

농가규모 양돈분뇨 퇴비화시 공기공급량 변화에 따른 퇴비 특성 평가

이성현^{a†}, 정광화^b, 이동준^b, 이동현^b, 장유나^c, 곽정훈^d

Evaluation of Composting Characteristics According to the Air Supply Change in Farm-Sized Swine Manure

Sunghyoun Lee^{a†}, Gwanghwa Jeong^b, Dongjun Lee^b, Donghyeon Lee^b, Yuna Jang^c, Junghoon Kwag^d

(Received: Jul. 8, 2019 / Revised: Sep. 9, 2019 / Accepted: Sep. 10, 2019)

ABSTRACT: Swine manure has been recognized as a organic sources for composting and many research was conducted to efficiently utilize and treat. This study was to evaluate a feasibility for producing swine manure compost under various treatment with mixture of swine manure and saw dust. Treatments were designed as follows; non aerated composting pile(REF), aerated composting pile of 100L/m³(EXP1), and aerated composting pile of 150L/m³(EXP2). The total days of fermentation were 28 days and each samples were collected at every 7 days from starting of composting. Temperature sensors were installed under 30~40cm from the surface of composting pile. Inner temperature in composting piles of EXP1 and EXP2 was rapidly increased to 67~75°C within 1~2 days. The elevated temperatures found during the thermophilic phase are essential for rapid degradation of organic materials. While swine manure composted, moisture content, total nitrogen, EC of EXP1, EXP2 in sample at 28 days were lower than those of REF. But, pH and organic matter of EXP1, EXP2 in sample at 28 days were higher than those of REF. After finishing fermentation experiment, maturity was evaluated with germination test. Calculated germination index(GI) at REF, EXP1 and EXP2 were 23.49, 68.50 and 51.81, respectively. The values of germination index were higher at EXP1 and EXP2 which is aerated composting piles than REF which is non aerated composting pile. According to the results, composting process by aerated static pile compost had significant effect on the reduction of required period for composting. Supplying adequate amount of air to compost swine manure will greatly reduce composting period.

Keywords: Swine manure, Composting, Germination Index, Maturity degree, Fermentation

초 록: 양돈분뇨는 퇴비화하여 이용할 경우 좋은 유기물 자원이 될 수 있으며, 양돈 분뇨를 효율적으로 이용하기 위한 많은 실험적 연구가 수행되었다. 본 연구에서는 양돈분뇨를 톱밥과 혼합하여 여러 가지 퇴비화 조건에서 퇴비화 촉진정도를 실제 농가 현장에서 활용할 수 있도록 시험규모를 확대하여 수행하였다. 퇴비화 시험처리는 퇴비화기간 동안 공기를 송풍하지 않은 대조구와 퇴비화기간 동안 퇴비단 아래에서 공기를 송풍한 시험구로 구분하였다. 시험을 위한 퇴비단의 크기는 각각 5 m³로 조성하였다. 시험구 1 (EXP1)에는 돈분 1 m³당 100 L의 공기를 송풍하였으며, 시험구 2 (EXP2)에는 돈분 1 m³당 150 L의 공기를 송풍하였다. 공기공급량을 1 m³당 100 L, 150 L로 한 것은 현재

^a 국립축산과학원 축산환경과 공학박사·연구관(Ph.D.·Senior Researcher, Animal Environment Division, National Institute of Animal Science)

^b 국립축산과학원 축산환경과 연구사(Junior Researcher, Animal Environment Division, National Institute of Animal Science)

^c 국립축산과학원 축산환경과 농업주사(Analysis Technician, Animal Environment Division, National Institute of Animal Science)

^d 국립축산과학원 축산환경과 연구관(Senior Researcher, Animal Environment Division, National Institute of Animal Science)

† Corresponding author(e-mail: leesh428@korea.kr)

활용하고 있는 퇴비화시설 설계 규정에 가축분 1 m³당 150 L의 규모의 송풍 시설을 설치할 것을 권장하고 있으나 현장에서는 과다 송풍 우려가 발생하고 있기 때문에 이에 대한 검토가 필요하기 때문이었다. 퇴비화 발효기간은 4주로 하였으며, 퇴비화 시작 직후부터 매주 퇴비단의 샘플을 채취하여 물리 화학적 성분을 조사 분석 하였다. 퇴비단의 온도는 퇴비단 표면으로부터 약 40cm 지점에 온도센서를 설치하여 매 30분 간격으로 기록하였다. 발효온도를 분석한 결과 시험구에서는 공기를 송풍한 1~2일차에 최고온도 67~75°C에 도달하였다. 이는 호열성 세균이 급격하게 증가 활동하였기 때문으로 판단되었다. 퇴비화기간 동안 수분함량, 총질소, EC의 값이 송풍발효가 완료된 4주차에 대조구에 비해 낮은 것으로 나타났다. 하지만 pH와 유기물 함량은 시험구에서 대조구에 비해 높게 나타났다. 송풍발효가 끝난 4주차의 부숙정도를 평가하기 위하여 종자발아지수를 분석한 결과 대조구에서 23.49, 시험구 1이 68.50, 시험구 2가 51.81로 나타났다. 종자 발아지수로 평가한 퇴비의 부숙은 대조구에 비해 시험구에서 매우 높은 것으로 나타났다. 따라서 양돈분뇨의 퇴비화시 외부로부터 가축분뇨 1 m³당 100~150 L/min의 공기를 공급하는 것이 퇴비의 부숙을 매우 빠르게 할 수 있는 것으로 나타났다.

주제어: 양돈분뇨, 퇴비화, 발아지수, 부숙도, 발효

1. 서론

축산업은 국민에게 양질의 단백질을 공급하는 중요한 농식품 산업중 하나이다. 최근 국민 식생활의 서구화로 인해 육류의 소비량이 급속하게 증가하고 있다. 우리나라 국민 1인당 육류소비량(쇠고기, 돼지고기, 닭고기)은 '05년 31.9kg에서 '16년 49.5kg으로 '05년 대비 약 155%가 증가하였다(MARFA, 2017). 이에 따라 수입되는 축산물의 양도 많아졌지만 국내 가축사육 두수의 증가가 급속하게 이루어졌다. 국내 축산업 생산액은 지난 10년간 약 79%가 증가하여 '17년 기준 20.2조원에 달하며, 전체 농업생산액 약 48.2조원 중 축산업의 비중이 42%를 차지할 만큼 매우 중요한 하나의 산업이 되었지만¹⁾ 축산물 생산과정에서 발생하는 가축분뇨가 사회적 문제로 제기되고 있다. 가축이 배설한 분뇨에는 질소, 인산, 칼리 성분이 포함되어 있어 적절하게 처리하면 화학비료를 대체할 수 있는 유용한 자원이 될 수 있다²⁻⁷⁾. 그러나 부적절하게 관리하여 미처리된 가축분뇨가 수계, 토양 등으로 환원되면 환경을 오염시키는 원인이 될 수 있다. 과거 농경지에 이용할 비료, 퇴비 등이 부족하고, 농가에서 소규모 가축사육을 하던 때는 가축이 배설한 분뇨의 처리에 큰 문제가 없었다. 하지만 최근 가축의 사육규모가 크게 증가하고 있고, 가축사육 농가수가 급속하게 감소함에 따라 농가 호당 가축의 사육규모가 크게 증가하였다. 우리나라 돼지

사육두수는 '06년 9.3백만 두에서 '16년 기준 10.3백만 두가 사육되고 있다. '06년 대비 '16년 사육두수가 약 10% 증가하였으나 농가수는 113백호에서 46백호로 약 60%가 줄어들었다¹⁾. 이는 곧 농가호당 돼지의 사육두수가 크게 증가하였음을 의미한다. 따라서 돼지가 배설하는 가축분뇨의 발생량도 돼지의 사육밀도에 따라 집중되고 있다. 돼지분뇨의 처리방법은 돼지의 사육환경과 밀접한 관련이 있다. 최근 우리나라 돼지 사육시설의 분뇨처리 형태는 대부분 분과 뇨가 혼합되어 발생하는 슬러리 방식으로 축사내부에 저류되다가 배출된다⁸⁾. 또한 톱밥을 깔짚으로 깔아 주기적으로 깔짚을 교환하는 톱밥 돈사가 일부 이용되고 있고, 축사내부에서 분과 뇨가 어느 정도 분리 배출되는 스크레이퍼 방식의 처리방법도 이용되고 있다. 어떤 형태의 분뇨 배출의 경우라도 분뇨의 최종 처리방법은 퇴비화, 액비화, 정화처리 기술로 구분된다. 양돈농가에서 배출된 가축분뇨의 경우 가축분뇨를 교반 발효 할 수 있는 퇴비화시설이 설치되어 있으면 큰 문제없이 처리가 가능하다. 하지만 소규모 농가 혹은 가축분뇨 교반발효시설이 없는 농가의 경우는 돈사에서 배출된 돈분은 톱밥 등의 수분조절제와 혼합하여 단순 퇴적시켜 놓았다가 농경지에 살포한다. 그러나 이 과정에서 발효가 제대로 이루어지지 않은 미부숙 퇴비가 농경지에 살포됨으로 인해 악취로 인한 민원, 우천시 하천으로의 영양성분 유출 등으로 사회적 문제가 발생하고 있고,

결과적으로는 축산업에 대한 이미지를 나쁘게 하는 원인이 된다. 퇴비화는 가축분뇨의 친환경적 처리 방법으로 가장 많이 이용되고 있는 방법이고, 퇴비화 과정 중 고온의 발효열에 의한 병원성 미생물 및 잡초종자가 사멸되고, 최종 산물인 퇴비의 경우 악취가 발생하지 않아 매우 유용한 자원으로 평가된다⁹⁻¹³. 이와 같은 이유로 우리나라의 경우 '17년 가축분뇨 전체 발생량 4,846만톤 중 91%인 4,410만톤이 퇴비화와 액비화 방법으로 처리된다. 퇴비화는 산소, 온도, 수분 등이 조절된 환경에서 미생물 작용에 의해 유기물이 분해되어 안정화된 부식 등으로 바뀌는 과정이다^{14,15}. 따라서 퇴비화 과정에 영향을 주는 요인들이 적절하게 조절되어야 한다. 고액분리한 돈분 고형분의 경우 탄질율이 낮고 수분함량이 높기 때문에 퇴비화기술을 적용할 경우 퇴비화 효율을 높이기 위하여 탄소원의 보충과 수분 조절을 위한 충전재를 섞어 주어야 한다. 일반적으로 국내에서 가축분뇨 퇴비화시 수분조절제로 많이 사용되는 충전재는 톱밥, 코코아피트, 왕겨 등이다^{7,16}. 가축분뇨를 퇴비화 할 때 퇴비화에 영향을 미치는 요인은 크게 온도, 수분함량, 탄소와 질소의 비율 등으로 알려져 있으며 가장 이상적인 퇴비화 조건은 초기수분함량 60~70%, 탄질을 1:25~35이다^{9,12-14,17}. 또한 퇴비화 과정에서 퇴비화를 촉진하기 위하여 외부로부터 산소의 공급이 매우 중요한 요인 중 하나로 알려져 있으며, 국내 퇴비화시설 설계기준에는 가축분뇨 1 m³당 150 L/min의 공기를 공급하는 것으로 되어있다. 퇴비단에 너무 적은 양의 공기를 공급하면 미생물의 활성화에 필요한 양을 충족하지 못해 혐기발효가 발생하고, 너무 많은 양의 공기를 공급하면 퇴비단의 온도를 떨어뜨려 유기물의 적절한 분해가 이루어지지 않는다고 하였다². 축산분뇨와 같은 유기성폐기물은 유기물 및 수분함량이 높아 적절하게 처리되지 않을 경우 악취 및 독성가스가 발생될 수 있으며, 침출수 발생으로 수계를 오염시킬 수도 있다. 퇴비화 과정을 거쳐 생산된 퇴비의 경우라도 미부숙된 퇴비를 사용하면 암모니아 가스나 황 화합물 등의 발생으로 작물에게 피해를 입힌다. 이와 같은 피해를 줄이기 위해서는 부숙이 완료된 안전한 퇴비를 사용해야 한다.

본 연구에서는 교반발효기가 설치되지 않은 양돈

농가에서 퇴비화를 위해 주로 이용하는 퇴적식 퇴비화기술의 효율을 높이기 위한 방안을 찾고자 하였다. 기존 단순퇴적식 퇴비화 방법과 단순퇴적식 퇴비단의 하단에 송풍을 통해 산소를 공급하면서 퇴비화 과정을 모니터링 하였다. 퇴비화 효율의 분석을 위하여 수분, 온도, pH, EC, 퇴비의 부숙도 및 악취발생농도 등을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시험용 돈분

시험에 사용한 돈분은 충남 논산시 양돈 농가의 톱밥 발효돈사에서 깔짚을 교체하면서 배출된 돈분을 사용하였다. 톱밥 발효돈사의 경우 돈사내부에 사육되는 돼지가 배설한 분과 노가 혼합된 상태로 유지된다. 돈사바닥에 깔아준 톱밥이 최대의 수분을 흡수하여 더 이상 흡수할 수 없는 상태가 되면 깔짚을 교환해 준다. 돈분은 논산계룡축협에 의뢰하여 암플트릭에 상차하여 전주 국립축산과학원 퇴비사로 운반하였다. 돈분의 수분함량을 퇴비화조건에 적합한 60% 전후로 조절하기 위하여 돈분 12m³와 톱밥 3m³를 혼합하였다. 돈분과 톱밥을 혼합할 때 초기수분함량의 판단은 혼합된 돈분을 손으로 째 쥐었을 때 돈분이 약간 멍쳐진 상태로 있을 때로 판단하였다. 돈분과 혼합한 톱밥은 소나무톱밥을 사용하였다. 돈분과 톱밥은 Fig. 1과 같이 굴삭기를 이용하여 톱밥이 돈분과 혼합될 때 생톱밥이 보이지 않을 때까지 고르게 혼합하였다.

2.2. 퇴비단 조성

돈분의 퇴비화 시험을 위하여 돈분과 톱밥을 고르게 혼합한 후 Fig. 2와 같이 3개의 퇴비단을 조성하였다. 각각의 퇴비단의 적재 용량은 약 5m³이다. 각각의 퇴비단 중앙에는 20L 버킷에 5mm 드릴로 윗면, 옆면에 약 100여개의 구멍을 뚫은 후 얹어 놓았다. 퇴비단 a(REF)는 대조구이며 공기를 공급하지 않은 단순퇴적식 퇴비단이다. 퇴비단 b(EXP1), c(EXP2)는 시험구이며 퇴적송풍식 퇴비단이다. 퇴비단 b(EXP1)에



Fig. 1. Mixing of swine manure and saw dust.



Fig. 2. Composting testing of swine manure.

는 $100L/m^3 \cdot min$, 퇴비단 c(EXP2)에는 $150L/m^3 \cdot min$ 의 공기를 퇴비단 조성직후부터 4주 동안 송풍하였다. 퇴비단의 중앙에 버켓을 뒤집어 놓은 후 드릴로 구멍을 뚫어 공기를 분배 한 것은 밀폐된 용기에 압력이 가해졌을 때 모든 면에 작용하는 압력은 같다는 파스칼 원리를 이용한 것이다. 양돈 분뇨의 경우 돼지가 일일 배설하는 분의 양이 $0.87L$ 로 고시되어 있다. 따라서 $5m^3$ 의 퇴비단 크기는 돼지 5,700두가 하루에 배설하는 분의 양에 해당한다. 퇴비단에 공기의 공급은 링브로워에 인버터를 달아 정해진 양의 공기가 공급될 수 있도록 조절 하였다. 공기의 공급량을 $100\sim 150L/m^3 \cdot min$ 로 한 것은 현재 이용하

고 있는 퇴비화시설 설계 규격에 $150L/m^3 \cdot min$ 로 공기를 공급하도록 되어 있는 것이 과다공급의 우려가 있다는 문제가 제기되고 있어 이를 확인코자 시험설계를 하였다.

2.3. 온도 측정 및 퇴비 샘플채취

퇴비화 과정 중 온도의 변화는 퇴비화의 정도를 판단하는 중요한 요소로 사용된다. 본 연구에서도 퇴비화 전 과정의 퇴비단 온도 변화를 측정하기 위하여 온도센서를 설치하였다. 온도 센서는 퇴비단의 표면으로부터 약 40cm 깊이에 설치하였다. 온도센서는 $-4\sim 100^{\circ}C$ 까지 측정할 수 있는 TMC6-HD(USA)



Fig. 3. Installment of temperature sensor and sampling of compost.

를 사용하였으며 데이터로거는 HOBO temp/RH/2 ext channels을 사용하였다. 온도센서에서 측정된 온도는 데이터로거에 매 30분 간격으로 기록되도록 미리 프로그래밍 하였다. 또한 퇴비화 시험시 송풍기로 공급되는 온도와 습도도 함께 측정하였다. 퇴비화 과정 중 돈분의 물리적, 화학적 변화를 분석하기 위하여 매주 간격으로 퇴비의 샘플을 채취하였다. 퇴비 샘플의 채취는 샘플채취기를 만들어 각각의 퇴비단 옆면 3개소에서 표면에서부터 50cm깊이까지의 퇴비를 채취하여 고르게 혼합한 후 약 1kg의 분석 샘플을 만들었다. 채취한 샘플은 2중 지퍼백에 담아 곧바로 실험실로 옮겨 분석을 실시하였다. 샘플채취기는 내경 40mm, 길이 600mm의 파이프를 이용해 제작하였다. 샘플채취기 끝단에는 톱니를 만들어 퇴비단에서 샘플을 채취할 때 작업이 쉽도록 하였다. Fig. 3과 같이 샘플채취기로 샘플을 채취하면 퇴비단을 흠트리지 않고 퇴비단 표면에서부터 깊이 50cm까지의 샘플을 고르게 채취할 수 있어 분석의 정밀도를 높일 수 있을 것으로 판단되었다.

2.4. 분석내용

퇴비화 시간 경과에 따른 퇴비의 물리적, 화학적 특성 조사를 위하여 온도, 수분, pH, 총질소(total nitrogen; T-N), 전기전도도(electrical conductivity; EC), 총 유기탄소(total organic carbon; TOC), 유기물대 질소비(O.M/N ratio)등을 분석하였다. 수분함량은 건조법, pH와 EC는 1:5법, 유기물함량은 회화법, 총질소는

켈달법 등 농촌진흥청의 비료의 품질검사 및 시료 채취기준, 농업과학기술 연구조사 분석기준에 준하여 분석하였다. 모든 분석은 3반복 수행하여 평균값을 사용하였다.

2.5. 퇴비 부숙도 평가

퇴비의 부숙도 평가는 발효시작 직후부터 송풍을 시작하여 송풍이 끝나는 4주째 퇴비의 샘플을 채취하여 실시하였다. 퇴비의 부숙도는 종자발아법으로 평가하였다. 분쇄시료 1g에 증류수 50mL를 가하여 70°C에서 2시간동안 열수 침탕하였다. 그 다음 NO. 2여과지로 침출액을 거른 후 여액을 90mm 페트리 디시에 5mL를 가한 후 무종자 30립을 넣어서 30°C에서 5일간 암배양하여 무종자의 발아율과 뿌리 신장을 조사하였다. 각 처리구마다 3반복 시험하여 평균값을 사용하였다. 이때 대조구는 증류수를 이용하였으며, 종자발아지수는 아래의 식을 이용하였다.

$$GR=(\text{발아율}/\text{대조구의 발아율})\times 100$$

$$RE=(\text{뿌리 길이}/\text{대조구의 뿌리 길이})\times 100$$

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

여기서, GR은 발아율, RE는 뿌리신장율, GI는 발아지수이다.

2.6. 퇴비단의 악취분석

양돈분뇨 퇴비화를 위한 퇴비단 조성 직후와 퇴

Table 1. Properties of the Saw Dust and Swine Manure

	Moisture content (%)	Organic matter (%)	Electrical conductivity (mS/cm)	pH	C/N ratio	Total nitrogen (%)
Saw dust	18.7	72.2	0.36	5.13	528	0.087
Swine manure	69.1	27.4	40.10	7.92	33	1.285

비화 개시 4주차에 각각의 퇴비단에서 발생하는 악취를 분석하였다. 퇴비단에서 발생하는 악취를 포집하기 위하여 2L 용량의 페트병 입구 근처에 약 40 cm 크기의 구멍을 낸 후 퇴비단 속에 페트병을 거꾸로 매립하였다. 그 후 페트병의 바닥에 샘플채취를 위한 구멍을 만든 후 호스를 연결하여 악취 샘플을 채취하였다. 악취의 측정 및 분석은 악취방지법의 공기희석관능법과 기기분석법을 이용하였다. 악취의 샘플채취와 분석은 휘발성지방산류, 페놀류, 인돌류의 시료채취는 SIBAT Pump(MP-ΣNII)를 이용하여 Tenex TA 튜브에 0.1L/min 속도로 5분 동안 포집하였다. 튜브는 열탈착장치(Thermal Desorption: TD)를 활용하여 GC(CP3800, Varian, USA)/FID로 도입시켰다. 컬럼(DB-WAX, 30m × 0.25mm × 0.25μm)으로 도입된 시료는 40°C에서 150°C까지는 10°C/min으로, 230°C까지는 18°C/min으로 승온 분석하였다. 황화합물류는 알루미늄 Tedlar 백을 이용하여 시료채취를 하였으며, TD 및 CP-sil 5CB(60m × 0.32mm × 5μm) 컬럼이 장착된 GC/FPD(Flame Photometric Detector)을 사용하여 분석하였다. 오븐온도는 5분 동안 80°C로 유지한 후 200°C까지 8°C/min으로 승온시켰으며, 200°C에서 5분 동안 유지하였다. 암모니아는 Boric acid에 흡수시킨 후 페놀-니트로프루시드 나트륨용액(sodium nitroprusside, [Na₂Fe(CN)₅NO] · 2H₂O)과 차아염소산 나트륨용액(유효염소 3~10%)을 가하여 암모니아온과 반응시켜 생성되는 인도페놀류의 흡광도를 흡광광도계(UV)를 이용하여 640nm에서 측정 하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

퇴비화는 산소가 있는 조건에서의 유기성 폐기물 분해인 호기성퇴비화와 산소가 없는 조건에서의 유기

성 폐기물 분해인 혐기성퇴비화로 구분된다. 호기성 퇴비화의 경우 퇴비화 진행시 CO₂, NH₃, 수분 및 열이 발생한다. 효과적인 퇴비화를 위한 조건은 재료의 수분 40~60%, 탄소와 질소의 비율인 탄질비 25~30:1이다⁹⁾. 퇴비화 시험을 위해 사용한 톱밥과 돈분의 특성은 Table 1과 같다.

3.1. 온도

퇴비화는 40~65°C의 호열성 조건에서 유기성 폐기물을 호기적 방법으로 분해하는 것이며, 퇴비화 과정 동안 미생물이 산소를 소비하며 유기물을 분해하면서 열, CO₂, 수분 등을 방출한다¹⁸⁾. 유기성폐기물의 퇴비화 과정 중 미생물의 유기물 분해에 의해 발생하는 온도변화는 퇴비화과정을 가장 잘 나타내는 지표중 하나이며 최적의 퇴비화 온도는 50~55°C라고 하였다^{19,20)}. 대조구 및 시험구의 퇴비화 경과시간에 따른 온도변화를 Fig. 4에 나타내었다. 대조구의 경우 퇴비단 조성 직후부터 약 10일정도 온도 상승 기울기가 크게 나타났으며 그 이후 4주차까지 60~65°C의 온도가 지속적으로 유지되었다. 시험구 b의 경우 퇴비단 조성 직후 온도가 급속도로 상승하여 하루 만에 최고온도 약 75°C에 도달한 후 60°C 이상의 온도가 8일 정도 유지되다가 점차 온도가 하강하여 4주차에는 외기온도 보다 약간 높은 수준을 보였다. 시험구 c의 경우는 시험구 b에 비해서 최고 도달 온도가 약 67°C로 약간 낮았으며, 60°C 이상 온도의 지속시간도 약 6일 정도로 시험구 b에 비해 다소 짧았다. 또한 최고 온도 도달 후 온도 강하가 빠르게 발생하는 것으로 나타났다. 그 이후 외기온 보다 약 10~15°C 높은 상태로 외기온의 변화 패턴에 따라 온도가 변화하면서 유지되었다. 이는 공기의 공급이 과다하여 퇴비단의 온도가 대기중으로 빼앗겼기 때문으로 판단되었다. 시험구 b와 시험구 c에서 퇴비단의 온도가 발효 시작 직후 급속하게 상승한 것은

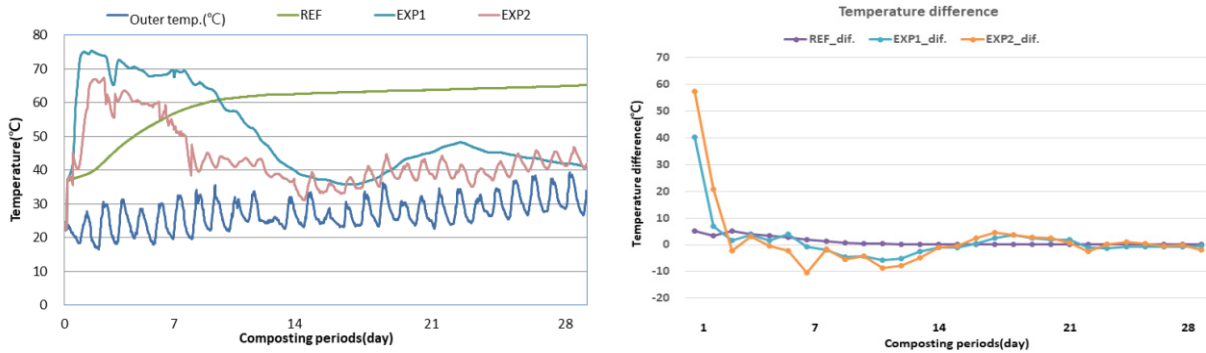


Fig. 4. Variation in daily temperature and daily average temperature difference between next day and previous day of the composting piles during composting with the mixture of swine manure and saw dust: left is daily temperature and right is daily average temperature difference.

퇴비단에 공기를 공급함으로써 인해 퇴비 단 속 미생물의 활성이 급속히 늘어났기 때문으로 판단되었다. 효과적인 퇴비화를 위해서 55~60°C의 온도가 3일 정도 유지되어야 한다고 하였다⁹⁾. 퇴비화는 호기성 미생물에 의해 발생하는 자체 발열과 부숙과정 시 중온성 및 고온성균의 활성화온도를 60°C 나누며 온도 상승 단계, 고온단계 및 안정화 단계의 3단계로 구분된다고 하였다²¹⁾. 퇴비화 기간 중 익일평균 온도에서 전일평균 온도를 뺀 온도차를 보면 송풍을 한 시험구에서 퇴비화초기에는 일간 평균 온도변화가 크다가 퇴비화 후반으로 갈수록 작아지는 것으로 나타났으나, 송풍을 하지 않은 대조구에서는 일간 평균 온도변화가 매우 작은 것으로 나타났다.

3.2. 수분

유기성 폐기물의 퇴비화시 적절한 수분의 유지는 미생물 활성을 향상시키기 위하여 필요하다. 수분함량이 40% 이하가 되면 미생물이 왕성하게 활동하지 않기 때문에 유기성 폐기물의 분해를 어렵게 한다. 반대로 수분이 65% 이상이 되면 재료에 공기공급을 원활하게 할 수 없어 혐기상태가 될 수 있다. 따라서 유기성 폐기물의 호기성 퇴비화를 위한 최적의 수분함량은 40~65%이다¹⁴⁾. 우리나라 비료공정 규격에는 가축분퇴비의 경우 부숙퇴비의 수분함량을 55% 이하로 규정하고 있다. Fig. 5(a)는 퇴비화 과정중의 퇴비단 수분 변화를 나타낸 것이다. 본 시험의 경우 퇴비화 시험초기의 수분함량은 약 66% 이었다. 시험구

b의 경우 퇴비의 수분이 점점 낮아져 3주차에 약 33%로 나타났으며, 4주차에는 약 38%로 약간 상승하였다. 시험구 c의 경우 발효 시작 후 3주차에 가장 낮은 21%로 나타났으며, 4주차에는 약 26%로 나타났다. 대조구의 경우에는 초기 수분이 점점 낮아져 2주차에는 약 60%로 나타났으며, 이후 큰 수분 변화가 없이 유지되었다. 이는 인위적인 공기 공급을 하지 않아 발효기간이 길어지고 수분의 증발이 신속하게 일어나지 않기 때문인 것으로 판단되었다.

3.3. EC

Fig. 5(b)는 퇴비화 과정중 퇴비단의 EC 변화를 나타낸 것이다. 돈분 퇴비화시 초기 EC는 약 40mS/cm로 나타났다. 대조구의 경우 발효 1주차에 EC가 약 50mS/cm까지 상승하여 4주차 까지 큰 변화가 없었다. 시험구 b의 경우 발효 시작 첫 주차에 22mS/cm까지 낮아졌다가 상승하기 시작하여 3주차에 32mS/cm로 나타났으며, 송풍을 종료한 4주차까지 변화가 없었다. 시험구 c의 경우 발효 직후부터 2주차까지 낮아져 약 23mS/cm을 나타내었다가 3주차에는 다시 상승하여 약 36mS/cm로 나타났으며, 3주차의 값이 4주차까지 큰 변화가 없었다. Cortus 등의 분석에 의하면 돈분 슬러리의 EC가 성상에 따라 19.3에서 41.2mS/cm까지 나타났다. Chang 등은 일반적인 퇴비의 EC 범위는 25~50mS/cm로 보고하였는데²²⁾ 본 시험에서도 EC 값이 그 범위 내에 있었다.

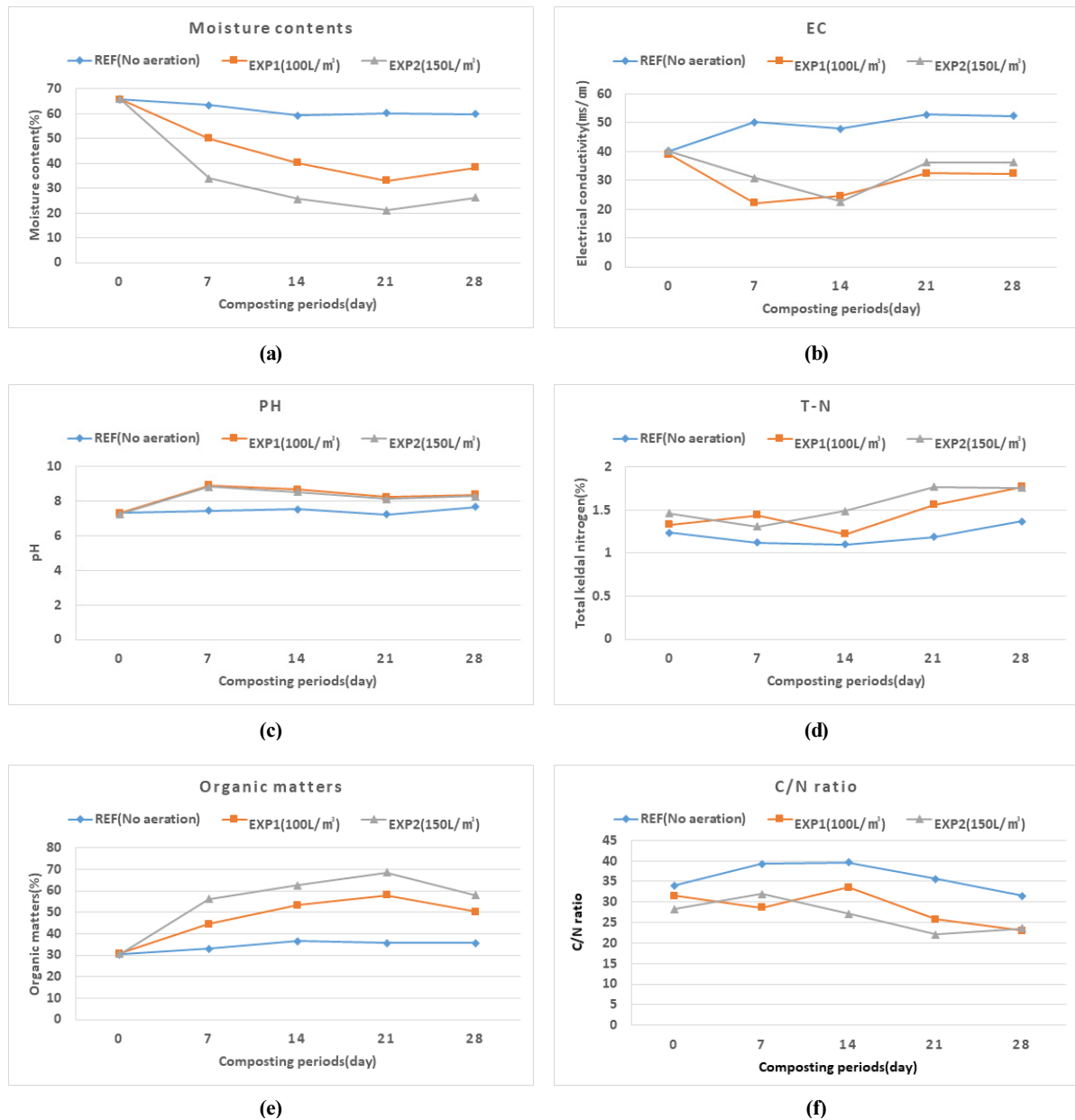


Fig. 5. variation in moisture contents, EC, pH, T-N, organic matters, and C/N ratio of composting piles during composting with the mixture of swine manure and saw dust.

3.4. pH

퇴비화 기간 중 pH는 퇴비화 초기에는 유기산 생성 때문에 감소한다. 이후 퇴비화가 본격적으로 진행된다면 암모니아의 생성으로 pH가 증가하다가 일정 기간 경과 후 퇴비화 안정기에 도달하면 7~8정도로 유지된다고 하였다²³⁾. 단백질의 탈 아미노화는 암모니아 때문에 pH를 급격하게 상승시키며, 반대로 탄수화물과 지질의 분해동안 유기산의 생성은 pH를

감소하게 한다⁹⁾. Fig. 5(c)는 양돈분뇨 퇴비화 과정 중의 퇴비단 pH 변화를 나타낸 것이다. 시험구 b와 c는 퇴비화 개시 후 첫 주째 되는 시점에 pH가 약 9까지 상승하였다가 낮아지기 시작하여 3주차 이후에 안정화되는 것으로 나타났으며, 송풍을 하지 않은 대조구의 경우 pH가 7에서 8사이를 유지하는 것으로 나타났다. 퇴비단 조성 직후부터 정해진 양의 공기를 송풍한 시험구의 경우 주 발효가 부속 개시 후

3주일에 완료된 것으로 판단되었다. 이는 퇴비화 시험 분석을 한 다른 연구자들의 실험결과와 유사한 것으로 판단되었다. 퇴비재료의 pH변화는 부숙 초기인 1~2주경에는 8.9 수준으로 상승하였다가 그 이후 중성부근으로 떨어졌으며, 4주 이후부터 정치식보다 간헐통기방식에서 빠른 안정화를 보여, 주 발효가 부숙 개시 후 3주일과 6주일에 끝났다고 하였다²⁾.

3.5. 총질소

Fig. 5(d)는 퇴비중의 총질소 함량 변화를 나타낸 것이다. 돈분 퇴비화시 초기 발효기간 동안 총질소의 함량은 전체 시험구에서 발효시작 후 1~2주차에 초기 질소함량보다 낮아졌다가 다시 증가하였다. 발효시 공기공급을 하지 않은 대조구의 경우 초기 1.24 %에서 2주차에 1.10 %로 낮아졌다가 상승하여 4주차에는 1.37 %까지 증가하였다. 시험구 b의 경우에는 초기 총질소 함량은 약 1.33 % 이었으며, 2주차에 1.22 %까지 낮아졌다가 상승하여 4주차에는 1.77 %까지 증가하였다. 시험구 c의 경우도 초기 1.46 %에서 1주차에 1.31 %로 낮아졌다가 상승하여 3주차에는 1.77 %까지 증가하였고 그 값이 4주차 까지 변화가 없었다.

3.6. 유기물함량

우리나라 비료공정 규격에는 가축분퇴비의 경우 가축 분뇨를 50% 이상 의무적으로 사용하여 부숙 과정을 거쳐 제조한 비료이고, 퇴비는 동물의 분뇨 등을 사용하여 부숙 과정을 거쳐 제조한 비료라고 정의 되어있다. 또한 가축분퇴비와 퇴비에는 유기물이 30% 이상 함유되어야 한다고 규정하고 있다. Fig. 5(e)는 퇴비화 과정 중 퇴비단의 유기물 함량 변화를 나타낸 것이다. 퇴비화 과정 중 유기물 함량의 변화는 시험구 b의 경우 초기 56% 이었으나 3주차에 68% 까지 상승하였다가 4주차에 58%로 낮아졌다. 시험구 c의 경우는 초기 44% 이었으나 3주차에 58%까지 상승하였다가 4주차에 50%까지 낮아졌다. 하지만 대조구의 경우에는 초기 30% 이었으며, 2주차에 36%까지 상승하였으며, 그 이후 4주차까지는 거의 변화가 없었다.

3.7. C/N율

C/N율이 20:1보다 낮으면 탄소원의 최대이용으로 인해 암모니아와 다른 악취를 유발시키며, C/N율이 40:1을 초과하면 질소원 부족으로 유기물의 퇴비화가 지연된다. 퇴비화 과정동안 탄소함량은 미생물에 의한 분해과정에서 이산화탄소 발생에 의해서 감소되는 경향을 보인다. C/N율은 최종 산물의 특성뿐 아니라 퇴비화 과정에 영향을 주는 중요한 요인이며, 퇴비화를 위한 최적의 C/N율은 25~30:1이라고 하였다¹⁸⁾. 하지만 또 다른 연구에서는 C/N율 15:1 이하에서도 퇴비화가 잘 진행된다고 하였다²⁴⁾. 탄소는 퇴비화 과정에서 미생물의 유기물 분해를 위한 에너지원으로 이용되며, 질소는 미생물의 생장에 필요한 단백질 합성을 위해 필요하다고 하였다²⁵⁾. 양돈 분뇨와 같은 유기성폐기물의 수분과 C/N율을 퇴비화 조건에 맞게 조절하기 위해서는 톱밥, 왕겨, 폐지, 코코아피트 등 탄소원과 혼합하는 것이 일반적인 과정이며, 본 연구에서는 수분함량과 C/N율을 조절하기 위하여 돈분에 톱밥을 혼합하였다. Fig. 5(f)는 퇴비화 과정 중 C/N율 변화를 나타낸 것이다. 퇴비화 시작시 C/N율은 대조구가 34이었으며, 시험구 b는 32, 시험구 c는 28로 Beaty and Zymunt가 최적 C/N비라고 제시한 25~30:1 수준에 있었다. 퇴비화가 진행되면서 일부 시점에서 C/N비가 약간 증가한 경향이 있었으나 대조구와 시험구에서 모두 퇴비화 초기에 비해서 낮아지는 경향을 보였다. 대조구의 C/N비는 퇴비화 2~3주차에 약 40까지 상승하였다가 4주차에는 31로 낮아졌으며, 시험구 b와 c는 4주차에 23으로 낮아졌다.

3.8. 퇴비 부숙도 평가

퇴비의 부숙도를 기계적으로 평가하는 방법은 콤백과 솔비타를 이용한 방법이 있다. 이 두 방법은 퇴비에서 발생하는 암모니아와 이산화탄소 가스 농도를 측정하여 발생의 많고 적음에 따라 부숙도를 판정하는 방법이다. 이 두 방법은 측정을 위한 전처리 과정이 필요하고 경우에 따라 측정 정확도가 다르게 나타나는 등의 문제점이 있어 퇴비의 최종적인 부숙도 판정방법으로 종자 발아법을 이용한다. 본 연구에서도 발효시작 후 4주차의 퇴비 샘플을 채취하여

Table 2. Germination Index of the Treatment

	REF	b(EXP1)	c(EXP2)
Seed Germination rate(%)	79.31	95.40	98.85
Root elongation rate(%)	29.61	71.80	52.41
Germination Index	23.49	68.50	51.81

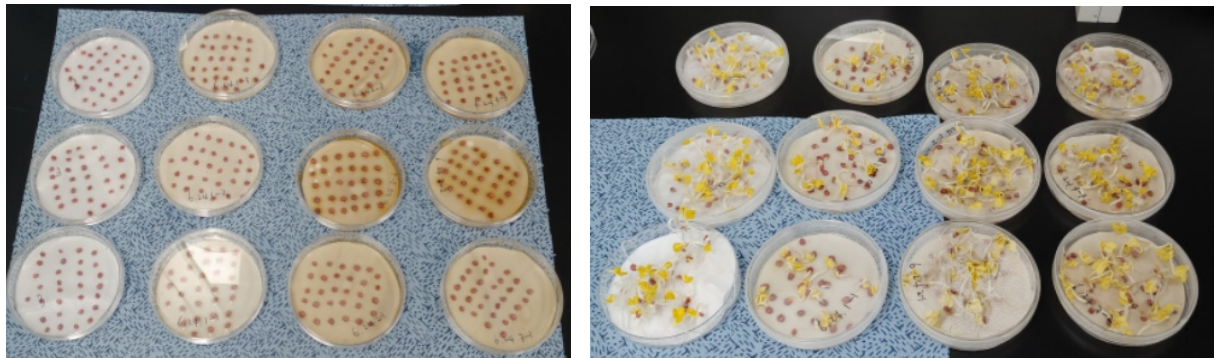


Fig. 6. Degree of germination by seed germination method; left is before germination and right is after germination.

종자발아법에 의한 부숙도를 측정하였다. Table 2는 종자발아율과 종자발아지수를 나타낸 것이고, Fig. 6은 종자 발아시험 광경이다. 퇴비화 과정 중 공기를 공급하지 않은 대조구의 발아율은 평균 79.31%로 나타났으며, 발효과정 중 공기를 공급한 시험구 b와 시험구 c의 발아율은 각각 95.40%, 98.85%로 대조구에 비해 높게 나타났다. 발아율과 뿌리 신장률을 이용한 발아지수의 경우 대조구가 23.49, 시험구 b가 68.50, 시험구 c가 51.81로 나타났다. 종자발아율로 평가하는 완숙퇴비의 기준은 발아지수 70이상이다. 본 연구의 경우 발효시 공기를 공급한 시험구에서 후숙 전 단계의 발아지수가 완숙퇴비 기준에 근접하는 것으로 나타났다. 발아지수로 평가한 퇴비 부숙도의 경우 대조구에 비해 시험구가 220~291% 높게 나타나 퇴비 발효시 공기를 공급하면 단순퇴적식 퇴비화에 비해 퇴비화 기간을 크게 단축할 수 있을 것으로 판단되었다. 종자 발아지수와 EC와의 관계를 분석한 결과 피어슨상관계수가 -0.98로 높은 부의 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

3.9. 퇴비단 약취분석

Table 3은 퇴비단 조성 직 후 채취한 샘플과 퇴비화 시작 후 4주차에 채취한 샘플의 약취를 분석한 것

이다. 퇴비단 조성 직 후 암모니아 가스 농도는 대조구 0.24 ppm, 시험구 b가 4.07 ppm, 시험구 c가 3.61 ppm으로 나타났으며, 발효후 농도는 대조구 248.30 ppm, 시험구 b가 163.00 ppm, 시험구 c가 1.70 ppm으로 나타났다. 퇴비단 조성 직 후 암모니아 가스 농도가 이처럼 낮게 나타난 것은 본격적인 발효가 시작되지 않았기 때문인 것으로 판단되었다. 황화수소 가스의 경우 대조구, 시험구 b와 c에서 각각 634 ppb, 68.2 ppb, 73.0 ppb로 나타났다. 황화수소 가스의 경우 대조구와 시험구의 농도가 크게 나타난 것은 시험구에서 공기 송풍에 의해 공급사이에 있던 가스가 대기 중으로 확산되었기 때문으로 판단되었다. 발효후 4주차에 분석한 황화수소 가스 농도는 시험구와 대조구에서 모두 0.04 ppb로 매우 낮게 나타났다. 또한 퇴비단 조성 직 후 축산냄새 원인물질로 평가되는 페놀, p-크레졸, 인돌, 스카톨의 경우 대조구에 비해 시험구에서 높은 것으로 나타났다. 하지만 측정 분석한 각각의 가스 성분의 경우 대조구와 시험구에서 전체적으로 어떤 뚜렷한 경향은 없는 것으로 나타났다. 퇴비단 조성 직 후와 퇴비화 과정을 거친 후 농도가 급격하게 줄어든 성분은 황화수소, 아세트산, 노르말부티르산, 이소발레르산, 페놀, p-크레졸, 스카톨로 나타났다. 따라서 이들 성분을 조합하면 퇴비

Table 3. Odor Analysis Result of Composting Process

Items	REF		b(EXP 1)		c(EXP 2)		
	Beginning	4 weeks	Beginning	4 weeks	Beginning	4 weeks	
Ammonia(ppm)	0.24	248.30	4.07	163.00	3.61	1.70	
Sulfur compounds (ppb)	Hydrogen Sulfide	634.00	0.04	68.20	0.04	73.00	0.04
	Methyl Mercaptan	51.00	36.30	6.32	29.70	49.00	0.06
	Dimethyl Sulfide	198.00	670.00	10.10	627.00	0.33	12.80
	Dimethyl Disulfide	1.34	13.10	2.36	8.03	1.71	1.75
Volatile fatty acids (ppb)	Acetic acid	72.73	0.44	42.86	5.53	43.95	5.44
	Propionic acid	164.67	793.10	355.12	357.10	222.26	18.63
	i-butyric acid	11.12	37.49	5.59	21.73	8.97	15.53
	n-butyric acid	371.13	10.87	192.38	2.01	156.73	4.38
	i-valeric acid	166.08	3.61	361.81	2.32	132.93	2.38
Volatile organic compounds (ppb)	n-valeric acid	26.92	17.91	21.32	13.54	27.49	3.04
	Phenol	30.79	10.50	63.59	1.86	58.70	1.89
	p-cresol	58.70	22.07	141.41	10.89	114.20	1.80
	Indole	1.61	1.16	5.37	1.12	3.62	1.21
	Scatole	22.59	4.48	50.82	2.21	34.30	4.40

Beginning: Immediately after composting, 4 weeks: After 4 weeks of composting.

화 여부를 판단하는 간이지표로 활용가능 할 수 있을 것으로 판단되었다.

4. 결론

본 연구에서는 교반발효기가 설치되지 않은 양돈 농가에서 퇴비화를 위해 주로 이용하는 단순퇴적식 퇴비화기술의 효율을 높이기 위한 방안을 찾고자 하였다. 기존 단순퇴적식 퇴비화 방법과 단순퇴적식 퇴비단의 하단에 송풍을 통해 공기 공급량을 달리 한 후 퇴비화 과정을 모니터링 하였다. 퇴비화 효율의 분석을 위하여 수분, 온도, pH, EC, 유기물 함량, 부숙도 및 발생 가스 등을 분석하였다.

퇴비화 과정 중 온도는 대조구의 경우 퇴비단 조성 직후부터 약 10일 정도 온도 상승 기울기가 크게 나타났으며 그 이후 4주차까지 60~65°C의 온도가 지속적으로 유지되었다. 시험구 b의 경우 퇴비단 조성 직후 온도가 급속도로 상승하여 하루 만에 최고 온도 약 75°C에 도달한 후 60°C 이상의 온도가 8일 정도 유지되다가 점차 온도가 하강하여 4주차에는

외기온도 보다 약간 높은 수준을 보였다. 시험구 c의 경우는 시험구 b와 초기온도 변화패턴이 유사하게 나타났으나 시험구 b에 비해 최고 도달 온도가 약 67°C로 약간 낮았으며, 60°C 이상 온도의 지속기간도 약 6일 정도로 시험구 b에 비해 다소 짧았다. 퇴비단의 수분함량 분석결과 시험구의 수분함량이 빠르게 낮아지는 것으로 나타났으나 대조구의 경우 큰 수분 변화가 없었다. pH의 경우 시험구에서 발효 시작 후 1주차에 8.9까지 상승하였다가 지속적으로 낮아져 3주차부터는 pH 8로 유지되었다. 대조구의 pH는 변화가 없었다. 총 질소는 시험구의 경우 퇴비화 1주차에 10,000mg/L까지 상승하였다가 낮아져 시험구 b의 경우 8,000mg/L 수준으로 유지되었고, 시험구 c의 경우는 6,000mg/L수준으로 유지되었다. 유기물의 경우 대조구에서는 초기 30%이었으며 4주차에는 35%로 나타났다. 시험구의 경우 3주차에 최솟값을 기록하였다가 4주차에는 2주차 수준으로 낮아졌다. EC의 경우 초기 약 40mS/cm에서 대조구의 경우 52mS/cm까지 상승하였으며, 시험구 b와 c의 경우 22mS/cm까지 낮아졌다가 32~36mS/cm의 값을 보였다. 종자발아법을 이용한 부숙도 분석 결과 발아지

수가 대조구의 경우 23.49, 시험구 b가 68.50, 시험구 c가 51.81로 나타났다. 발아지수로 평가한 퇴비 부속도의 경우 대조구에 비해 시험구가 220~291% 높게 나타나 퇴비 발효시 적정량의 공기를 공급하면 단순퇴적식 퇴비화에 비해 퇴비화 기간을 크게 단축할 수 있을 것으로 판단되었다. 퇴비단 조성 직후와 퇴비화 과정을 거친 후 농도가 급격하게 줄어든 성분은 황화수소, 아세트산, 노르말부티르산, 이소발레르산, 페놀, p-크레졸, 스키타롤로 나타났다. 따라서 이들 성분을 조합하면 퇴비화 여부를 판단하는 간이지표로 활용가능 할 수 있을 것으로 판단되었다. 또한 양돈분뇨의 퇴비화 촉진을 위해서는 양돈분뇨를 퇴비화 할 때 단순퇴적식 퇴비화에 비해 퇴비단에 공기를 공급해 주면 발효초기에 미생물의 활성에 의한 빠른 온도상승으로 유기물의 분해가 촉진되기 때문에 퇴비화 기간을 크게 단축할 수 있으며 악취도 크게 줄일 수 있을 것으로 판단되었다. 퇴비단의 공기공급량은 돈분 1㎡당 100L/min이 적합할 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 연구개발 사업(세부과제번호: PJ012685012019)의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

References

1. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), Statistics of Agricultural Products. (2017 · 2018).
2. Sohn, B. K., Hong, J. H. and Park, K. J., "Comparative studies on static windrow and aerated static pile composting of the mixture of cattle manure and rice hulls 1. Variation of physion chemical parameters", J. Korean Soc. Soil Sci. Fert., 29(4), pp. 403~410. (1996).
3. Hong, J. H., "Quality criteria of manure compost and composting odor control", J. Livws. Hous. Env., 9(1), pp. 57~60. (2003).
4. Jeong, K. H., Kang, H., Kim, T. I., Park, C.H. and Yang, C. B., "Effect of aeration on the physicochemical characteristics of livestock feces compost during composting period", J. of KOWREC, 11(4), pp. 57~65. (2003).
5. Kim S. K., Ok, Y. S., Yoon, Y. M., Kim, D. Y., Lim, S. K., Eom, K. C. and Kim, J. G., "Physical and chemical quality of organic by product fertilizers by composting of livestock manure in Korea", Korean J. Soil Sci. Fert., 39(4), pp. 224~229. (2006).
6. Kim, K. Y., Choi, H. L., Ko, H. J. and Kim, C. N., "Estimation of ammonia emission during composting livestock manure based on the degree of compost maturity", J. Anim. Sci. & Technol, 48(1), pp. 123~130. (2006).
7. Kim, Y. S., Lee, T. S., Cho, S. H., Jeong, J. Y., An, J. Y., Lee, J. J., Han, K. P. and Hong, J. H., "Plant growth responses and characteristics of composting of poultry manure with peatmoss and cocopeat as bulking agent", Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association, 25(1), pp. 79~86. (2017).
8. Jeong, K. H., Kim, J. K., Khan, M. A., Han, D. W. and Kwag, J. H., "A study on the characteristics of livestock manure treatment facilities in Korea", J. of the Korean Organic Resources Recycling Association, 22(4), pp. 28~44. (2014).
9. Atalia, K. R., Buha, D. M., Bhavsar, K. A. and Shah, N. K., "A review on composting of municipal solid waste", IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology, 9(5), pp. 20~29. (2015).
10. Kulcu, R. and Yaldiz, O., "Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes", Bioresource Technology, 93, pp. 49~57. (2004).
11. Liu, Z., Powers, W. and Mukhtar, S., "A review of practices and technologies for odor control in

- swine production facilities”, *Applied Engineering in Agriculture*, 30(3), pp. 477~492. (2014).
12. Manu, M. K., Kumar, R. and Garg, A., “Performance assessment of improved composting system for food waste with varying aeration and use of microbial inoculum”, *Bioresource Technology*, 234, pp. 167~177. (2017).
 13. Tuomela, M., Vikman, M., Hatakka, A. and Itavaara, M., “Biodegradation of lignin in a compost environment: a review”, *Bioresource Technology*, 72, pp. 169~183. (2000).
 14. Garg, A. and Tothill, I. E., “A review of solid waste composting process -The UK perspective”, *Dynamic Soil, Dynamic Plant*, pp. 57~63. (2009).
 15. Dorota, K., “Kinetics of organic matter removal and humification progress during sewage sludge composting”, *Waste management*, 49, pp. 196~203. (2016).
 16. Yun, H. B., Lee, Y. J., Kim, M. S., Lee, S. M., Lee, Y. and Lee, Y. B., “Composting of pig manure affected by mixed ratio of sawdust and rice hull”, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 45(6), pp. 1032~1036. (2012).
 17. Yang, I. S., Ji, M. K. and Jeon, B. H., “A review on efficient operation technology of compost depot”, *Clean Technol*, 23(4), pp. 345~356. (2017).
 18. Beatty, G. and Zygmunt, H., “Conversion to value-added products: Composting. Office of wastewater management”, Environment Protection Agency, US. Available online.
 19. Bustamante, M. A., Paredes, C., Marhuenda-Egea, F. C., Perez-Espinosa, A., Bernal, M. P. and Moral, R., “Co-composting of distillery wastes with animal manures: carbon and nitrogen transformation in the evaluation of compost stability”, *Chemosphere*, 72, pp. 551~557. (2008).
 20. Lo, K. V., Lau, A. K. and Liao, P. H., “Composting of separated solid swine waste”, *J. Agric. Engr. Res.*, 54, pp. 307~317. (1993).
 21. Shin, J. H., Lee, J. W., Nam, J. H., Park, S. Y. and Lee, D. H., “Bacterial community dynamics during composting of food wastes”, *The Korean J. Microbiol*, 45(2), pp. 148~154. (2009).
 22. Chang, K. W. and Yu, Y. S., “Composting of small scale static pile by addition of microorganism”, *J. Kor. Org. Resour. Recyc. Assoc.*, 11(1), pp. 49~153. (2003).
 23. Cardenas, R. R. and Wang, L. K., “Evaluation of city refuse compost maturity: A review”, *Biol. Wastes*, 27, pp. 115~142. (1989).
 24. Kumar, M., Ou, Y. L. and Lin, J. G., “Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio”, *Waste management*, pp. 602~609. (2010).
 25. Lee, Y. S., Choi, H. K., Kim, J. K., Lee, Y. H., Chung, K. T., Roh, J. S. and Suh, M. G., “Optimum mixing ratio of sewage sludge during composting of food wastes”, *J. Kor. Envir. Health*, 30(5), pp. 366~373. (2004).