

음식물쓰레기 퇴비화에서 혼합물 특성이 퇴비화에 미치는 영향

정준오[†] · 권혁구* · 이장훈

호서대학교 환경·안전공학부 환경공학 전공, *호서대학교 벤처전문대학원

An Influence of Mixing Material Characteristics on the Composting of Food Waste

Joon Oh Jung[†] · Hyuk Ku Kwon* · Jang Hoon Lee

Environmental · Safety Eng. Division, Environmental Eng. Major, Hoseo University

*Graduate School of Venture, Hoseo University

(Received September 17, 2002; Accepted November 11, 2002)

ABSTRACT

The composting practice has been recognized as the most popular way of controlling food waste and many attempt have been made in the field to establish more efficient and economical process. Some of the efforts are mixing cured compost with sawdust as alternative bulking agent, seeding commercially produced microorganism and/or combination of above. However, verification of such efforts is often restricted because of either the lack of engineering consideration on the limitation of composting facility scales. In this study, the effect of mixing materials in food waste composting was investigated by controlling the combination and the mixing ratio of them. When the cured compost was mixed with saw dust, the decomposition of organic material was proven to be more active by observing the compost temperature, the oxygen (O₂) consumption, and the cumulative carbon dioxide (CO₂) profile. However, the quantity of compost mixing seemed not to influence the reaction as long as the minimum required amount was mixed. The seeding of commercially produced microorganism had a tendency to prolong the thermophilic stage, which helped to increase the decomposition but it resulted in composting period. Regardless of the composting condition, bacteria and actinomycetes increased in population as the reaction approached to the end. The population of bacteria and actinomycetes were relatively higher than those of fungi and yeast throughout the reaction.

Keywords : Composting, Food waste, Microorganism

I. 서 론

우리 나라의 생활폐기물의 발생현황은 1995년 1월 폐기물의 분리 배출 시행 이후 현격히 감소하는 경향을 보여 2001년 전국 일반폐기물 관리구역 내의 생활폐기물 배출량은 1일 48,499톤으로 연간 17,702천 톤을 배출하여 1995~2000년도 평균보다 3.1%로 증가하였다. 그리고 음식 쓰레기가 차지하는 비율은 23.1%를 차지하여 연간 11,237톤이 배출됨으로써 27.5%를 차지한 1995~2000년도 평균과 비교하여 볼 때 전체 폐기물 중에 음식물쓰레기가 차지하는 비율은 큰 변화 없이 생활폐기물 중 가장 높은 비율을 차지하고 있으며

음식물쓰레기가 생활쓰레기의 수분함량에 큰 영향을 주고 있다.¹⁾ 따라서 음식물쓰레기를 처리할 수 있는 매립, 소각, 탈수, 재활용 등 여러 가지 방법 중에서 생활폐기물과 함께 매립하는 매립 방식은 매립지 확보의 어려움뿐 만 아니라 높은 함수율로 인하여 침출수에 의한 토양 및 지하수 오염, 유해가스 및 악취발생에 따른 불쾌감 등 심각한 2차 오염을 수반할 수 있으며, 소각 처리는 높은 수분함량으로 인하여 발열량이 낮아서 보조 연료의 사용을 기증시키며, 불완전 연소에 의하여 다이옥신과 같은 발암물질의 발생 등이 문제가 된다.^{2,3)} 따라서 자원화의 일환으로 미생물의 호기성 대사작용을 이용하는 유기성 폐기물 처리방법 중의 하나인 퇴비화 반응을 통하여 환경에 악영향을 미치지 않는 안정한 형태로 만들어 재활용하고자 하는 시도가 진행되고 있다.⁴⁾

비교적 쉬운 퇴비화 공정에 의하여 감량화와 동시에

[†]Corresponding author: Environmental · Safety Eng. Division, Environmental Eng. Major, Hoseo University
Tel: 041-540-5742, Fax: 041-540-5748
E-mail: jujung@office.hoseo.ac.kr

생산되는 생성물은 그 질에 따라 토양 개량제, 매립 복토제 등으로 활용함으로써 토양 pH조절, 보습성 향상, 침식방지 등의 토양개량 효과를 얻을 수 있으므로 장기적인 음식폐기물의 처리 및 자원화 방안으로 인정되고 있다.⁵⁾

음식물쓰레기의 퇴비화는 시설의 특성에 따라 다양한 시공방법과 공정으로 운영될 수 있으나 최종산출물인 양질의 퇴비를 경제적으로 생산할 수 있어야 한다는 전제가 따르며, 이를 위한 노력으로 현장에서는 여러 공정상의 변화를 시도하고 있다. 예를 들면 음식물쓰레기의 수분조절과 평화의 목적으로 톱밥을 사용하기도 하며, 톱밥의 원활한 공급이 어렵다는 점과 미생물의 집종목적으로 숙성퇴비를 반송하는 경우도 있고, 퇴비화의 효율을 높이려는 막연한 기대로 고가의 미생물제제를 다량 첨가하기도 한다. 그러나 대개 이러한 시도는 경험에 의존하여 임의로 이루어지고 있으며, 또한 실규모 시설에서 시험하는 관계로 공정변화에 따른 효과에 대한 공학적인 고찰이 부족한 경우가 많다.

본 연구에서는 음식물쓰레기, 톱밥, 숙성된 퇴비, 상업적으로 개발된 종균제의 배합 비율을 조절하여 퇴비화 기간동안 온도변화, 산소 소비량, CO₂생성량 및 온도 변화에 따라 퇴비화에 관여하는 활성 미생물의 변화 등을 조사하여 각 퇴비화 조건별 특성을 파악하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 실험장치

본 실험에 사용된 퇴비화 장치는 Fig. 1과 같이 아크릴 재질의 반응조를 지름 30 cm, 높이 90 cm의 원통형으로 5 sets를 제작하여 반응열 손실을 줄이기 위해 반

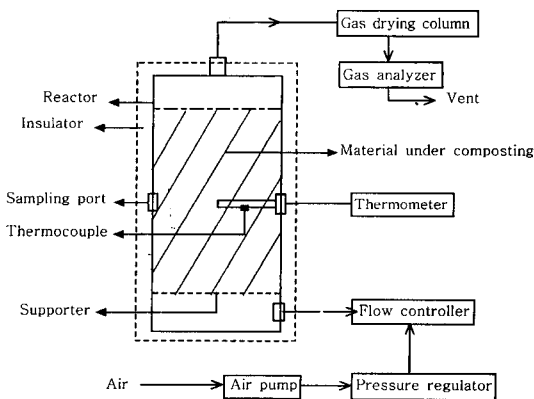


Fig. 1. Schematic diagram of composting apparatus.

응조 외벽에 건축용 단열재를 여러 겹 부착하였다. air compressor에 의하여 공급된 공기는 pressure regulator로 1기압으로 조절하고 유량계를 통하여 반응조 하단에서 주입하였으며 다공성의 지지판(supporter)을 설치하여 주입된 공기가 반응조 내에 고르게 유입될 수 있게 하였다.

퇴비화 대상물질은 각 반응조 마다 동일량을 채웠으며 반응온도는 thermocouple과 연결된 자동온도측정기(Barnant, 92800-15)로 1.5시간 간격으로 측정하였다. 배출가스 중 CO₂는 반응조 상부의 가스 배출구에 CaSO₄로 충전된 수분 흡수 column을 연결하여 수분을 제거한 후 적외선 CO₂ 측정기(Anagas, CD95)와 연결하여 필요에 따라 수시로 측정하였다. 시료는 반응열의 축적이 용이한 반응조의 중앙에서 채취하여 폐기물공정시험법에 따라 pH, 수분함량, 유기물함량 및 미생물상의 변화 등을 조사하였다.

2. 물질의 특성 및 실험조건

실험에 사용된 음식물쓰레기, 톱밥, 퇴비, 종균제는 C시의 음식물 자원화 시설에 수거된 것을 이용하였으며 음식물쓰레기는 원심 탈수하여 최대한 수분을 제거한 후 입경이 약 10 mm 이하가 되도록 분쇄하였고 퇴비는 실험실에서 한달 이상 별도의 숙성기간을 거친 완숙된 퇴비를 사용하였다. 또한 톱밥과 퇴비는 음식물쓰레기와 혼합할 때 동일량이 되도록 하기 위해 수분 함량을 약 28%로 조절한 후 음식물쓰레기를 적정량 첨가하여 혼합물의 수분함량이 60%가 되도록 하여 모르타르 혼합기(Kun Hung, KH-205)로 물질의 성상이 균일하도록 약 50 rpm으로 20분간 혼합하였다. 공기공급

Table 1. Characteristics of materials under composting

Materials	Moisture(%)	Organic(%)*	pH
Food waste	81.6	89.8	4.2
Saw dust	28.3	99.1	4.6
Compost	28.1	91.9	8.3

*Dry basis.

Table 2. Experimental condition for each reactor

Reactor	Mix condition			
	Food waste (kg)	Sawdust (kg)	Compost (kg)	Seed (g)
1	6.812	3.688	0	0
2	6.812	3.688	0	42
3	6.812	1.844	1.844	0
4	6.812	0	3.688	0
5	6.812	0	3.688	42

은 이전의 연구에서 알려진 최적 범위인 2.3 l/min.으로 조절하였고⁶⁾ 종균제의 첨가량은 건조물 기준으로 1%로 하였다. 초기 혼합물질의 특성과 실험조건은 Table 1과 2에 나타났다.

3. 미생물상의 변화 조사

미생물상의 측정은 평판희석계수법으로 하였으며 세균수 측정용으로는 plate count agar를 방선균수 측정용 actinomycetes isolation agar를 사용하였고 Sabouraud's dextrose agar와 yeast-malt extract agar는 각각 곰팡이와 효모 측정용으로 사용하였다. 접종원은 시료 1g(습중량)을 9ml의 멸균 희석수에 넣고 혼합기(voltex mixer)로 현탁액을 만든 다음 10단계 희석을 한 상정액을 사용하였다.

퇴비화 과정동안 실질적으로 활성을 갖는 미생물상의 변화를 관찰하기 위하여 배양온도는 시료가 채취된 시점의 온도에 맞추어 배양하였다. 균수는 희석 계수가 다른 접종액을 각각 2개의 평판배지에 도말 배양한 후 형성된 각각의 집락수를 측정하여 그 평균값을 균수로 계산하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 온도변화

퇴비화는 주로 호기성 미생물에 의한 분해 작용으로 이들 미생물의 활성에 최적인 조건들이 부여되었을 때 유기물이 분해되어 이산화탄소, 열, 수분, 부식질이 생산되게 된다. 최적조건에서 퇴비화는 중온단계-고온단계-중온단계를 거치게 되며 이때 각기 다른 미생물 군집이 각각의 퇴비화 온도 단계를 지배하게 된다. 퇴비화 초기에는 중온단계로 분해되기 쉬운 당, 전분 등 용해성물질이 중온균에 의해 분해되어 이때 발생된 열이

퇴비 반응온도를 상승시켜 반응기의 온도가 40°C 이상 상승하게 되어 고온균이 활성화되는 고온단계에 이르게 된다. 이 단계에서 비교적 난분해성 물질인 protein, lipid, cellulose, hemi-cellulose 등이 분해되어 점차 기질의 감소함에 따라 미생물의 활성도 감소되고 온도도 낮아지게 된다.^{7,8)}

Fig. 2에서와 같이 대체적인 온도 변화는 퇴비화가 진행됨에 따라 온도 상승을 보이고 각 반응기의 최고 온도(62~68°C)에 도달 후 서서히 감소하는 전형적인 퇴비화 온도변화 곡선을 나타내었다. 그러나 퇴비화 반응 초기 온도가 급격히 상승 후 하강하는 양상을 보였는데 이는 초기에 분해되기 쉬운 물질의 분해에 의해 일시적으로 온도의 상승이 있었으나 그 후 온도의 감소는 고분자 물질을 분해하는 미생물이 환경에 적응하는 유도기(lag phase)기간과 관련이 있는 것으로 추측된다.

실험조건별 온도변화 양상을 보면 반응초기 1~2일은 유사한 온도 변화를 보였으나 그 이후 퇴비를 혼합한 그룹(반응기 3, 4, 5)이 그렇지 않은 그룹보다 빠른 시간에 최고 온도에 도달하였으며 도달 온도도 높았다. 이는 이미 숙성된 퇴비에 존재하는 유효 미생물이 빠른 시간 안에 퇴비화를 유도한 것으로 보인다. 종균제를 접종(seeding)한 그룹(반응기 2, 5)은 대조 그룹(반응기 1, 4)과 비교할 때 고온에서의 반응 기간이 길게 나타났다. 또한 퇴비의 혼합 비율에 따른 온도변화(반응기 3, 4)는 대체로 유사하여 퇴비의 혼합비율은 퇴비화 반응에 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

2. 산소 소모율 변화

퇴비화 기간 동안 산소소모율을 배출가스 중의 산소농도(건조가스 기준)의 변화로 Fig. 3에 나타냈다. 그림에서와 같이 산소소모율은 반응초기 실험조건과 관계

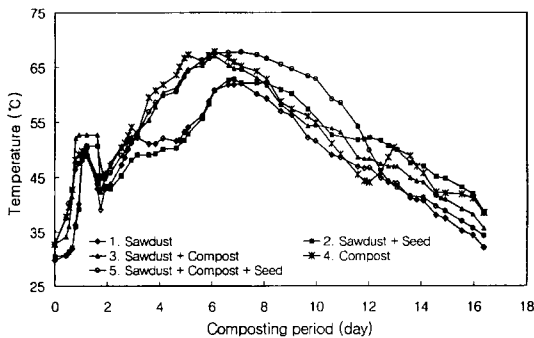


Fig. 2. Variation of temperature during food waste composting process at different mixtures.

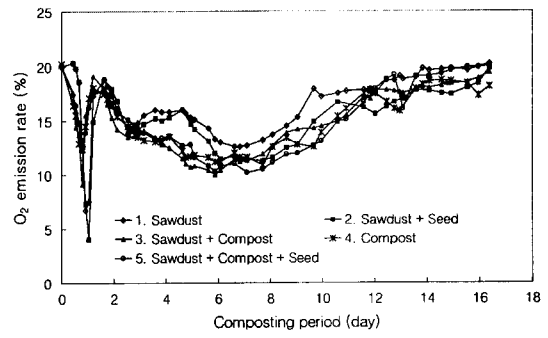


Fig. 3. Variation of O₂ emission rate during food waste composting process at different mixtures.

없이 빠르게 증가하였다가 일시적으로 감소한 후 다시 증가하는 경향을 보였으며, 그 이후는 온도가 고온으로 올라갈수록, 고온의 지속기간이 길수록 소모율이 높아 퇴비화 온도변화 양상과 밀접한 관계를 보였다. 또한 퇴비화 반응 중 산소의 농도는 초기의 일시적인 과소비를 제외하고 고온 반응에서 배출가스 중 약 10~13%를 유지하고 있어 적정호기성조건을 유지하기 위하여 산소의 농도가 10%를 유지하는 것이 바람직하다고 보고된 것과 비교할 때 공기공급량이 적절하였음을 보여주고 있다.

3. 이산화탄소 생성량 변화

Fig. 4는 퇴비화기간 동안 배출가스 중 CO₂ 생성농도(건조가스 기준)를 나타내었다. 그림에서와 같이 생성 CO₂ 농도는 Fig. 3의 산소농도와 반비례하며 산소의 소모량과 CO₂의 생성량은 거의 동일함을 보여주고 있다. Fig. 4의 생성 CO₂ 농도를 주입 공기량과 그 때의 온도를 기준으로 표현하여 생성유량(l/min)으로 전환하고 퇴비화 기간동안의 누적 CO₂생성량으로 표현하

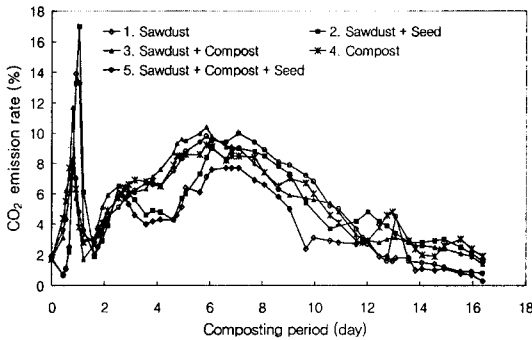


Fig. 4. Variation of CO₂ emission rate during food waste composting process at different mixtures.

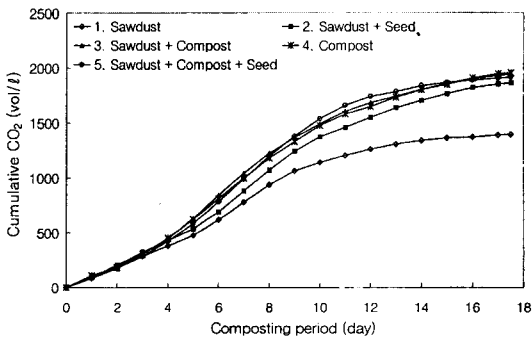


Fig. 5. Variation of cumulative CO₂ during food waste composting process at different mixtures.

면 Fig. 5와 같다. 누적 CO₂ 발생량은 기질의 분해정도와 직접적으로 관련이 있으므로 각 실험조건에서의 퇴비화 특성을 판단하는 자료가 된다.

Fig. 5에서와 같이 CO₂ 누적곡선은 반응초기 3일까지는 실험조건에 관계없이 같은 기울기의 선형증가를 보였으며, 이는 Fig. 3, 4의 O₂ 소모율, CO₂ 생성률 변화 양상과 유사하다. CO₂ 누적곡선은 각 반응조건에서 고온성 분해단계에 접어들면서 기울기가 가파르게 증가하였다가 반응온도가 떨어지며 완만한 기울기로 변화하였다. 고온단계까지의 누적 CO₂ 생성량을 반응조건별로 볼 때 5번 반응조 조건이 가장 높았으며, 다음으로 3, 4번 반응조 조건은 유사하였고 2번, 1번 반응조 조건순서를 보였다. 또한 퇴비화 기간 약 18일을 기준으로 표현한 최적 누적 CO₂ 생성량을 기준으로 볼 때 반응조건 1을 제외하고 다른 조건에서는 모두 유사한 기질분해 정도를 나타냈다. 이는 고온성 단계의 차이에도 불구하고 반응조건 2, 3, 4가 퇴비화 후반까지 기질의 분해가 지속되어 비교적 높은 온도를 유지한 것과 관련이 있다(Fig. 2 참조).

따라서 음식물쓰레기의 퇴비화는 팽화제로 톱밥을 사용하는 것보다 퇴비를 혼용하는 것이 바람직하며, 퇴비의 혼합정도는 퇴비화 과정에서 별다른 영향을 보이지 않았다. 또한 중균제의 혼합은 고온성 분해단계를 지속시키는 효과가 있었으며, 특히 톱밥을 팽화제로 사용할 경우 효과적으로 나타났다. 그러나 퇴비를 혼합할 경우에는 이미 퇴비화 과정에 적용된 유효균주를 다량 함유하고 있어 경제적인 면을 고려할 때 굳이 중균제를 첨가할 필요가 없는 것으로 나타났다.

4. 미생물상의 변화

Fig. 6은 음식물 퇴비화 과정 중에 온도변화에 따른 미생물의 활성을 평판희석 도달법으로 조사하여 그 경

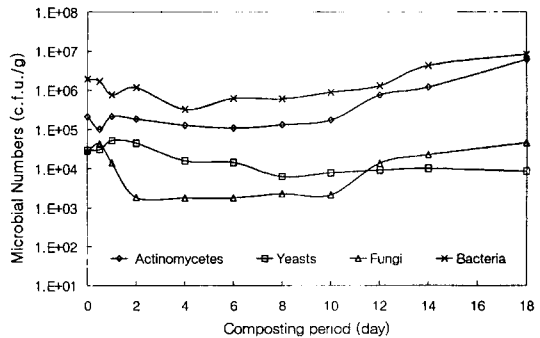


Fig. 6. Average microbial populations during food waste composting process.

향을 나타낸 그림이다. 모든 반응조에서 초기의 미생물 수 보다 12시간 경과 후의 미생물수가 약간 감소하여 미생물이 새로운 환경에 적응하는 lag phase의 전형적인 현상을 보인 후 증가하는 경향을 보였다. 반응조 모두에서 세균, 곰팡이, 방선균, 효모가 존재하였으며 온도 변화에 따라 각각의 균수가 달라지는 것이 관찰되었다. 이는 퇴비화가 진행되는 과정 중의 온도변화에 따라 활성을 나타내는 미생물의 종류가 다르기 때문인 것으로 생각된다. 각각의 반응조에서의 미생물상의 변화는 유사하였다. 모든 배양기에서 세균의 밀도가 가장 높게 나타났으며 방선균이 두 번째로 높았고 퇴비화 초기에는 효모의 밀도가 곰팡이보다 높았으나 퇴비화의 후반부로 갈수록 곰팡이의 밀도가 전반적으로 높아지는 경향을 보였다.

하수 슬러지 퇴비화 과정 중에 미생물상의 변화는 퇴비화 초기단계에서는 중온성 세균에 의한 유기물 분해로 열이 발생하여 축적된 열에 의해 반응기의 온도가 상승하고 따라서 중온성 세균의 밀도와 분해활동은 감소하게 되고 점진적으로 고온성 세균으로 대체되기 시작하여 퇴비더미 내부에서부터 고온성 미생물들에 의해 분해가 일어나게 된다고 보고가 되고 있다.^{10,11)}

본 실험에서도 온도가 60°C 전후로 상승된 초기 상태에서는 고온성 세균이 주로 유기물의 분해를 하기 시작하여 유기물의 농도가 낮아지게 되는 퇴비화 후기단계에 높은 온도에 대한 내성이 세균보다 큰 고온성 방선균의 밀도가 증가하면서 유기물을 분해하는 것으로 생각된다. 반면 반응기의 온도가 고온인 과정 중에는 곰팡이의 밀도가 상대적으로 낮았으나 퇴비화 과정의 후반부에는 고온성 곰팡이의 밀도가 높게 나타나는 것으로 조사되었다. 이는 고온기에는 온도의 영향으로 성장의 제약을 받은 저영양성 균주인 고온성 곰팡이가 성장에 적합한 온도인 45~50°C로 반응기의 온도가 떨어진 퇴비화 후반부에 증식이 가능하였기 때문인 것으로 생각된다. 또한 일부 저영양성 중온성 세균과 방선균의 활발한 분해성으로 인해 퇴비화 후반부에서도 세균과 방선균의 밀도 감소는 없었던 것으로 생각된다. 그러나 효모인 경우에는 반응기의 온도가 상승하는 초반부에 일정하게 감소한 후에 퇴비화 후반까지 비슷한 밀도를 유지하는 것으로 조사되었다.

IV. 결 론

초기의 수분함량을 60%, 무게를 10.5 kg으로 하고, 유량을 2.3 l/min으로 일정하게 유지하면서 음식물쓰레기에 톱밥, 종균제, 숙성된 퇴비의 배합을 조절하여 처

리한 5개의 반응조에서 퇴비화 과정동안 물리·화학적 특성 및 미생물상의 변화를 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 퇴비화 반응의 온도 변화는 팽화제로 퇴비를 톱밥과 혼합한 그룹이 그렇지 않은 그룹보다 빠른 기간 내에 최고온도에 도달하였으며, 도달온도도 높았으나 퇴비의 혼합 비율은 영향을 미치지 않았다. 또한 종균제의 접종은 고온 단계에서의 반응 지속 시간을 연장하는 효과가 있었다.

2. 배출가스 중의 CO₂ 생성률은 O₂소모율과 비례하였으며 생성 CO₂를 누적하여 총 생성량으로 표현할 경우 톱밥을 단일 팽화제로 사용하였을 때 CO₂생성량이 가장 적어 퇴비화 과정 중 유기물 분해가 가장 적게 일어났음을 보였으며 퇴비를 혼용한 경우 대체로 높은 분해정도를 나타냈다. 또한 톱밥에 종균제를 접종한 경우 CO₂생성 지속기간이 연장되었으나 퇴비화기간 또한 연장되어 효율적이지 못할 것으로 판단되며 퇴비를 혼용한 경우에는 종균제의 접종 효과가 뚜렷하지 않았다. 퇴비화 기간 산소소모율은 반응 초기 일시적으로 높게 나타났으나 주로 고온성 분해 단계에서 소모가 많았다.

3. 미생물상의 변화는 혼합물 성상에 관계없이 모든 반응조에서 비슷한 양상을 보였다. 반응초기에는 세균의 밀도가 상대적으로 높고 방선균, 곰팡이, 효모는 비슷하였다. 후반부로 갈수록 세균과 방선균의 밀도가 비슷해지는 경향을 보였고 곰팡이와 효모는 퇴비화 초반에 밀도가 급격히 감소한 다음 곰팡이는 중온성 상태인 후반에 증가하였으나 효모의 변화는 없었다. 퇴비화 전반에 걸쳐서 세균과 방선균의 밀도가 곰팡이와 효모보다 상대적으로 높았다.

참고문헌

1. 환경부 : 2001년 전국 폐기물 발생 및 처리현황, 2000.
2. 김석구, 김병태 : 연탄화를 이용한 분뇨 퇴비화의 적정 첨가제 선정에 관한 연구. 한국 폐기물학회지, 5(2), 75-81, 1988.
3. Arila, R. : Leaching of Pollutants from Sanitary Landfill Models. *Journal of WPCF*, 51(11), 518-532, 1979.
4. Kubota, H. and Nakasaki, K. : Accelerated Thermophilic Composting of Garbage. *Biocycle*, June, 66-68, 1991.
5. Golueke, C. G. : Understanding the Process "The Art & Science of Composting", The JG Press, Inc., Emmanus, Pennsylvania, 14-27, 1991.
6. 정준오, 안정희 : 공기공급량이 음식폐기물의 퇴비화 반응에 미치는 영향. 대한환경공학회지, 23(6), 1013-

- 1021, 2001.
7. Levin, M. A. and Gealt, M. A. : Biotreatment of Industrial and Hazardous waste. McGraw-Hill, New York, 1993.
 8. Mathur, S. P. : Composting processes in bioconversion of waste materials to industrial products. Martin, A. M., Eds., Elsevier science publishers Ltd., New York, 147-183, 1991.
 9. Nancy Trautmann, Elaina Olynciw : Cornell composting. Cornell university. 1994.
 10. Nakasaki, K., Sasaki, M., Shoda, M. and Kubota, H. : Change in microbial numbers during thermophilic composting of sewage sludge with reference to CO₂ evolution rate. *Applied and Environmental Microbiology*, **49**(1), 37-41, 1985.
 11. Nakasaki, K., Sasaki, M., Shoda, M. and Kubota, H. : Characteristics of mesophilic bacteria isolated during thermophilic composting of sewage sludge. *Applied and Environmental Microbiology*, **49**(1), 42-45, 1985.