

## 퇴비사의 효율적인 운영기술에 대한 고찰

양일승<sup>1</sup>, 지민규<sup>2</sup>, 전병훈<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>한양대학교

서울특별시 성동구 왕십리로 222

<sup>2</sup>한국환경정책·평가연구원

세종특별자치시 시청대로 370

(2017년 9월 7일 접수; 2017년 9월 22일 수정본 접수; 2017년 9월 23일 채택)

## A Review on Efficient Operation Technology of Compost Depot

Il-Seung Yang<sup>1</sup>, Min-Kyu Ji<sup>2</sup>, and Byong-Hun Jeon<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Hanyang University

222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, 04763, Republic of Korea

<sup>2</sup>Korea Environment Institute

370 Sicheong-daero, Sejong, 30147, Republic of Korea

(Received for review September 7, 2017; Revision received September 22, 2017; Accepted September 23, 2017)

### 요 약

퇴비화 과정은 유기물질을 비료와 같은 유용한 자원으로 전환하는 생물학적 과정이다. 퇴비화는 유기물과 환경조건(탄질율, 온도, 습도, 산소공급, pH 등)의 변화에 적응하는 미생물 군집의 연속적인 천이과정으로 이해될 수 있다. 우리나라에서의 유기성 폐기물을 처리하는 퇴비사의 악취는 도시화 가속화에 따른 신도시개발, 공장이나 주거지역들의 생활지역 근접화에 따라 악취를 발생시키는 원인이 되어 관공서에 민원이 제기되는 등 사회적인 문제가 되고 있다. 이의 저감방안으로 퇴비사에서 우점하는 미생물을 규명하고 미생물 군집의 변화를 조사, 연구하여 성장환경에 맞게 적용하는 것은 퇴비공정의 효율적인 개선과 생산된 퇴비의 품질제어, 악취저감 측면에서 매우 중요하다. 본 논문에서는 퇴비화에 있어 최적의 운영기술과 악취발생을 저감하는 방법들을 중심으로 고찰하였다. 퇴비화 공정에서 부속활동에 효과적인 올바른 미생물종의 선택과 개체수의 빠른 증가가 부속을 촉진시킨다. 이에 따른 미생물 분해활동을 통한 부속 극대화를 위한 공기량(산소), 온도, 습도 등 박테리아의 최적 성장조건을 제시하였다. 악취제거 및 수분조절기능이 있는 다공성광물을 사용했더니 악취가 현저하게 개선되어 졌다. 미생물의 성장조건을 최적화·부속환경을 개선, 부속을 촉진시켜 악취를 저감하는 최근기술들도 제시하였다.

**주제어** : 악취저감, 퇴비화, 분해미생물, 음식폐기물, 다공성광물, 퇴비사

**Abstract** : The composting is a biological process that converts organic matter into useful resources such as fertilizers. It is a continuous transition of microbial communities to adapt changes in organic matter and environmental conditions (carbonation rate, temperature, humidity, oxygen supply, pH, etc.). Most of the composting plants are located in the proximity of the residential areas. It is a general scenario where government authorities receive complaints from the local residents due to release of odor from the composting, and has become a social problem in Korea. Identification of dominant microorganisms, understanding change in microbial communities and augmentation of specific microorganism for composting is vital to enhance the efficiency of composting, quality of the compost produced, and reduction of odor. In this paper, we suggest the optimum operation conditions and methods for compost depot to reduce odor generation. The selection of the appropriate microorganisms and their rapid increase in population are effective to promote composting. The optimal growth conditions of bacteria such as aeration (oxygen), temperature, and humidity were standardized to maximize composting through microbial degradation. The use of porous minerals and moisture control has significantly improved odor removal. Recent technologies to reduce odor from the composting environment and improved composting processes are also presented.

**Keywords** : Organic waste, Composting, Microbial degradation, Odor reduction, Porous mineral, Compost depot

\* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: bhjeon@hanyang.ac.kr; Tel: +82-2-2220-2242; Fax: +82-2-2220-4042

doi: 10.7464/ksct.2017.23.4.345 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### 1. 서론

인구증가 및 도시의 가속화로 인해 전 세계에서는 매년 약 13억 톤의 고형 폐기물을 배출하고 있으며, 이는 10년 전과 비교 시 약 2배의 규모로 추정되고 있다. 전체 폐기물 중에서 유기성폐기물이 차지하는 비율은 46%로 나타나고 있으며[1] 고소득국가와 중·상위소득국가에 비해 중·저소득국가와 저소득국가의 유기성폐기물 발생증가율이 각각 241%와 275%로 각각 나타나고 있다. 주로 중·저소득 국가의 발생 증가율이 높아 개발 도상국의 체계적인 유기성 폐기물 관리 및 퇴비화 등 자원화가 중요한 과제로 떠오르고 있다(Table 1). 한 예로, 경제적인 유기성폐기물의 퇴비화가 적절히 이루어져 모종 생산을 위한 배지 등으로 재사용되거나 농작물생산 증대를 위해 유기질비료로 사용된다면 폐기물 자원의 순환으로 인한 지속 가능한 관리가 가능할 것으로 예상된다[2]. 반면, 유기성폐기물의 자원화에 있어 소득 수준이 높은 국가일수록 악취 등 환경 문제가 중요한 이슈로 나타나고 있다. 한국은 80~90년대 대량의 유기성 폐기물을 배출하고 처리하는 시설(예, 양돈농가, 퇴비사 등)들이 주거지역으로부터 일정거리 이격되어 있어 생활환경에 주는 영향이 크지 않았다. 그러나

근래에 들어서 신도시개발 등으로 인한 도시화의 확대 및 주거지역과 축산농가와 근접화로 악취유발 시설에 대한 민원이 끊임없이 발생하고 있다[3]. 환경부 등 관계기관에서는 집단화 및 대규모화 되고 있는 축산농가를 대상으로 유기성폐기물의 퇴비화로 인한 오염원 저감, 고품질의 양분자원 순환 그리고 공정시설에서의 대기오염 유발물질을 감소시키기 위한 정책 추진방향을 제시하고 있다.

특히, 축산분뇨 및 음식물쓰레기 퇴비화 시설 등에 반입되는 유기성폐기물은 유기물 및 수분함량이 높아 적절히 처리되지 않을 경우 악취 및 독성가스가 배출될 수 있으며, 이외 침출수 발생으로 인한 지하수 오염도 유발될 수 있다[4]. 관련 공공환경시설의 연구결과에서도 부지경계의 복합악취 배출 농도가 꾸준히 증가하여 환경기준치를 초과한 사례가 빈번하였고, 2011년 대비 2015년에는 그 횟수가 약 4.2배 증가하였다[5]. 한편, 퇴비화 공정에서의 부숙은 고품질 퇴비화 및 악취저감에 있어 중요한 과정으로 제시되고 있다. 부숙공정에 관여하는 최적미생물 종의 선정 및 성장조건에 적합한 인자(예, 온도, 습도, 공기량 등)의 유지관리는 종 개체수의 빠른 증가와 함께 부숙을 촉진시켜 퇴비화기간을 단축시키고 수반되는 악취영향을 감소시킬 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 퇴비화 공정에 있어 부숙과정을 최적화하기 위해 미생물의 유기물 분해활동을 촉진시키는 성장조건과 악취발생을 저감하는 방법들을 중심으로 고찰하였고 이외 다공성광물질의 적용 등 부숙 환경을 개선시키는 최근의 기술 동향들도 제시하였다.

**Table 1.** Expected change in organic waste and waste generation rates in 2025 with respect to income level [1]

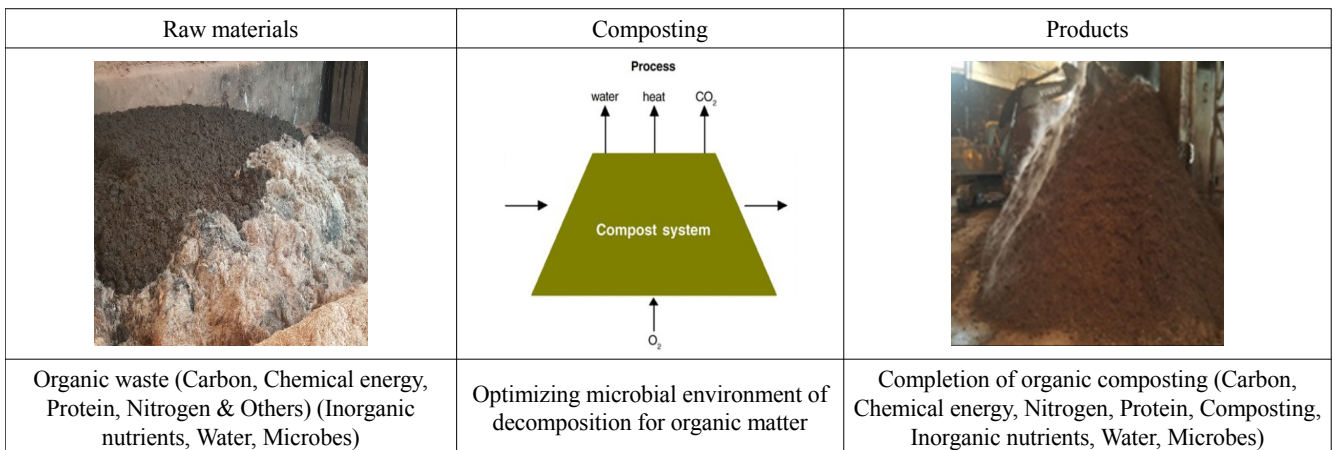
Income level	Urban population (millions)		Waste generation rates (kg capita <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	% increase in organic waste
	Current	2025		
High	Current	774	2.13	13
	2025	912	2.1	
Upper middle	Current	572	1.16	37
	2025	618	1.6	
Lower middle	Current	1,293	0.78	241
	2025	2,080	1.3	
Lower	Current	343	0.6	275
	2025	676	0.86	

### 2. 유기물과 미생물에 의한 퇴비화

#### 2.1. 퇴비화와 분해미생물의 역할

##### 2.1.1. 미생물에 의한 유기물분해

퇴비는 유기물이 미생물에 의해 분해되어 생성된 최종산물을 말하며, 퇴비화란 동·식물성 유기폐기물이 미생물 및 토양동물(지렁이 등)에 의해 분해되어 토양과 유사한 물질로 안정화되는 과정을 말한다[6]. 퇴비화의 1차 목적은 불안정하고 오염된 상태의 유기성 폐기물을 안정된 최종산물로 전환하는



**Figure 1.** Schematic diagram of composting process.

것이다. 유기성폐기물의 구성물질 중 단백질, 당, 수용성 전분 등은 분해가 잘되어 퇴비화가 원만히 진행되나, 셀룰로오스나 리그닌 등은 분해가 어려워 퇴비화에 있어 다소 많은 시간이 소요된다[7]. 퇴비화 과정의 모식도는 Figure 1에서 나타내었다[8]. 최종 분해되어 생산된 퇴비는 토양개량시 비료로 시비되며, 미생물들과 함께 양질의 토양을 구성하게 된다. 즉, 퇴비속의 세균, 방선균 및 사상균 등 다양한 종류의 미생물은 통기성, 수분, 영양원 조건 등 적합한 서식 및 생장 환경이 조성되면 다른 유기물을 분해하여 퇴비화하고, 이는 토양의 생화학적 안정성 증진, 용적 밀도의 감소, 수분함유능력 증가, 양이온 교환량 증가, 토양 미생물 군집의 개선 및 토양 해충 억제 등 토양 고유의 기능을 향상시킬 수 있다. 또한, 퇴비는 적절한 무기물과 유기질성분, pH를 보유해야 하는데, 그 성분은 Table 9와 같다[9]. 한편, 유기물은 미생물에 의해 완전히 분해되면서 이산화탄소, 열 및 물이 방출되는 과정을 거치지만 일부 미생물의 분해 작용에 저항성을 갖는 물질과 분해과정 중 신규 합성된 물질은 부식(humus)으로 잔류한다. 이와 같은 과정을 부숙화라고 하고 부숙이 완료되는 단계를 완숙이라 정의한다.

유기물이란 탄소-수소-산소(C-H-O)로 구성된 화합물로서 다양한 결합 경로에 의해 탄수화물 또는 지방산 등을 구성하기도 한다. 탄소-수소-산소 또는 탄소-수소-산소-질소(C-H-O-N)가 결합되어 큰 단위로 이루어진 탄수화물, 지방, 단백질 등의 유기물은 미생물에 의해 다시 작은 단위로 분해되며, 이러한 과정을 “부숙” 또는 “분해”라고 정의한다[10]. 퇴비화의 부숙과정 시 주요하게 관여하는 미생물로는 방선균: 액티노마이세테스(*Actinomycetes*), 방사선균: 스트렙토마이세스(*Streptomyces*), 그리고 간균: 바실러스(*Bacillus*)이 존재하며(Figure 2), 각 미생물의 형상 및 생장환경 등의 특징은 다음과 같다. 1) 방선균(액티노마이세테스)은 토양에 균사체 또는 포자체로 존재하며 가지친 균사나 막대형으로 성장한다. 발육 적정 온도는 25~38 °C로서 주로 토양 중의 유기물을 분해하고, 이 중 한 분류인 썬모액티노마이세스(*Thermoactinomyces*)는 65 °C 이상의 고온에서도 생육이 가능하며 퇴비 중의 셀룰로오스나 리그닌의 분해에 관여한다[11]. 2) 방사선균(스트렙토마

이세스)은 중온성균(최적온도: 30~45 °C)으로 단백질 분해 능력이 우수하며 각종 병원균의 발육을 억제하는 항생물질 생산한다[12,13]. 3) 간균(바실러스균)은 중온성균(최적온도: 30~45 °C)으로 대부분 존재하지만 일부 65 °C에서 생존하는 고온성류의 세균도 있다. 고분자 물질(예, 전분, 단백질, 지방 등)을 급속히 분해하는 바실러스 섭틸러스(*Bacillus subtilis*) 종의 경우는 약취제거 효과도 뛰어나다[14]. 한편, 이엠: EM (Effective Microorganism:)도 바실러스균의 한 종류로서 이엠을 구성하는 주요 균종에는 효모, 누룩균, 유산균, 광합성세균 및 방선균 등 80여 종이 존재하며 2~3일 이내에 대상오염 물질을 99% 이상 분해하는 특징을 가지고 있다[6].

2.1.2. 일반적인 퇴비공정의 물리적 가동요소와 분해 화학 반응

우리나라의 유기성폐기물 중 음식물쓰레기를 처리하는 퇴비사는 2016년 말 기준으로 약 360여 곳이 있으며 이를 지역별, 시설용량, 처리량 등으로 정리하면 Table 2와 같다. 이 중에서 충청남도 청양에 위치한 C산업은 유기성 폐기물을 반입 후 부숙시켜 퇴비를 제조하는 공장이다. C산업의 퇴비사에 유입되는 유기성폐기물들은 식물성류(예, 양배추, 사료찌꺼기) 및 동물성류(양돈폐기물 및 기타 하수슬러지 등)로서 단백질, 탄수화물, 지방 등이 적절히 혼합된 성분으로 구성되어 있다. 동 시설은 유기물 분해촉진 미생물제제를 사용함으로써 부숙기간을 단축시켜 단위시간당 더 많은 폐기물의 반입이 가능하며, 3단계로 나누어 부숙을 진행하므로 약 35~40 여일 후에 퇴비제품을 반출할 수 있다. 유기성폐기물을 부숙시키기 위하여 C산업에서 사용하는 미생물은 방사선균(스트렙토마이세스)과 이엠이라 불리는 바실러스균을 사용하고 있다. 퇴비화 공정으로 Table 3과 같이 1단계 첫째날 농축산 및 음식물 폐기물과 미생물제제 그리고 톱밥을 교반하여 5일간 공기 주입 조건하에 온도 50~70 °C 및 습도 52~86 %의 범위에서 부숙화 과정을 진행한다. 2단계로 6일째부터 20~25 일째까지 연속적으로 공기를 공급하며 15~20일간 기계식 교반하에 온도 55~60 °C 및 습도 51~84% 범위에서 부숙을 진행한다. 마지막으로 3단계에서는 25일째부터 35일째까지 2

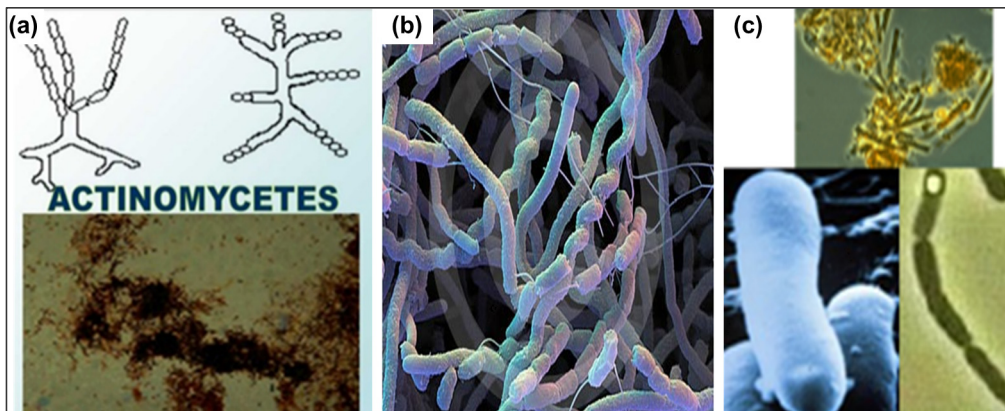


Figure 2. Composting microorganism: (a) *Actinomycetes*: [53], (b) *Streptomyces*: [54], (c) *Bacillus*: [55].

**Table 2.** Major Foodwaste compost depot in Korea [52]

Location		Name	Food waste treatment facility			Deodorization facility	
Province	District		Capacity (ton d <sup>-1</sup> )	Method	Throughput (ton d <sup>-1</sup> )	Method	Capacity
Gangwon	Gangneungsi	Agriculture Company Taekwang Feeding Inc.	80	Composting	60	Adsorption	250 m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>
Kyeonggi	Yangjusi	EPS Solution Inc.	200	Composting	32	3 Scrubbers, Bio-filter	400 m <sup>3</sup> , 600 m <sup>3</sup> , 700 m <sup>3</sup> , 400 m <sup>3</sup>
Kyeonggi	Yonginsi	Dongwoo Bio. Inc.	315	Wet feed, Composting	153		Water Scrubber 440 ton min <sup>-1</sup> *1, 600 ton min <sup>-1</sup> *3, 1000 ton min <sup>-1</sup> *6 Centrifugal Scrubber 600 ton min <sup>-1</sup> *1, 1000 ton min <sup>-1</sup> *2
Kyeongnam	Kimhaesi	Kimhaesi Food waste Compost Depot	150	Composting	126	Soil deodorization	370 ton min <sup>-1</sup>
Kyeongbuk	Youngcheonsi	Dongsan Inc.	90	Feeding and Composting	16		
Gwangju	Namgu	Sungju Environmental Inc.	150	Composting	120	Absorption	400 m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>
Daegu	Dalsung-gun	Youngnam Inc.	60	Quicklime treatment	30	Absorption	
Daejeon	Yuseong-gu	Daejeon Food waste Compost Depot	100	Composting	78	Bio-filter	450 m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>
Busan	Gangseo-gu	Samdeuk Inc.	250	Feeding	186	Water Scrubber	300 m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>
Seoul	Seodaemungu	EATech. Inc.	300	Dry Composting	300	Incineration (RTO) photolysis	5 ton h <sup>-1</sup> , 1800 m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>
Ulsan	Uljugun	Doojeon Inc.	60	Composting	15		
Incheon	Kangwhagun	Gangwha Clean Inc.	95	Composting	64	Water Scrubber	Water Scrubber (500 m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> , 1300 m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> )
Chonnam	Danyanggun	Cheongrok Bio Inc.	95	Composting	50	Deodorization Tower	800
Chonbuk	Jeonjusi	Daewon Inc.	300	Dry Composting	271	Dust Scrubber	350 m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>
Jeju	Jejusi	Jeju Food waste Compost Depot	60	Composting	81	Water Scrubber, Bio-filter	301 m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>
Chungnam	Gongjusi	Daechung Environmental Inc.	120	Composting (Using cocobit)	34	Sealing	
Chungbuk	Chungjusi	Chungju Composting Inc.	170	Composting	177	Bio-filter	380, 350, 250 m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>

단계와 동일한 조건하에서 온도 50~65 °C 및 습도 55~61 % 범위를 유지하면서 퇴비화 공정을 완료한다. 운영공정을 분석한 결과, 1단계와 2단계에서는 모두 온도와 습도면에서 정상치를 다소 벗어나는 경향을 보였지만 3단계에서 다소 안정화되는 현상을 보였다. 이러한 퇴비사의 운영현황은 기존의

연구들과 유사한 경향을 보이고 있다[15]. 한편, Table 3과 같이 물리적인(예, 공기주입, 수분함량 등) 운영요소들을 조절하여 공정을 운영하고 있지만 다른 사례와 유사하게 암모니아 및 황화수소 등의 악취물질로 인한 민원문제가 제기되고 있다[16].

**Table 3.** Compost operation conditions in Chungsim Corporation Inc. Chungyang, S. Korea

Division	Work content (Materials)	Elapsed days (Retention time)	Air supply (24 hours)	Remarks
1 Stage	Stirring after loading (Organic waste + Saw dust + Microbs)	5th day(5)	25HP × 2 30HP × 1	New& Old loading, Mix, Operation Distance : 30 m
2 Stage	Stirring, Fermentation, Composting, Air supply(Blower), Conveyer	20~25 days (15~20)	15HP × 3 20HP × 3	Moving forward: 3 m day <sup>-1</sup> Operation Distance : 40 m
3 Stage	Add sludge, Drying	25~35 days (5~10)	15HP × 4 10HP × 1	Moving forward: 3 m day <sup>-1</sup> Operation Distance : 20 m
Shipment	Ship finished product	36~37 days (1~2)		Water content : 35%

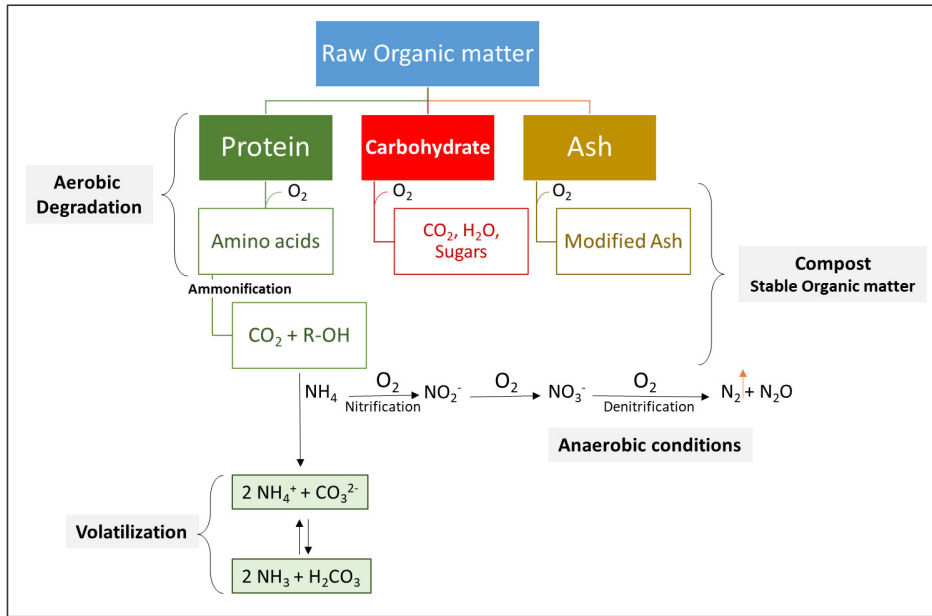


Figure 3. Biochemical reactions of composting.

퇴비화과정 중 단백질과 지방 및 탄수화물의 분해화학반응 과정에는 매우 복잡한 생화학반응이 발생하는 것으로 알려져 있으며, 이 중 주요한 물질의 반응을 도식화하면 Figure 3과 같다. 단백질의 분해는 균류가 생산하는 가수분해효소에 의해 일어나고 이는 아미노산으로 전환된다. 아미노산은 탈아미노반응에 의해서 저급지방산이나 암모니아로 그리고 탈카르복시반응에 의해서 아민으로 생성된다[17]. 지방의 분해는 불완전하게 분해되어 저급지방산으로 전환되며 고온성 범위에서 보다 중온성 범위에서 더 활발한 분해율을 보인다[18]. 탄수화물(당)은 발효하여 에탄올(에틸알코올)이나 부탄올 등의 알코올류 외에 아세트산·부티르산·프로피온산 등의 저급지방산, 아세트인이나 디아세틸 등의 저분자 케톤류를 생성한다[19]. 균류에 의한 분해는 생체에 이용된 복잡한 유기질소 화합

물을 간단한 유기질소 화합물이나 무기질소 화합물로 변화시켜 생물이 질소를 순환 및 이용할 수 있도록 하는 역할을 한다[20]. 또한, 분해화학반응에서는 이산화탄소·수소·메탄 등의 가스도 발생하며 이들 물질의 대부분은 악취를 유발한다.

## 2.2. 퇴비화의 주요인자

### 2.2.1. 우점미생물변화에 따른 온도 변화, 탄질율, pH

퇴비화는 호기성 미생물에 의해 발생하는 자체 발열과 부숙과정 시 중온성(Mesophilic) 및 고온성(Thermophilic)균의 활성화 온도를 60 °C 기준으로 나누며 온도상승 단계(1단계; 중저온단계, 1~6일(2~55 °C)), 초고온 단계(2단계; 고온단계, 7~43일(55~97 °C)), 안정화 단계(3단계; 온도감소 및 안정화 단계, 44~56일(50~89 °C))의 3단계로 구분된다(Figure 4).

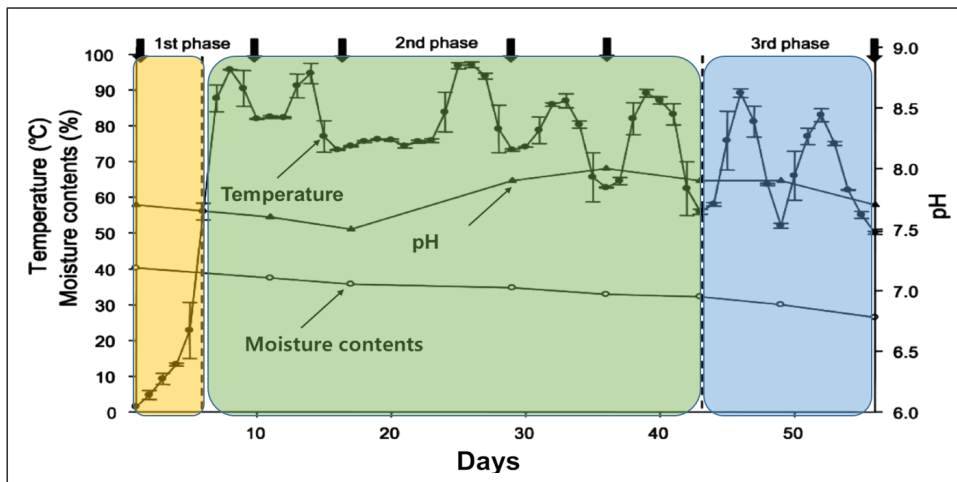


Figure 4. Variation of physicochemical parameters in the composting process. The arrow indicates sampling days [15].

음식물쓰레기 퇴비화 공장에서 음식물을 60일 동안 퇴비화시켜 균류 균집의 변화를 조사한 결과, 총 균류수에 대한 고온 미생물의 비율이 초기 33%에서 2단계 중 최대 89%로 증가하였다. 퇴비화 과정 중의 온도상승은 미생물에 의한 유기물의 분해로 기인되며, 이때 각 단계에서 우점하는 미생물 종을 규명하고 균집의 변화를 조사하는 것은 퇴비공정의 효율적인 개선과 생산된 퇴비품질 제어의 측면에서 매우 중요하다고 보고되어 진다[15]. 또한, 주성분이 단백질인 유기성폐기물의 분해효율은 미생물의 종류에 따라 다르게 나타나므로[21], 프로티아제(Protease), 아밀라제(Amylase) 및 셀룰라제(Cellulase) 등의 효소분비 미생물을 사용하여 퇴비화 과정을 개선시키는 방법을 권장하고 있다[22]. 그 예로서 관련미생물은 세포 외부에 존재하는 고분자성의 단백질을 세포 내로 흡수하기 위하여 프로티아제를 분비하여 저분자 아미노산으로 분해한다[23].

퇴비화 과정 중의 온도는 일반적으로 40 °C 이하의 중온대와 40 °C 이상의 고온대로 구분되며 유기물 분해에 가장 효율적인 온도범위는 30~40 °C로 알려져 있다[24]. 한편, 65 °C 이상 고온대에서는 미생물의 활성이 낮아져 퇴비화를 지연시키는 요인이 되기도 하지만, 병원균 등의 사멸을 위해서는 반드시 필요하므로 통기량 조절로 과도한 온도상승을 관리할 필요가 있다[8]. 겨울철의 경우는 낮은 외부 온도의 영향으로 퇴비 온도가 저하되어 퇴비화 진행속도가 늦어지므로 고온의 열공급 등을 통한 관리가 필요하다[25]. 일반적으로 퇴비화는 앞서 언급한 3단계 과정을 거치며, 최근에 사용되고 있는 기계식 퇴비화 장치들도 동일 과정을 전제로 설계되어 있다. 퇴비화 과정 중 탄소는 미생물 성장을 위한 에너지생성 및 탄소 골격물질의 합성에 사용되고 질소는 단백질 합성에 쓰인다. 탄질율(Carbon-nitrogen ratio, C/N비율)은 분해대상 유기성 폐기물 종류에 따라 상이할 수 있으며, 일반적으로 퇴비의 원료에 있어서 가장 적합한 비율은 약 30~50범위로 알려져 있다 (Figure 5) [26]. 탄질율이 높은 원료는 질소원의 부족으로 미생물 증식이 제한되어 분해율이 낮고, 반면 탄질율이 낮은 원료는 유기물이 양호하게 분해되지만 암모니아가 대량으로 발생하여 비료 성분으로서 질소의 손실이 일어난다. 퇴비화 과정 중의 유기물 분해는 중성 혹은 약알칼리성 pH범위에서 활성이 가장 높은 것으로 알려져 있다. 초기에 투입되어진 원료 중에 포함된 전분질 및 각종 산, 단백질에 유래되는 탄소는

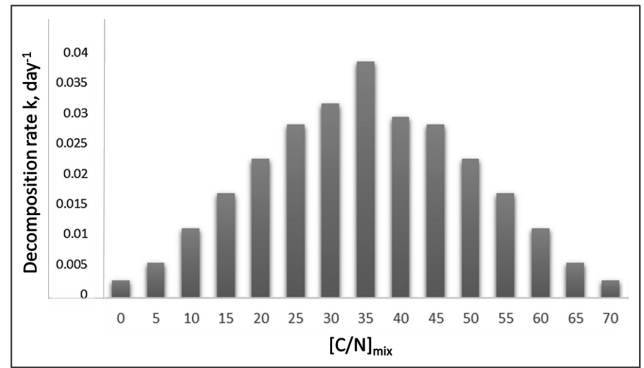


Figure 5. Decomposition rate as a function of C/N ratio [43]

분해과정을 통해 공기 중의 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)로 전환되고, 질소원은 일부 탈질과정 중 암모니아로 전환되어 이때 pH는 8보다 약간 높은 값으로 유지된다[27].

### 2.2.2. 수분함량(습도), 산소 및 통기성

퇴비더미의 수분함량은 퇴비화 속도(시간)를 결정하는 필수적 요소로써, 적정 수분함량은 50~65% 범위로 나타난다. 수분함량이 40% 미만인 경우는 분해속도가 저하되지만 65% 이상에서는 호기성 미생물의 활성이 억제되어 퇴비화가 지연되고 혐기상태로 유지되어 악취유발의 원인이 된다[28,29]. 한편, 수분함량이 40% 이하로 낮아져 추가 수분공급이 이루어질 경우 퇴비더미 상·하부의 수분함량 불균형으로 인한 퇴비화 문제가 발생하므로 일반적으로 습도를 유지하기 위해 톱밥, 왕겨, 볏짚 및 파쇄목재 등 수분조절제가 사용되고 있다[30]. 퇴비더미의 원활한 습도유지를 위해 다양한 연구들이 진행되어 왔으며, 그 예로 가축분뇨의 퇴비화 시 톱밥 사용량의 30%를 석탄회로 대체하여 활용[30] 하거나, 톱밥과 유사한 특성을 가지고 있는 피스모트와 코코피트 등의 적용이 보고되고 있다[31]. 최근에는 퇴비더미의 수분조절제로서 제올라이트 등 다세공질의 광물질을 적용한 사례가 있다[32]. 다세공질 광물 적용의 경우, 광물 구조상 극대화된 공극률을 가지고 있어 기체나 액체상태로 수분을 흡수하며[33], 주변습도가 낮으면 습기를 방출하고 주변습도가 높으면 흡수하는 등 일정한 습도조절을 통한 미생물의 분해활성화를 촉진시킨다[34] (Figure 6).

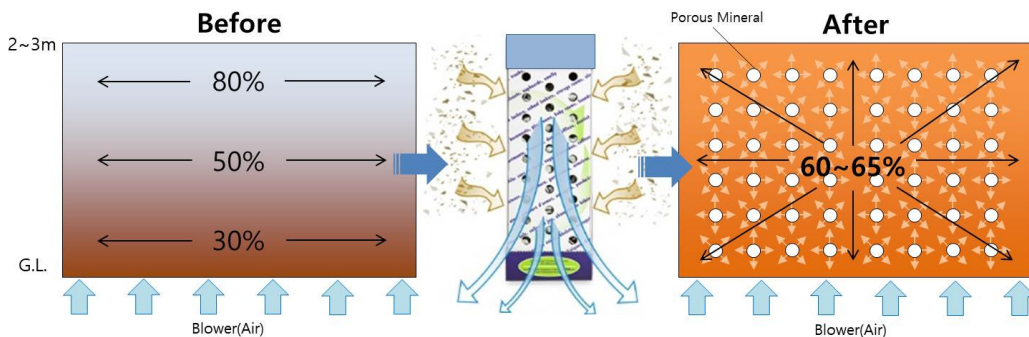
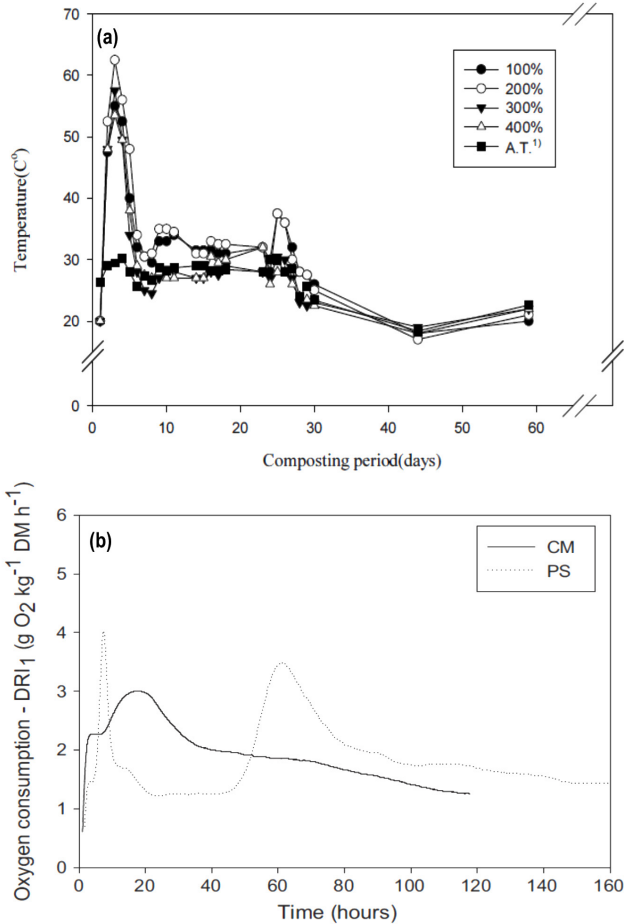
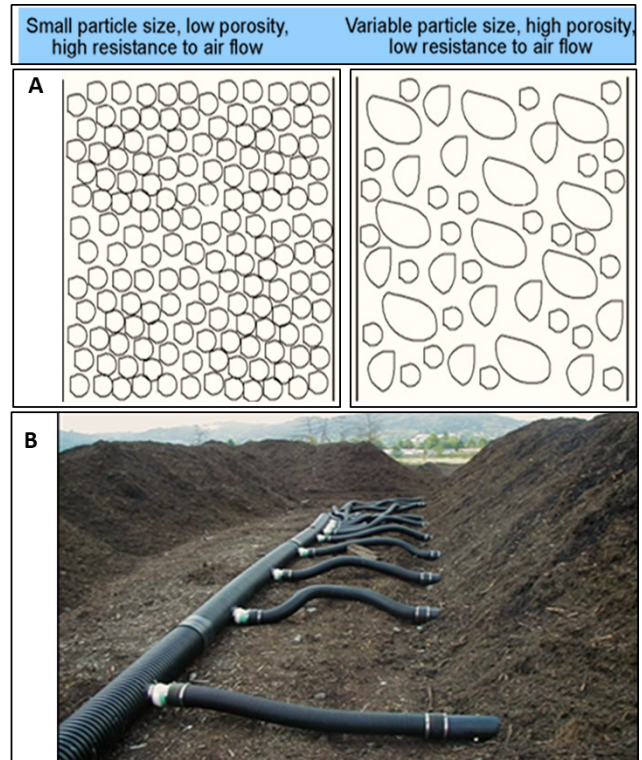


Figure 6. Humidity regulation diagram by mineral in compost.



**Figure 7.** Variations of temperature during swine manure composting period (a) and comparison of different oxygen consumption profiles of cow manure (CM) and pig sludge (PS) (b) [7,35].

퇴비화는 주로 유기물의 호기적 산화분해과정에 의해 진행되므로 산소의 존재가 필수적이다. 퇴비화 시 적정 공기 공급량은 ‘가축분뇨자원화시설 표준설계도 해설서’(환경부, 2009)를 근거하여 약  $2 \text{ L min}^{-1} \text{ m}^{-3}$ 로 설정되어 있다. 최근 설정된 공기 공급량 대비 100%, 200%, 300% 및 400% 수준으로 처리구를 설정하여 실험을 진행한 결과, 공기주입량을 증가시킬수록 수분감소량이 25.9%에서 52.3%로 증가하는 경향을 보였다. 공기공급량은 수분감소율, 유기물질의 함량, C/N 비율 등 종합적인 퇴비화 조건으로 볼 때 100~200% 즉, 퇴비의 체적 25L당  $2 \sim 4 \text{ L min}^{-1} \text{ m}^{-3}$ 의 공급 조건이 적절하다고 보고되어진다(Figure 7(a)) [27]. 축산폐기물을 이용한 연구사례의 경우 산소 소모량이 초기 20여 시간 만에 최대치로 측정되고, 100시간 이후 1/2, 120시간 이후에는 1/3까지 감소하였다. 그리고 산소 소모량이 일정 임계치까지 상승한 이후부터는 부속도에 미치는 영향이 낮은 것으로 나타나고 있다. 따라서, 퇴비화 초기(시작 후 30시간)에는 공기공급량을 최대로 적용한 후 일정시간 이후부터는 감소하는 방법을 차등 적용하여 효율적인 퇴비화와 함께 에너지 절감을 유도할 수 있다(Figure 7(b)) [35]. 한편, 통기성은 입자의 물리적 성질에 영향



**Figure 8.** Porosity and airflow resistance by particle size (a), Air supply (b).

을 받으므로 입자가 작고 수분함량이 높은 재료는 수분조절제(예, 톱밥 등)를 사용하여 통기성을 양호하게 해주어야 하며, 공극률이 극대화된 다공성광물질을 사용하여 통기성을 극대화 할 수 있는 방안도 고려할 수 있다(Figure 8).

### 3. 퇴비화 과정 중의 악취 및 효율적인 퇴비사운영

#### 3.1. 악취유발물질 및 악취제거기술

퇴비사에서 유발될 수 있는 악취물질은 암모니아(NH<sub>3</sub>)와 휘발성아민, 휘발성 황화합물 및 휘발성 저급지방산 등의 그룹으로 구분할 수 있다(Table 4). 아미노산은 탈 아미노화 과정에서 푸트레신(putrescine), 카다베린(cadaverine) 및 암모니아를 생성하는 것으로 알려져 있다. 대표적인 유해가스이자 악취물질 중 하나인 암모니아는 수용성이 높고 자극성이 있는 유독성 가스이다. 동 물질은 주로 분뇨의 분해 과정 중에 발생하고 고온에서의 발생 배출량이 높다. 휘발성 아민에는 푸트레신, 카다베린, 메틸아민(methylamine), ethylamine(에틸아민) 등이 존재하며, 황화합물로는 설파이드(sulfide)와, 에틸(ethyl-), 메틸-메르캡탄(methyl-mercaptans) 등이 있다. 황화합물이 세균에 의해 발생하는 기작은 두가지 경로로써, 황산염의 환원과정 및 황을 함유한 아미노산의 대사과정에서 생성된다. 황산염의 환원은 동화작용과 이화작용에서 모두 일어나는데, 그 중 동화작용에서는 세포의 생합성을 위해 충분한 양의 환원형 황을 생성한다. 반면에 이화작용에선 황산염을 최종전자수용체로 이용하여 대량의 sulfide를 생성한다[36]. 그

**Table 4.** Chemical compounds present in compost [36]

Odor group	Compound	Abbreviation	Chemical formula	OTV <sup>a)</sup> (ppb)	MDL <sup>b)</sup> (ppb)	Repeatability (RSD <sup>c)</sup> , (%)
VOCs	Styrene	Sty	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH=CH <sub>2</sub>	30	4.1E-02	2.56
	Toluene	Tol	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	900	5.2E-02	1.05
	Xylene m,p-Xylene	m,p-Xyl	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> C <sub>6</sub> H <sub>4</sub>	41/58 <sup>d)</sup>	7.5E-02	2.55
	o-Xylene	o-Xyl	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> C <sub>6</sub> H <sub>4</sub>	380	8.7E-02	1.87
	Methyl ethyl ketone	MEK	CH <sub>3</sub> COC <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	440	2.0E-02	4.35
	Methyl isobutyl ketone	MIBK	CH <sub>3</sub> COCH <sub>2</sub> CH (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	200	8.2E-02	4.17
	Butyl acetate	BuAc	CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	8	7.8E-02	4.61
	Isobutyl alcohol	i-BuAl	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CHCH <sub>2</sub> OH	10	4.0E-02	3.87
RSC	Hydrogen sulfide	H <sub>2</sub> S	H <sub>2</sub> S	0.5	2.7E-03	3.82
	Methyl mercaptan	CH <sub>3</sub> SH	CH <sub>3</sub> SH	0.1	2.6E-03	5.11
	Dimethyl sulfide	DMS	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> S	0.1	3.2E-03	3.27
	Dimethyl disulfide	DMDS	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	0.3	2.6E-03	4.75
Nitrogenous	Ammonia	NH <sub>3</sub>	NH <sub>3</sub>	100	5.2	3.70
	Trimethylamine	TMA	(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N	0.1	9.0E-02	3.51
Aldehyde compounds	Acetaldehyde	AA	CH <sub>3</sub> CHO	2	0.52	0.78
	Propionaldehyde	PA	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CHO	2	0.34	1.95
	Butyraldehyde	BA	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CHO	0.3	0.55	2.24
	Isovaleraldehyde	IVA	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CHCH <sub>2</sub> CHO	0.7	0.63	3.02
	Valeraldehyde	VA	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> CHO	0.2	0.51	4.05

RSC=Reduced Sulfur Compounds, VOCs=Volatile organic Compounds, <sup>a)</sup>OTV=Odor threshold value: Refer to KMOE (2007)

<sup>b)</sup>MDL= method detection limit, <sup>c)</sup>RSD= Relative Standard Deviation, <sup>d)</sup>m-xylene=41 ppb, p-xylene=58 ppb

중 황화수소(H<sub>2</sub>S)는 유독성가스로 공기보다 무거워 퇴비사의 표면과 그 주변에 확산되어 있어 거주자의 인체에 영향을 미칠 수 있다(Table 5). 휘발성 저급 지방산(Volatile fatty acids, VFAs)은 아세트산, 프로피온산, 부티르산, iso-부티르산, 발레르산, iso-발레르산, 카프로익산 등을 포함하며, 단백질 및 탄수화물의 분해과정에서 발생된다. 그 외 돈사 내 주요 가스상 오염물질인 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>) 및 아산화질소(N<sub>2</sub>O)는 발생량이 상대적으로 경미하여 영향이 낮은 것으로 보고되고 있다[37].

현재 상용화된 악취처리기술 중 물리적 방법으로는 흡착

법, 연소법, 공기 희석법 및 수세법 등이 존재하고 화학적기술로는 마스크 처리, 약액처리 등이 있다. 이외 미생물 처리법, 바이오 필터법, 일반 세정법 등이 존재하고, 개별 처리방법들은 다음과 같은 장·단점을 가지고 있다. 화학적 약액처리법은 수용성 악취물질 처리에 적합하고 설치비가 저렴하며 분진 처리가 가능하다는 장점을 갖지만, 순화수의 교체 주기에 따라 효율이 결정되며 처리수 비용이 발생하고 비수용성의 악취물질 처리가 어렵다는 단점이 있다. 흡착법의 경우, 대부분의 악취 물질 처리가 가능하고 흡착제의 교체 주기에 따라 효율이 결정되지만 활성탄 교체 비용이 발생하고 고농도의 악취물질 처리시 과도한 비용이 발생하는 문제점이 있다. 현장

**Table 5.** Features appeared in swine and humans after exposure to hydrogen sulfide [38]

Concentration (ppmv)	Features
<b>Swine</b>	
50	- Increased susceptibility to pneumonia and other respiratory problems
100	- Loss of appetite, sneezing nervousness
> 300	- Mouth and snout irritation, hardness of breath
<b>Human</b>	
5-20	- Red, upper respiratory irritation
100	- Continual irritation to eyes, respiratory tract and mucosa surfaces
500	- Eyes, upper respiratory irritation
5,000	- Rapid breathing, respiratory spasms, and suffocation
> 10,000	- Rapid death

ppmv= part per million per volume

**Table 6.** Odor control technologies [37]

Description	System
Odor control technologies for buildings	- Biofilters, Biological and chemical wet scrubbers, Diet manipulation, Fat added to feed, Manure additives, More frequent manure removal - Nonthermal plasma, Oil sprinkling, Ozone, Shelterbelts, Windbreak walls
Odor control technologies for manure storages	- Aerobic treatment, Anaerobic digestion, Floating clay balls, Geotextile cover, Manure additives, Natural crust, Solid cover
Odor control options for land application of manure	- Manure incorporation or injection, Chemical addition, Odor Control Options for Other Odor Sources, Mortality composting, Solid composting, Solid separation, Solid separation



적용 시 저감 방법의 중요 요소는 악취성분, 농도 등 대상물질의 특성에 따른 효율성 및 촉매, 미디어의 가격 등 경제적인 부분이다. 악취처리 현장에서는 악취 포집 시 오염된 필터의 처리 및 암모니아가스의 세정탑 용해에 따른 오염수 발생 등 2차적 오염문제와 물리·화학적 및 생물학적 방법 적용 시에 각각 높은 동력비, 약품비, 이상배양(미생물의 오염, 사멸 등)으로 인한 운전의 어려움이 나타나고 있다. 이와 같은 악취저감 기술들을 개괄하여 보면 Table 6과 같다. 최근에는 퇴비사에서 발생하는 암모니아 및 황화수소 등의 악취가스를 공조기를 통해 포집하여 에어버블필터나 바이오필터를 통해 물리적, 생물학적으로 흡착하는 방법들이 보고되고 있다. 바이오필터의 충전 기반물질로는 톱밥, 목피, 목재칩, 활성탄, 다공성광물질과 규조토 등 여러물질이 존재하며, 기반물질 대비 제거 가능한 악취물질의 종류는 Table 7에 나타내었다[38].

**Table 7.** Bed (carrier) materials used in biofilters and odor control [38]

Bed material	Contaminant
Pig manure + sawdust	Hydrogen sulfide
Peat (raw, fibrous or granular)	Dimethyl disulfide
Peat + granular activated carbon (GAC)	Dimethyl sulfide
Wood-based media	Ammonia, Methanethiol, Hydrogen sulfide, Dimethyl sulfide
Wood chips	Ammonia, Hydrogen sulfide, Odors from swine farm
Wood bark + compost	Hydrogen sulfide, Dimethyl disulfide, Ethanethiol
Wood bark	Ammonia
Wood chips + GAC	Hydrogen sulfide, Ammonia
Compost + activated carbon	Ammonia
Compost + wood shavings	Terpene odors
Compost + wood chips	Methanol
Compost + peat, compost pellets	Ethyl acetate
Coir pith (coco peat) Compost	Toluene Toluene Ammonia
Activated carbon, exhausted	Dimethyl disulfide
Activated carbon, granulated	Hydrogen sulfide
Diatomaceous earth Lava rock (scoria) + compost	Methanol, n-hexane Ethanol Xylene
Perlite	Ammonia, Acetone, n-Butanol
Polyurethane foam	Solvent vapor Acetone, n-Butanol, Ammonia
Porous silica packing	Hydrogen sulfide
Sludge, granulated	Hydrogen sulfide, Ammonia
TDRP <sup>a)</sup>	Hydrogen sulfide
UP20 <sup>b)</sup>	Hydrogen sulfide
UP20 + fibrous peat	

<sup>a)</sup>Tire-derived rubber particles

<sup>b)</sup>Mixture of CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, CaCO<sub>3</sub> and organic binder (upto 20%)

### 3.2. 악취저감실증기술과 퇴비사운영의 최적화조건

악취저감을 위한 대표적인 상용화기술 사례로는 1) 2001년 큐바이오텍(주)에서 미생물을 응용한 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOC) 저장시설 전용 바이오필터(Quick Bio Filter, QBF)기술개발, 2) (주)IUT환경의 이동 및 설치가 간단하여 국내 협소한 부지에 적용이 적합한 컨테이너식 바이오필터 기술개발, 3) 환경시설관리공단이 보유하고 있는 소나무껍질 기반 담체로 모듈된 바이오필터(Biofilter) 기술개발 및 4) 조이엔텍(주)의 악취물질 및 휘발성유기화합물제거를 위해 생물막을 통한 무취화 기술 등이 있다[39]. 이외, 이온발생장치를 통해 악취를 전기화학적으로 중화시키는 이온중화기술과 다공성 금속실리카 담지 활성탄을 적용한 복합담체장치도 있다. 이 장치는 음식물쓰레기와 가축분뇨 혼합처리장에서 발생하는 메탄가스 회수시설의 정제과정 시 발생하는 잔류 황화수소와 암모니아를 제거하는 목적으로 개발되었다[40]. 또한 분말활성탄과 제올라이트가 담지된 폴리우레탄 담체를 파일럿 규모의 바이오필터에 적용하여 암모니아와 황화수소의 처리효율을 평가하였고, 그 결과 대상물질 모두 100%에 가까운 악취 제거율을 보여주었다[41]. 가금류 퇴비의 악취제거를 위해 신규 개발된 미생물 제제와 펄라이트 등을 혼합하여 흡착제를 활용한 연구결과에서는 투입 후 반응 2일만에 암모니아 및 황화수소 농도가 각각 94% 및 60% 감소되는 결과도 보고되었다[42]. 추가적으로 알루미늄 실리케이트(silicate) 계열의 광물(예, 질석, 벤토나이트(bentonite) 등)들은 인체에 유해한 휘발성 화합물(예, 다이클로로벤젠(Dichlorobenzene (C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub>)), 페놀(Phenol) 등 24종)을 흡착하는 효과가 있으며, 암모니아와 황화수소가스 대상물질의 경우 반응시간 2~3일 이내에 40.7-94%와 64-95.4%씩 각각 감소시킨 것으로 보고되었다[32]. 악취제거와 관련된 특허 기술로는 펄스코로나 방전 기술, 미생물 생균제 또는 자연물과 향신료(박하 등)를 이용하는 기술, 담체를 바이오필터로 사용하는 기술까지 다양하게 존재하는 것으로 파악되었다(Table 8).

퇴비사의 운영효율을 높이기 위해서는 대상 유기성폐기물 성분의 분해에 최적화된 미생물 종을 적용해야 한다. 부숙 과정 시 주요하게 관여하는 미생물들은 방선균(액티노마이세테스), 방사선균(스트렙토마이세스) 그리고 간균(바실러스균)종으로 미생물제제를 반입 직후 톱밥과 함께 적절히 교반하여 각 퇴비화 단계별로 적용되는 물리·화학적 환경조건(탄질율, 온도, 습도, 산소공급, pH 등)을 최적화하고 미생물 군집이 잘 적응하도록 해야한다. 탄질율은 1:30~50범위로 조성하는 것이 필요하며, 미생물의 활성도를 위한 최적온도는 30~40℃로 65℃의 고온에서는 공기주입을 통해 온도를 조절해야 한다[26]. 또한, 분해미생물은 초기(1~3일째)에 최대산소량이 필요로 하므로 이때 통기량을 최대로 유지하고 임계치(3일째)에 도달한 이후부터는 초기 주입량 대비 1/2~1/3까지 조절하는 것이 필요하다[27]. 퇴비화에 적합한 수분함량은 50~65% 범위로써, 호기성 미생물의 활성화로 인해 분해속도가 향상될 수 있도록 동 범위를 유지하고, 이외 다공질 광물질의 적용을 장려하여 수분조절과 함께 악취저감 효과를 향상시키는

**Table 8.** Odor removal technology

Application number	Filing date	Inventor	Name of the invention	Technical summary
10-2006-0110529	2006-11-09	Jae-whal Song, Jun-kwan Hwangbo	Apparatus and method for removing odor generated in a sludge treatment process	Effective odor elimination method that removes ammonia and various odor components generated during sludge drying and recycling the exhaust gas heat of a thermal accumulation catalytic oxidation reactor to increase energy efficiency
10-2008-0078263	2008-08-11	Jae-yu Yang Young-il Kim Sang-eun Oh	Odor removal system and removal method of livestock manure using Corona discharge	A system and method for eco - friendly removal of odors from livestock manure by applying Pulsed Corona Discharge (PCD) technology
10-2011-0065254	2011-07-01	Hyun-uk Kim Il-ryup Choi Tae-sub Shin	Batch type biological water treatment system with concentrated selective odor collection means	Batch biological water treatment system with intensive selective and efficient malodor collection means
10-2012-0128385	2012-11-13	Pyung-uk Kim	Animal offensive odor remedy containing microbiological probiotics as active ingredient	Animal offensive odor remover containing microbial probiotics as an active ingredient and a method for producing the same
10-2012-0131386	2012-11-20	Chan-su Lee	Deodorizer with air bubble absorber	The present invention relates to a deodorizing device having an air bubble absorber, wherein a bio-trickling filter and an air bubble absorber are installed in the deodorizing tower to effectively remove odorous components from the odor air
10-2015-0182918	2015-12-21	Myung-Kyu You Chul-keun Yun	High-efficiency deodorizing device	A deodorizing device for collecting odor gas and mixing a malodor gas and a solvent supplied from a pump to remove a part of harmful components
10-2015-0055474	2015-4-20	Sung-sun Kim	Compositions and methods for their preparation for the odor of livestock waste	A composition for removing odor of an animal manure and a method of manufacturing the same. A simple spraying method at each stage of discharging, collecting, storing, etc. of raw and manure livestock manure which is made by using cedarwood tree, sancho
10-2015-0109672	2015-08-03	Kyung-gak Kwon	Odorant removal device for livestock farm	The odorant removal device is connected to the vent of the housing by a duct odor removal system

**Table 9.** Operation condition and factors affecting the composting process [28,29]

Parameter	Value
pH	6-8
Organic matter (%)	70
Organic carbon (%)	33.11
Temp. (°C)	55-75
Initial C/N ratio	20-30/1
Aeration	2 L min <sup>-1</sup> m <sup>3</sup> (Volume; 25 L)
Moisture content (%)	50-65%
N (%)	1.82%
P (%)	1.29%
K (%)	1.25%
Fe (mg L <sup>-1</sup> )	1019
Mn (mg L <sup>-1</sup> )	111
Cu (mg L <sup>-1</sup> )	180
Zn (mg L <sup>-1</sup> )	280

것이 필요하다[42]. 또한, 반입된 유기성폐기물의 활발한 분해와 부숙을 위해 선택된 미생물 종을 부숙 촉진제로 첨가하는 것도 중요하다. 퇴비화 공정에서의 최적 환경조건을 조성하기 위한 운용 조건은 Table 9에 요약하여 나타내었다.

#### 4 결론

유기성폐기물의 퇴비화 기술은 폐기물을 자원화 할 수 있는 방법으로 지속가능한 자원순환 및 시설의 환경관리 측면에서 매우 중요하다. 국내의 퇴비사는 음식폐기물을 처리하는 퇴비사와 식품공장, 도축장 및 양돈사의 폐기물을 처리하는 퇴비사의 2부류로 나눌 수 있으며 대부분의 업체에서는 체계적인 운영방안을 확보하지 못하여 시설관리가 제대로 이루어지지 않고 있는 실정이다. 특히, 퇴비사의 효율적 관리는 종사자와 인근주민의 건강, 업체의 경제적 이익 등과 직접적인 관련이 있으므로 지자체 및 정부의 적극적인 기술지원도 필요하다. 본 연구에서는 퇴비화 과정에서 생산된 퇴비의 품질개선 및 악취저감을 위해 최적화된 미생물 종의 선정과 시설의 운전 조건(예, 탄질율, 습도, 공기량 등)을 도출하였고,

관련 기술들을 통해 효율적인 퇴비사 운영방안을 고찰하였다. 퇴비사 시설의 운영 시 주요 쟁점은 암모니아 및 황화수소 등 악취유발 물질을 저감하는 방안이며, 근래에 적용되고 있는 다공성광물들과 활성탄 등의 물질을 병합한 상용화기술의 개발 및 최적화로 퇴비사의 시설의 안정적인 운영 및 관리가 필요할 것으로 사료된다.

## 감사

본 연구의 일부내용은 충청남도 청양에 위치한 청심산업의 지원, 협조에 의해 이루어진 것이며, 이에 감사드립니다.

## References

- Lim, S.-L., Lee, L.-H., and Wu, T.-Y., "Sustainability of Using Composting and Vermicomposting Technologies for Organic Solid Waste Biotransformation: Recent Overview, Greenhouse Gases Emissions and Economic Analysis," *J. Clean. Product.*, **111**, 262-278 (2016).
- Jara-Samaniego, J., Pérez-Murcia, M. D., Bustamante, M. A., Pérez-Espinosa A., Paredes, C., López, M., López-Lluch, D.B., Gavilanes-Terán, I., and Moral, R., "Composting as Sustainable Strategy for Municipal Solid Waste Management in the Chimborazo Region: Suitability of the Obtained Composts for Seedling Production," *J. Clean. Product.*, **141**, 1349-1358 (2017).
- Ha, D.-M., and Kim, D.-H., "The Effect of Liquid Manure Circulation System on the Odor Reduction of Swine Farm," *J. Agri. Life Sci.*, **49**(4), 57-64 (2015).
- Oh, M.-H., Sim, J.-G., H.-W., Yun, T.-H., and Lee, E.-Y., "The Emission Characteristics of Odor Compounds from the Each Process of Anaerobic Digester Using Swine Manure and Food Waste," *J. Odor Indoor Environ.*, **13**(3), 168-174 (2014).
- Cho, Y.-M., "Enhancement Odor Management of Public Environmental Facilities in Seoul," *Policy Report*, **230**, 1-19 (2017).
- Kim, H.-N., Lim, B.-B., and Kim, S.-T., "Effect of Reducing the Odor of Food Wastes Using Effective Microorganism (EM)," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **38**(4), 162-168 (2016).
- Ku, H.-H., and Kim, S.-H., "Effect of Pig Manure Compost or Sucrose Application on Recovering Chinese Cabbage from Ammonium Toxicity," *Korean J. Soil Sci. Fert.*, **49**(3), 282-286 (2016).
- Bong, K.-M., Kim, J.-M., Yoo, J.-H., Park, I.-C., Lee, C.-W., and Kim, P.-I., "Mass Cultivation and Secondary Metabolite Analysis of *Rhodobacter Capsulatus* PS-2," *The Korean Soc. Biotechnol. Bioeng.*, **31**(3), 158-164 (2016).
- Soares, M. A., Quina, M. J., Reis, M. S., and Quinta-Ferreira, R., "Assessment of Co-composting Process with high Load of an Inorganic Industrial Waste," *Wast. Manag.*, **59**, 80-89 (2017).
- Seo, M.-C., Cho, H.-S., Kim, J.-H., Sang, W.-G., Shin, P., and Lee, G.-H., "Evaluating Soil Carbon Changes in Paddy Field Based on Different Fraction of Soil Organic Matter," *Korean Soc. Soil Sci. Fert.*, **48**(6), 736-743 (2015).
- Han S.-Y., "Phylogenetic Characteristics of Bacterial Populations and Isolation of Aromatic Compounds Utilizing Bacteria from Humus Layer of Oak Forest," *Korean J. Microbiol.*, **52**(2), 175-182 (2016).
- Schütze, E., Klose M., Merten D., Nietzsche, S., Senftleben, D., Roth, M., and Kothe, E., "Growth of Streptomycetes in Soil and Their Impact on Bioremediation," *J. Hazard. Mater.*, **267**, 128-135 (2014).
- Heo, J.-H., Seo, S.-J., Lee, B.-E., Yeom, J.-H., and Lee, K.-S., "Implications of Streptomyces Coelicolor RraAS1 as an Activator of Ribonuclease Activity of *Escherichia coli* RNase E," *Korean J. Microbiol.*, **52**(3), 243-248 (2016).
- Yang, S.-J., Lee, D.-H., Park, H.-M., Jung, H.-K., Park, C.-S., and Hong, J.-H., "Amylase Activity and Characterization of *Bacillus subtilis* CBD2 Isolated from Doenjang," *Korean J. Food Preserv.*, **21**, 286-293 (2014).
- 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), 148-154 (2009).
- Park, J.-H., Kang, T.-S., Seok, J.-W., Jean, S.-H., Heo, Y., Kim, K.-L., Lee, K.-S., and Yun, C.-S., "Risk Factors and Major Disasters in the Livestock Industry," *Korean Soc. Occup. Environ. Med.*, **11**, 289-293 (2013).
- Park, S.-H., "A Study on Advanced Treatment of the Landfill Leachate using *Bacillus* sp., M.S. Dissertation, Korea Maritime and Ocean University, Pusan (2002).
- Lee, J.-H., Jeong, J.-O., and Park, S.-O., "A Study on the Composting Process of Food Waste by Seeding the Isolated Effective Microorganism," *Korean J. Environ. Health Soc.*, **26**(3), 1-10 (2000).
- Choi, J.-Y., Lee, T.-S., Park, S.-O., and Noh, B.-S., "Changes of Volatile Flavor Compounds in Traditional Kochujang During Fermentation," *Korean J. Food Sci. Technol.*, **29**(4), 745-751 (1997).
- Sung, H.-G., "Study on The Relationships between Rice Straw Degradation and Changes of Fibrolytic Bacteria Population by in Vitro Rumen Fermentation," *The Korean Soc. Grassland Forage Sci.*, **37**(1), 35-43 (2017).
- Haruta, S., Nakayama T., Nakamura K., Hemmi H., Ishii M., Igarashi Y., and Nishino T., "Microbial Diversity in Biodegradation and Reutilization Processes of Garbage," *J. Biosci. Bioeng.*, **99**(1), 1-11 (2005).
- Hong, J.-H., Ann, Y.-G., and Jung, J.-D., "A Study on the Garbage Decomposing Characteristics of the Garbage Decomposing Accelerant (I)," *Korean J. Sanit.*, **18**(1), 58-67 (2003).
- Kim, K.-C., Bae, Y.-S., Kim, S.-J., and Kim, S.-W., "Production of Amylase by a Filamentous Fungus, Strain FM04, and Enzymatic Hydrolysis of Food Waste," *Korean J. Biotechnol.*

- Bioeng.*, **18**(5), 363-370 (2003).
24. Yoo, J.-H., Joo, J.-H., Kim, S.-G., and Jang, I.-H., "Isolation and Characterization of Protease Producing *B. amyloliquefaciens* JH-35 from Food Waste," *Korean J. Environ. Agric.*, **35**(4), 294-301 (2016).
  25. Ryoo, J.-W., "Study on the Continuous Composting Process to Reduce the Use of Bulking Agent in Pig Slurry," *J. Animal Environ. Sci.*, **13**(2), 121-128 (2007).
  26. Lee, S.-B., Lee, C.-H., Hong C.-O., Kim, S.-Y., Lee, Y.-B., and Kim, P.-J., "Effect of Organic Residue Incorporation on Salt Activity in Greenhouse Soil," *Korean J. Environ. Agric.*, **28**(4), 397-402 (2009).
  27. Lee, D.-H., Kim, J.-K., Jeong, G.-H., Kawg, J.-H., Ravindran B., and Lee, J.-W., "Changes of Physico-chemical Characteristic on Swine Manure Using Different Suction Strength in Composting System," *Korea Org. Resour. Recycl. Asso.*, **25**, 59-67 (2017).
  28. Kim, J.-H., Park, J.-S., and Bae, J.-G., "Evaluation of Performance Index for Optimization of Food Waste Treatment and Recovery Facility," *Clean Technol.*, **22**(3), 181-189 (2016).
  29. Costa, M., Carneiro, L., Costa, L., Pereira D., and Lorin H., "Composting Time Reduction of Agro.-Industrial Wastes," *Engenharia Agricola*, **36**(6), 1206-1217 (2016).
  30. Park, J.-G., Seo, S.-T., Park, S.-C., and Lee, H.-S., "A Study on Developing Fly Ash as Bulking Agent for Composting Swine Manure," *J. Environ. Manage.*, **20**(2), 65-70 (2014).
  31. Kim, Y.-S., Lee, T.-S., Cho, S.-H., Jeong, J.-Y., An, G.-Y., Lee, J.-J., Han, K.-P., and Hong, J.-W., "Plant Growth Responses and Characteristics of Composting of Poultry Manure with Peatmoss and Cocopeat as Bulking Agent," *Korea Org. Resour. Recycl. Asso.*, **25**(1), 79-86 (2017).
  32. Opaliński, S., Korczyński, M., Szoltyś, M., Dobrzański, Z., and Kołacz, R., "Application of Aluminosilicates for Mitigation of Ammonia and Volatile Organic Compound Emissions from Poultry Manure," *Open Chem.*, **13**(1), 967-973 (2015).
  33. Wellinghoff, S., Kampa, J., Barenberg, S., Gray, P., and Lelah, M., "Silicate-Containing Powders Providing Controlled, Sustained Gas Release," U.S. Patent No. 6277408 B1 (2001).
  34. Johnson, L., "Odor Elimination Methods Using Zeolite-containing Liquid Sprays and Detergent," U.S. Patent No. 6893632 B2 (2005).
  35. Mejias, L., Komilis, D., Gea, T., and Sánchez, A., "The Effect of Airflow Rates and Aeration Mode on the Respiration Activity of Four Organic Wastes: Implications on the Composting Process," *Waste Manage.*, **65**, 22-28 (2017).
  36. Chae, J.-S., Jeon, J.-M., Oh, K.-C., Ryoo, H.-U., and Kim, S.-D., "Evaluation of Field Applicability and Odor Emission Characteristics for Pig Carcasses Burial Treatment of Pilot Scale Using Livestock Compost," *Korean Soc. Atmosph. Environ.*, **33**(2), 108-123 (2017).
  37. Lee, E.-Y., and Jung, S.-L., "Current Status and Perspectives of Livestock Environment Improving Agents for the Characteristics and Control of Swine Manure Odor," *J. Microbiol. Biotechnol.*, **38**(3), 244-254 (2010).
  38. Barbusinski, K., Kalembe, K., Kasperczyk, D., Urbaniec, K., and Kozik, V., "Biological Methods for Odor Treatment—A review," *J. Clean. Product.*, **152**, 223-241 (2017).
  39. Ha, T.-U., and Choi, S.-J., "Biofilter Technology for Odor and VOCs Elimination," *J. Environ. Sci.*, **14**, 15-24 (2000).
  40. Lee, B.-K., Lee, S.-H., Tak, S.-J., and Lee, B.-K., "The Study on the Removal of Odor Emitting Environmental Fundamental Facility," *J. Climate Change Res.*, **8**(1), 51-56 (2017).
  41. Lee, S.-C., and Kim, D.-J., "Odorous Gas Removal in Biofilter with Powdered Activated Carbon and Zeolite Coated Polyurethane Foam," *Clean Technol.*, **18**(2), 209-215 (2012).
  42. Borowski, S., Matusiak, K., Powałowski, S., Pielech-Przybylska, K., Makowski, K., Nowak, A., Rosowski, M., Komorowski, P., and Gutarowska, B., "A Novel Microbial-mineral Preparation for the Removal of Offensive Odors from Poultry Manure," *Inter. Biodeter. Biodegrad.*, **119**, 299-308 (2017).
  43. Onursal, E. and Ekinci, K., "A Kinetic Study on How C/N Ratio Affects Energy Consumption of Composting of Rose Oil-processing Wastes with Caged Layer Manure and Straw," *Environ. Prog. Sustain. Energy*, **36**(1), 129-137 (2017).
  44. Song, J.-W., and Hwangbo, J.-k., "Apparatus and Method for Removing Odor Generated in A Sludge Treatment Process," Kr. Patent No. 10-1264590 (2013).
  45. Yang, J.-Y., Kim, Y.-I., and Oh, S.-E., "Odor Removal System and Removal Method of Livestock Manure Using Corona Discharge" Kr. Patent App. No. 10-2010-0019609 (2010).
  46. Kim, H.-U., Choi, I.-R., and Shin, T.-S., "Batch Type Biological Water Treatment System with Concentrated Selective Odor Collection Means," Kr. Patent App. No. 10-2013-0003738 (2013).
  47. Kim, P.-U., "Animal Offensive Odor Remedy Containing Microbiological Probiotics as Active Ingredient," Kr. Patent No. 10-1260872 (2013).
  48. Lee, C.-S., "Deodorizer with Air Bubble Absorber," Kr. Patent No. 10-0065671 (2014).
  49. Yoo, M.-K., and Yun, C.-K., "High-efficiency Deodorizing Device," Kr. Patent No. 10-1619124 (2016).
  50. Kim, S.-S., "Compositions and Methods for Their Preparation for the Odor of Livestock Waste," Kr. Patent No. 10-1696067 (2017).
  51. Kwon, K.-G., "Odorant Removal Device for Livestock Farm," Kr. Patent App. No. 10-2017-0016217 (2017).
  52. "Installation and Operation of Food Waste Treatment Facilities," Ministry of Environment (2016).
  53. Composting microorganism: (a) *Actinomyces* : <https://www.slideshare.net/SalmanAli83/actinomyces> 58131399 2017.
  54. Composting microorganism: (b) *Streptomyces* : <http://prgdb.crg.eu/wiki/Species:Streptomyces> 2017.
  55. Composting microorganism: (c) *Bacillus* : <http://www.alamy.com/stock-photo-rod-shaped-bacillus-bacteria-33303842.html> 2017.