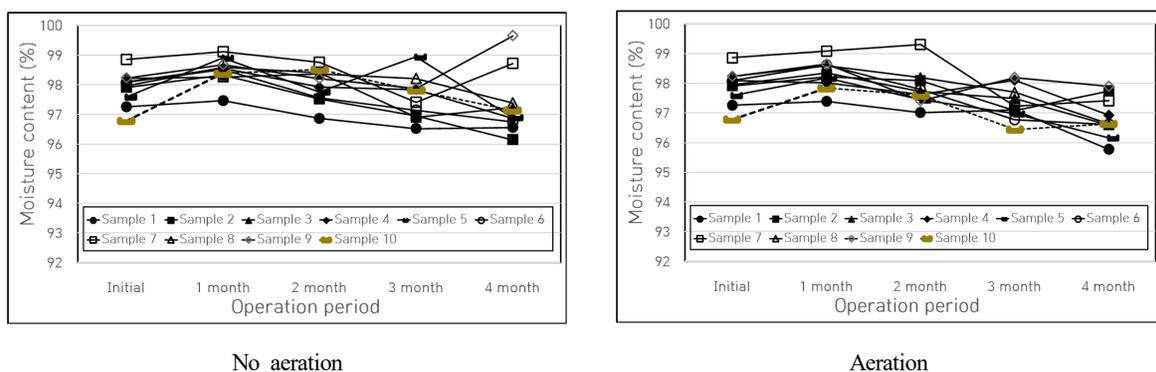


Fig. 2. Change in moisture content of piggery slurry during experimental period.

아지게 된다. 이러한 조건들을 종합해보면 암모니아 농도가 높고 온도가 실온수준에 머무르는 돼지분뇨 슬러리의 pH는 7 이상, 때로는 9 이상의 값을 가지게 되는 것을 알 수 있다. Fig. 3은 실험을 수행하는 동안 액비의 pH 변화 정도를 나타낸 것이다.

폭기여부와 시험 기간의 경과에 따른 돼지분뇨 슬러리 액비의 pH 평균값은 처음 8.82 수준이었지만 4개월의 저장기간이 지난 후에 폭기처리구의 pH는 7.57로 낮아졌지만 비폭기 처리구의 경우에는 8.75 수준을 보임으로써 액비를 폭기하는 경우에 액비의 pH가 더 많이 낮아지는 결과가 나타났다. 이 결과는 이 등(2015)이 발표한 바와 같이 대부분의 액비의 pH는 8 이상이며 그 분포 범위는 5.6~9.4 사이이고 평균적으로 8.2의 수준을 보인다고 한 것과 부합하는 면이 있다¹³⁾. 실험 기간이 경과 함에 따라 폭기처리구의 pH가 비 폭기처리구에 비해 더 낮아지는 결과를 보였는데 이는 폭기에 의해 NH_3 가 감소 됨과 동시에 질소 등의 산화 과정에서 수소이온이 생성된 데에 기인한 것으로 볼 수 있다.

3.4. 질소, 인산, 칼리 함량 변화

질소와 인 그리고 칼륨은 돼지의 성장과 번식을 위한 중요 요소로서 사료를 통해 공급된다. 돼지는 섭취한 사료 중의 영양소를 다 흡수하지 못하고 분뇨 형태로 체외로 배출하는데 퇴비화나 액비화는 이런 영양물질을 무기화시켜 작물이 이용하도록 하는 과정이다. 식물은 질소와 인산 그리고 칼리를 주요 생육에 필요한 요소로 요구한다. 그중에도 질소

는 식물의 요구량이 가장 높은 성분이다. 질소가 작물의 뿌리에 의해 흡수되기 위해서는 무기적 형태로 존재하는 것이 바람직한데, 부숙 과정은 유기적 상태의 질소를 무기적 상태의 질소로 전환하여 주는 역할을 한다. 이 등(2020)은 질소는 무기적 상태로 작물에 이용되거나 토양에 잔존하기도 하며 용탈 또는 휘산 등으로 순환과정을 거치게 된다고 하였다¹⁴⁾. 인산은 식물 체내 세포의 막을 구성하는 성분으로서 식물의 영양생장과 뿌리 발달, 개화나 결실 등 식물의 여러 생리작용에 관여하는 요소이다. 인산이 과잉되면 아연이나 철 그리고 구리 등과 같은 미량원소의 흡수가 방해받게 된다. 칼륨은 식물체의 수분조절이나 세포분열 등에 관여하며 부족시에는 가뭄이나 고온기 식물의 생육이 저하된다. 따라서 이들 요소가 비료 성분으로서의 중요한 가치를 가진다. Fig. 4부터 Fig. 6은 액비화 기간동안의 처리 방법별 질소와 인산 그리고 칼륨 농도의 변화를 나타낸 것이다.

질소함량은 액비 저장기간이 경과 함에 따라 점차 낮아지는 결과를 보였으며 폭기처리구의 경우가 비 폭기처리구에 비해 질소성분 감소정도가 더 높게 나타났다. 이 결과는 폭기 처리 때문에 암모니아가 휘산되고 부분적인 탈질에 의한 질소가스의 배출 등이 그 원인인 것으로 판단된다. 또한 폭기처리에 의해 질소가 산화되는 과정에서 생성되는 H^+ 의 영향이 있었을 것으로 판단된다. 액비화 개시시 0.198 mg/L 수준이었던 질소함량은 4개월의 처리기간이 지난 후에 폭기처리구의 질소함량은 0.076 mg/L 수

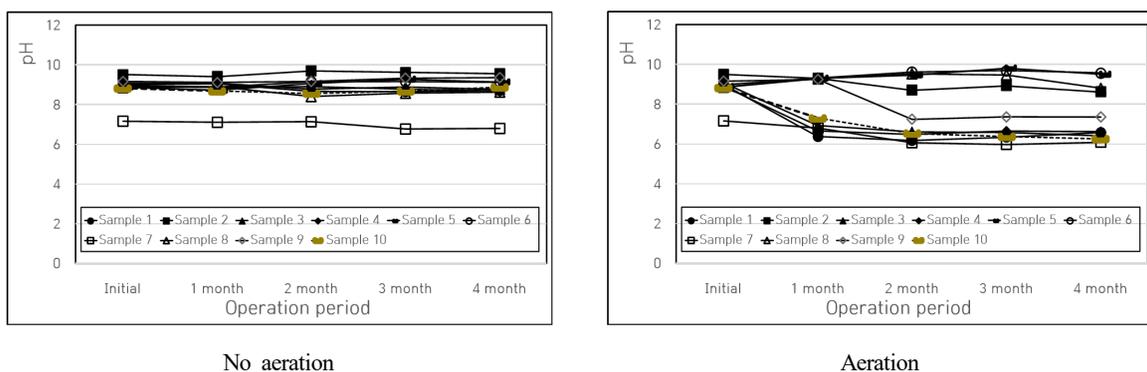


Fig. 3. Change in pH of piggery slurry during experimental period.

준으로 낮아진 반면에 비 폭기 처리구의 경우에는 0.121 mg/L 수준으로 낮아지는 결과를 보임으로써 액비를 폭기하는 경우에 액비 중의 질소가 더 많이 감소하는 것으로 나타났다. 김 등(2017)은 폭기식 액비화 반응기에서 돼지분뇨 슬러리를 30일 동안 처리하였을 경우 총질소 농도가 44.6% 감소하였다고

보고하였다⁵⁾. 이 결과는 본 실험에서 나타난 질소의 변화와 비슷한 경향을 나타내었다. 질소가 토양 중에서는 작물에 흡수되거나 휘산하거나 용탈하게 되는데, Daudén, A 등(2004)은 라이시미터를 이용한 질소 거동 연구를 수행한 결과 액비가 적정수준으로 사용되는 경우에는 화학비료와 비교해서 용탈된 질

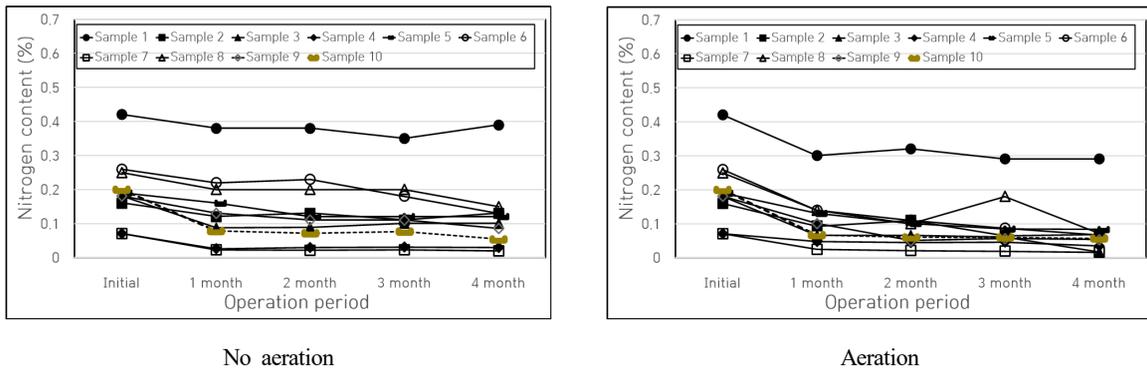


Fig. 4. Change in nitrogen content of piggery slurry during experimental period.

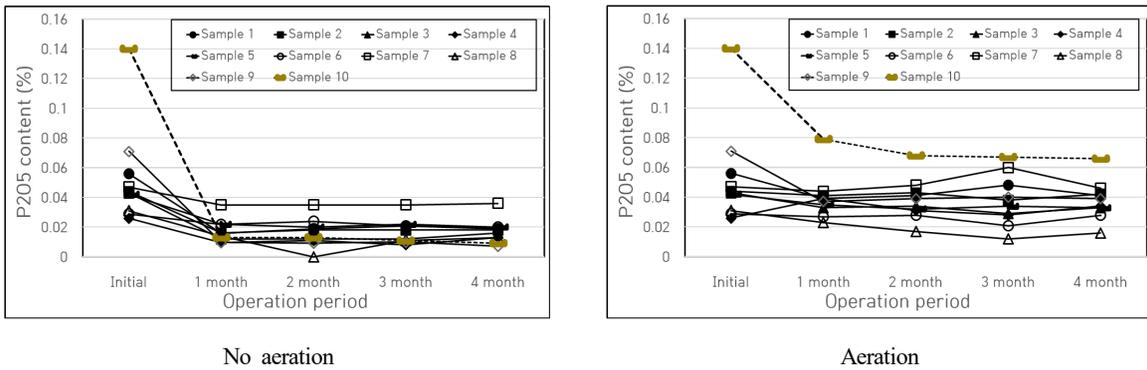


Fig. 5. Change in phosphoric acid content of piggery slurry during experimental period.

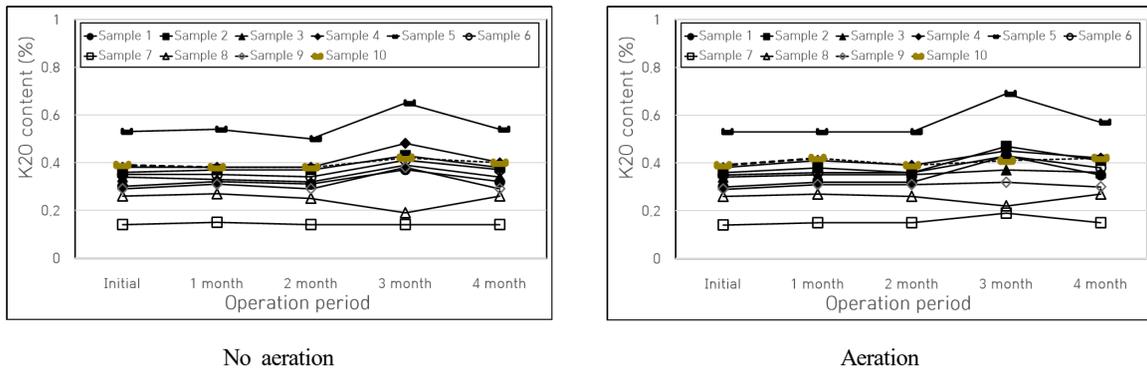


Fig. 6. Change in potassium content of piggery slurry during experimental period.

소량이 적거나 같다고 하였다¹⁶⁾. 인산의 경우에는 실험을 수행하는 기간이 경과 함에 따라 전반적으로 그 농도가 감소하는 경향을 보였으며 그 감소 정도는 비 폭기처리구가 폭기처리구에 비해 상대적으로 더 높게 나타났다. 이 결과는 미생물에 의한 인의 흡수 정도의 차이와 함께 폭기여부에 따른 반응조 내의 침전 정도가 다르게 나타남으로써 반응조 내 액비의 중간부 또는 상층부 중의 고형물 분포가 다르게 나타나는 데에도 그 원인이 있는 것으로 판단된다. 인산은 아연, 철, 구리 등의 흡수와 연관되므로 토양에 과잉되지 않도록 하는 것이 필요하다. 본 연구 결과에서는 인산 함량이 낮은 수준으로 분석되었는데, 임 등(2009)은 액비의 밀거름 연용이 배추의 수량 및 토양 양분 함량에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하고서, 가축분 퇴비의 연용에 따른 토양 중 인산함량이 증가하는 것과는 달리 작물 재배기간에 의 토양 중의 유효인산 함량은 증가하지 않았는데 이는 액비 중의 인산 함량이 낮은 것에 기인한다고 하였다¹⁷⁾. 칼륨의 농도는 저장기간이 경과함에 따라 그 농도가 변함이 없거나 오히려 높아지는 결과를 보였으며 비 폭기구에 비해 폭기처리구에서 증가 정도가 상대적으로 더 높아지는 것으로 나타났다. 이 결과는 칼륨이 질소처럼 휘발되거나 분해되는 경향이 미소한 데 반하여 실험기간의 경과에 따른 수분 감소로 인해서 상대적 농도가 줄어들지 않았기 때문으로 판단된다. 폭기처리구 시험반응조 10개 중에 칼륨농도 증가가 최고치를 나타낸 정도는 약 16% 수준이었다. 실험기간의 경과에 따른 질소, 인, 칼륨

함량을 조사한 결과 총질소 함량은 점차 감소하는 경향을 보였으나 칼륨과 인함량은 감소율이 낮거나 일부는 높아지는 결과를 보였다. 이 등(2016)은 돈분 액비 부숙단계별 영양성분인 질소, 인, 칼륨함량을 조사한 결과, 총질소함량은 약 2,270mg/kg에서 약 530mg/kg으로 급격히 감소하나 칼륨과 인함량은 부숙이 진행되어도 감소율이 매우 낮았다⁷⁾고 함으로써 본 실험과 유사한 결과를 보고하였다.

3.5. 구리와 아연의 농도 변화

동물과 식물의 생존에 필요한 미량원소인 구리는 일반토양에 2~100mg/kg, 식품 중에는 20~400mg/kg 정도 포함되는 등 널리 분포되어있다고 알려져있다¹⁸⁾. 또한 아연은 구리, 망간과 더불어 식이를 통해 1일 섭취허용량을 설정해 놓고 있는 필수금속으로 동식물의 생리작용에 필요한 무기성분이지만 과량으로 존재할 때에는 식물의 생육에 피해를 미치는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 돼지의 성장을 증진하고 설사예방 등을 위한 미량광물질 개념으로서 황산구리와 산화아연을 배합사료에 혼합한다. 체내 대사활동을 거친 구리와 아연은 분뇨 중에 섞여서 체외로 배출되어져서 액비 중에 소량이 존재하게 된다. Fig. 7과 Fig. 8은 액비화기간 동안 구리와 아연의 농도 변화를 나타낸 것이다.

구리와 아연의 농도는 모두 다 저장기간이 경과 함에 따라 점차 낮아지는 결과를 보였으며 폭기처리구에 비해 비 폭기처리구에서의 감소 정도가 더 높게 나타났는데, 이 경우도 폭기와 비폭기에 따른

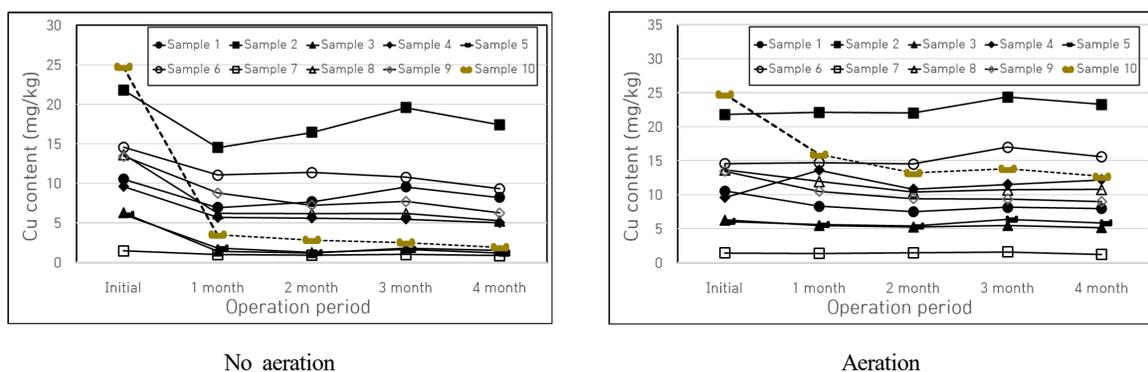


Fig. 7. Change in copper content of piggery slurry during experimental period.

액비 중의 침전 정도의 차이가 원인인 것으로 볼 수 있다. 이 결과는 구리와 아연은 생물학적으로 분해가 거의 되지 않으면서도 비중이 물보다 높기 때문에 주로 침전에 의해 바닥 슬러지 층에 존재하게 되는 것과 관련된다. 일반적으로 액비는 슬러지를 제외한 상등수 등의 액상물을 흡입하여 시비하므로 비중이 물보다 큰 물질은 액비화가 진행될수록 실제 사용하는 액비 중에 존재하는 농도는 감소하게 된다. 김 등(2019)이 보고한 바에 따르면 가축분뇨 단독처리시설 2개소에서 금속류 원소를 분석한 결과 유입수 중의 함량은 높았지만 방류수에는 기준 값 이하의 값을 보였다고 하였다¹⁹⁾. 이는 구리와 아연이 침전 등을 포함한 공정에서 처리가 된다는 것을 의미한다. 정 등(2011)은 전라북도지역 가축분뇨 공공처리시설의 슬러지 특성을 조사한 결과 농축슬러지의 경우 아연이 평균 3,008.6mg/kg, 구리가 평균 1,061.5mg/kg이었다고 하였다²⁰⁾. 이어서 그는 이 농축슬러지를 재활용한 퇴비를 대상으로 용출실험을 수행한 결과 구리와 아연이 일부 용출되기는 하였지만 농업용수의 수질에 미치는 영향이 미미할 것으로 판단하였으며 부숙토를 만들어 매립지의 복토재로 이용하거나 소각, 탄화, 고화토 등의 방법을 사용하여 처리해야 할 것이라고 하였다. 이 등(2010)은 양돈분뇨 발효액비 시용이 토양 화학성과 벼(*Oryza sativa L.*)의 생육에 미치는 영향에 대한 연구를 수행한 결과, 액비 시용 후 토양의 중금속 함량은 토양 환경보전법의 토양오염 기준치 이하를 나타냄으로써 우려할 수준은 아니라고 하였다²¹⁾.

3.6. 염분 농도 변화

염분은 체액의 삼투압이나 혈장의 부피 유지, 신경과 근육의 작용 등과 같은 동물의 생명활동에 중요한 역할을 하기에 미국 국가연구위원회(National Research Council)나 우리나라 사양표준에서는 적정량의 식염을 사료에 첨가하는 것을 허용하고 있다. 그러나 토양측면에서는 염분의 농도가 높으면 바람직하지 않으므로 액비기준에서도 염분을 2.0% 이하로 규정하고 있다. Linghe Zeng 등(2000)은 염해는 전 세계적으로 벼를 재배하는 지역에서 수량감소의 주요한 원인 중의 하나로써 관개수나 토양용액 중의 염류농도가 높아지면 작물은 농도장해를 받는다고 하였다²²⁾. 최 등(2004)은 관개용수의 염분농도를 각기 다르게 하여 벼재배 포트실험을 수행한 결과 관개수의 염분농도가 높을수록 벼의 생육에 부정적인 영향을 미친다고 하였다²³⁾. 임 등(2009)은 배추에 액비를 밀거름으로 사용하는 실험을 수행한 결과 작물생산량은 만족하지만, 토양 중의 치환성 나트륨 함량을 증가시킨다고 하였다¹⁷⁾. 따라서 돼지분뇨 슬러리를 이용한 가축분뇨 액비의 제조나 이의 농경지 활용에 있어서 염분의 관리는 매우 중요한 요소가 된다. Moral 등(2008)은 질소량을 기준(210kg N/ha)으로 한 시비량을 설정하였을 때는 나트륨의 함량(415kg/ha)이 상대적으로 높기 때문에 토양 중의 나트륨 함량이 높아질 수 있다고 하였다²⁴⁾. 그러므로 돼지분뇨 슬러리 액비의 제조시 염분함량을 최소화하도록 유의하여야 한다. Table 3에 10개의 돼지분뇨 액비화시설에서 채취한 돼지분뇨 슬러리를 대상

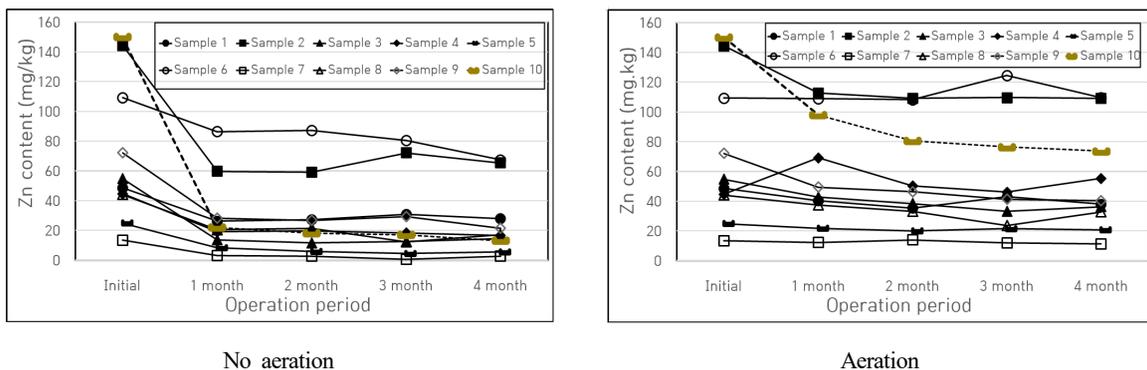


Fig. 8. Change in zinc content of piggery slurry during experimental period.

Table 3. Changes in the NaCl of Samples according to the Lapse of the Experimental Period

(Unit : %)

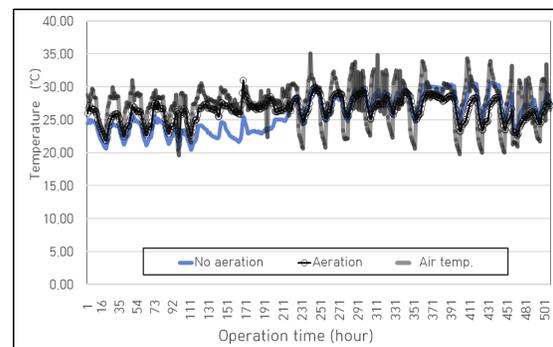
Items	No aeration			Aeration		
	Initial	After 1 month	After 2 month	Initial	After 1 month	After 2 month
Sample 1	0.24	0.26	0.26	0.24	0.27	0.27
Sample 2	0.17	0.19	0.18	0.17	0.18	0.18
Sample 3	0.17	0.18	0.18	0.17	0.19	0.19
Sample 4	0.15	0.21	0.21	0.15	0.23	0.21
Sample 5	0.25	0.27	0.25	0.25	0.26	0.28
Sample 6	0.20	0.21	0.21	0.20	0.22	0.22
Sample 7	0.075	0.094	0.09	0.075	0.096	0.10
Sample 8	0.12	0.15	0.14	0.12	0.15	0.15
Sample 9	0.14	0.17	0.16	0.14	0.17	0.17
Sample 10	0.20	0.21	0.22	0.20	0.23	0.22

으로하여 폭기여부 및 저장기간에 따른 염분농도를 분석한 결과를 수록하였다.

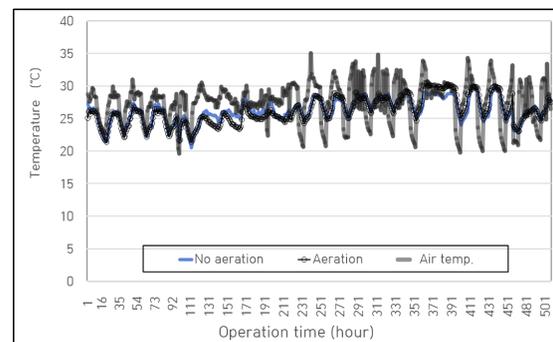
액비 중의 염분 농도도 구리, 아연의 경우와 유사한 현상을 보였는데, 염분 역시 처리과정에서 감소되지 않고서 액비의 증발에 의한 농축 또는 침전 등의 영향을 받은 것으로 판단할 수 있다. 그러나 돼지분뇨 슬러리 액비의 부숙도기준이 염분 2.0% 이하인 것을 고려하면 염분으로 인한 액비품질 문제는 우려할 수준은 아닌 것으로 판단된다.

3.7. 액비 온도 변화

가축분 등 유기물이 퇴비화될 경우에는 퇴비화 미생물이 유기물을 이용하는 과정에서 열이 발생하고, 이 열이 퇴비단 내에 축적됨으로써 퇴비단 심부 온도가 70°C 이상까지 상승하기도 한다. 그러나 액비의 경우에는 유기물 농도가 상대적으로 더 낮아서 퇴비에 비하여 온도상승 요인이 적다고 볼 수 있다. 본 실험에서 사용했던 돼지분뇨 슬러리 액비 반응조에서 폭기와 비 폭기처리구로 구분하여 각각 100리터씩을 채취하고, 이 두 시료를 대상으로 하여 다시 폭기와 비폭기구로 구분하여 총 4개의 반응조에 대한 온도측정 실험을 수행한 결과는 Fig. 9에 나타난 바와 같다. 온도측정 실험 시에도 폭기구의 경우에는 가축분뇨 처리시설 표준설계도 해설서에서 정하는 양만큼의 외기를 펌프로 흡입하여 반응조 바닥에 설치된 산기관을 통하여 액비통 내로 주입하였다.



Piggy slurry collected from no aeration tank (9-a)



Piggy slurry collected from aeration tank (9-b)

Fig. 9. Temperature variation of piggy slurry during experimental period.

일반적으로 돼지분뇨 슬러리에는 열원이 되는 유기물의 양이 중량기준으로 3%에 미치지 못하는 경우가 많으며, 본 실험에 사용된 돼지분뇨 슬러리로

고형물함량이 1.1~3.2% 수준이었다. 따라서 비열이 높은 물의 함량이 97% 내외에 이르는 액비의 온도를 올릴 정도의 유기물 분해열을 발생시킬 수 있는 여건이 형성되기는 어려운 것으로 판단된다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 폭기와 비 폭기 실험을 수행했던 두 가지의 돼지분뇨 슬러리 반응조의 중앙부의 온도를 측정한 결과 비 폭기 처리구에서 채취한 슬러리(9-a)나 폭기처리구에서 채취한 슬러리(9-b) 두 가지 모두 폭기 여부에 관계 없이 외기온의 영향을 받는 것으로 나타났다. 임 등(2021)은 호기성 액비화 발효열을 가정한 폐열회수시스템 구성 및 활용 연구를 수행하면서 호기성 액비화를 위한 발효조의 온도가 34.5~43.9°C의 범위에서 운영되는 점을 고려하여 실험 온도 수준을 35, 40, 45°C로 설정한 바가 있다²⁵⁾. Itoh 등(2019)은 가축분뇨의 액비화 반응조에서의 열원은 호기성 미생물에 의한 유기물 산화 반응열과 폭기과정에서 발생하는 유체마찰열 등이 라고 하였다²⁶⁾. 폭기식 반응조에서 운영되는 공기공급 과정에서 공기공급 장치에 의한 공기의 압축열과 전동기와 펌프장치 등에서 발생하는 기계적 마찰열 등이 공급 공기의 온도를 높이는 주요 요인이 될 것이다. 실제로 국내 D군의 가축분뇨 처리시설의 경우 공기 공급배관 내의 공기 온도가 70°C 내외에 달해서 공조장치를 이용하여 반응조 내 미생물이 고온 스트레스를 받지 않을 정도로 유입공기의 온도를 낮추어 운영하는 경우가 있고, N시의 시설에서는 공기 공급배관에 냉수를 살수하여 공급공기의 온도를 조절하는 경우가 있다. 본 실험에서 액비반응조 내의 온도는 외부에서 공급되는 공기의 온도와 약 1시간 내외의 시간차를 두고 동조되는 현상을 보였다. 즉 돼지분뇨 슬러리의 온도는 유기물의 산화열보다는 반응조 내로 공급되는 공기 온도와 더 밀접한 관계를 가지는 것으로 판단된다.

4. 결론

국내 돼지분뇨 슬러리 액비화시설 10개소에서 각기 다른 특성을 가진 반 부숙상태의 액비를 대상으로 실험을 수행한 결과, 폭기처리를 수행하였을 때

액비 부숙도 기준에서 정하고 있는 항목들의 기준치를 충분히 만족시킬 수 있었다. 실험수행 결과 부숙도 기준에서 정하는 각 세부 항목들의 변화를 요약하면 다음과 같다.

1. 액비의 수분함량은 실험 시작 후 1개월 이후부터 감소율이 커지는 경향을 보였으며 폭기를 실시한 처리구에서 감소정도가 비 폭기구에 비해 상대적으로 더 높은 경향을 보였다.
2. 돼지분뇨 슬러리 액비의 pH 평균값은 처음 8.82 수준이었지만 4개월의 저장기간이 지난 후에 폭기처리구의 pH는 7.57로 낮아졌지만 비폭기 처리구의 경우에는 8.75 수준을 보임으로써 액비를 폭기하는 경우에 액비의 pH가 더 많이 낮아졌다.
3. 실험기간의 경과에 따라 총질소함량은 점차 감소하는 경향을 보였으나 칼륨과 인함량은 감소율이 낮거나 일부는 약간 높아지는 결과를 보였다.
4. 구리와 아연의 농도는 모두 다 저장기간이 경과 함에 따라 점차 낮아지는 결과를 보였으며 폭기처리구에 비해 비 폭기처리구에서의 감소정도가 더 높게 나타났다.
5. 염분 농도는 저장기간의 경과에 따라 미소하게 높아지는 경향을 보였다.
6. 액비화실험에 있어 돼지분뇨 슬러리의 온도는 반응조 내로 공급되는 공기 온도와 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 국립축산과학원 연구과제인 돈분 퇴비화 공정별 물질수지 분석 및 냄새 발생 특성 연구(PJ014780)로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport,

- “Announcement No. 2021-1251”. (2021).
2. Agricultural cooperative federation (NongHyup of Korea), “Guidebook of standard design drawings for construction of livestock manure recycling facilities”. (2021).
 3. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, “Statistical data on the generation and treatment of livestock manure”. (2020).
 4. Statistics Korea, Korean statistical information service, “Statistic information in the field of agriculture, forestry and fisheries”. (2022).
 5. Ministry of Legislation, “Act on the Management and Use of Livestock Manure, Article 2 of the Enforcement Decree”. (2022).
 6. Hwang, O. H., Park, S. K., Jung, M. W., Han, D. W., Nho, W. G. and Cho, S. B., “Effects of pH modulation on the concentrations of odorous compounds from pit slurry of a pig operation building”, *J. Odor and Indoor Environment*, 17(10), pp. 1~10. (2018).
 7. Lee, D. S., Lee, J. B., Lee, M. Y., Joo, R. N., Lee, K. S., Min, S. W., Hong, B. D. and Chung, D. T., “Establishment scheme for official standards of liquid swine manure fertilizer”, *Korean Journal of Agricultural Science*, 43(3), pp. 360~368. (2016).
 8. Ministry of Agriculture. and Ministry of Land, Infrastructure, “Commentary of standard blueprint for livestock manure recycling facility”. (2009).
 9. Ministry of Legislation, “Act on the Management and Use of Livestock Manure, Article 2 of the Enforcement Regulations”. (2022).
 10. APHA., “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23th Edition”. (2017).
 11. Ministry of Environment, “Water Pollution Test Process Standards”. (2021).
 12. Byeon, J. E., Lee, H. J., Ryoo, J. W. and Hwang, S. G., “Changes in chemical properties and effect on germination of radish seed from aeration of Co-digestate fertilizers”, *Korean J. Crop Sci.*, 65(4), pp. 508~517. (2020).
 13. Kang, T. W., Halder J. N., Kim, S. R., Yoon, Y. M. and Lee, M. G., “Nutrient composition and heavy metal contents of matured livestock liquid fertilizer in Korea”, *J. of KORRA*, 25(4), pp. 31~39. (2017).
 14. Lee, C. R., Oh, Y. R., Song, B. N., Jung, J. A., Cho, J. L., Lee, S. M. and An, N. H., “The fate of ¹⁵N-labeled organic materials applied to Chinese cabbages cropping system”, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 53(1), pp. 59~69. (2020).
 15. Kim, C. G., Oh, S. Y. and Yoon, Y. M., “The Characteristics of organic degradation and ammonia volatilization in the liquid composting of pig slurry”, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 50(5), pp. 325~335. (2017).
 16. Daudèn, A. and Quilez, D., “Pig slurry versus mineral fertilization on corn yield and nitrate leaching in a Mediterranean irrigated environment”, *Europ. J. Agron.*, 21(1), pp. 7~19. (2004).
 17. Lim, T. J., Lee, I. B., Kang, S. B., Park, J. M. and Hong, S. D., “Effects of continual pre-plant application of pig slurry on soil mineral nutrients and yield of Chinese cabbage”, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 28(3), pp. 227~232. (2009).
 18. Park, J. S. and Na, H. S., “Analysis of trace metal in agricultural products”, *Korean J. Food & Nutr.*, 13(6), pp. 595~601. (2000).
 19. Kim, J. P., Park, J. W., Jin, D. R. and Lee, W. S., “Contamination of metal elements in livestock wastewater treatment plants in Korea”, *Journal of Environmental Analysis, Health and Toxicology*, 22(4), pp. 161~168. (2019).
 20. Jeong, C. U., Jeong, J. B., Kwon, J. O., Choi, J. H., Kim, S. A., Kang, K. H. and Lee, J. Y., “A Study on the characteristics of public livestock manures treatment plant sludge”, *Jeollabuk-do Institute of Health and Environment*. (2011).
 21. Lee, K. H., Yoo, J. H., Park, E. J., Jung, Y. I., Tipayno, S. C., Shagol, C. C. and Sa, T. M., “Effect of swine liquid manure on soil chemical properties and growth of rice(*Oryza sativa L.*)”, *Korean J.*

- Soil Sci. Fert., 43(6). pp. 945~953. (2010).
22. Zeng, L. and Shannon, M. C., "Salinity effects on seeding growth and yield components of rice", *Crop Science*, 40(4), pp. 996~1003. (2000).
23. Choi, S. H., Kim, H. I., Ahn, Y., Jang, J. R. and Oh, J. M., "Salinity effects on growth and yield components of rice", *Korean J. Limnol.*, 37(2), pp. 248~254. (2004).
24. Moral, R., Perez-Murcia, M. D., Perez-Espinosa, A., Moreno-Caselles, J., Paredes, C. and Rufete, B., "Salinity, organic content, micronutrients and heavy metals in pig slurries from South-eastern", *Spain, Waste Manage.*, 28(3), pp. 367~371. (2008).
25. Lim, R. G., Jang, J. K., Kang, T. Y., Son, J. W. and Lee, D. G., "A Study on composition and utilization of waste heat recovery system assuming aerobic liquid-composting fermentation heat", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 22(4), pp. 56~66. (2021).
26. Itoh, T., Iwabuchi, K., Maemoku, N., Sasaki, I. and Taniguro, K., "A new torrefaction system employing spontaneous self-heating of livestock manure under elevated pressure", *Waste Management*, 85, pp. 66~72. (2019).