

# 14

## 퇴비화, 토양처리법 및 생물학적 대기오염 처리

### 14.1 퇴비화

퇴비화(composting)는 비교적 고온(40~55 °C)에서 이루어지는 호기성(aerobic) 분해과정이며 보통 유기성 고형 폐기물(organic solid wastes)의 처리에 이용하고 있다. 유기성 고형 폐기물은 수주일에 걸쳐 서로 다른 미생물 개체군들에 의해 연속적으로 분해되어 퇴비(compost)라고 하는 짙은 갈색 입자상의 부식질(humus)같은 최종산물을 생성한다. 이 퇴비는 토양 개량제(soil conditioner)로 유용하며 점토나 모래흙의 성질을 개선시킬 수 있다. 퇴비화될 수 있는 폐기물은 다양하며 음식물 쓰레기, 종이, 섬유, 나무로부터 하수 슬러지(sludge)와 이것들의 혼합물 등을 포함한다. 퇴비화하는 1차 목적은 폐기물을 불안정하고 더러운 상태에서 안정된 최종산물로 전환하는 것이다.

#### 14.1.1 퇴비화 공정

퇴비화는 폐기물 선별, 분쇄, 분해, 양생, 건조 및 마무리 단계로 이루어져 있으며 전체 공정은 2~3개월이 소요된다.

##### (1) 폐기물 선별 및 분쇄

생활 쓰레기 중에서 유리, 플라스틱, 도기, 금속 등 분해되지 않는 물질들을 퇴비화 전에 선별하여 제거한다. 손으로 골라내는 방법과 채로 골라내는 방법(screening)이 있다. 철금속은 자석을 이용하여 제거한다. 효율적인 퇴비화를 위해서는 미생물들에 의한 분해가 용이하도록 4~7 cm 정도로 잘게 분쇄를 해 주어야 한다. 이상적인 수분함량은 약 50%로서 물을 첨가하여 조정한다. 이때 하수 슬러지를 첨가하면 수분함량을 조정할 수 있

을 뿐만 아니라 퇴비의 질을 높일 수 있다.

### (2) 생물학적 분해

퇴비화에는 2가지 기본적인 방식이 있다. Windrow 방식은 약 9 m의 너비에 3 m 높이의 피라미드 형태로 폐기물을 쌓는 간단한 방법이다. 폭기(aeration)를 촉진하기 위해 2~3일마다 폐기물 더미를 기계삽으로 뒤집는다. 이 Windrow 방식은 운영이 간단하고 비용이 적게 들며 기술적으로 쉬운 장점이 있다. Dono 공정으로 잘 알려져 있는 두 번째 방식은 길이 30 m에 폭 5 m의 통에 폐기물을 충전하고 서서히 회전시켜 혼합과 폭기를 한다. 혼합, 폭기와 온도조절을 잘 하면 Windrow 방식보다 짧은 시간 내에 안정화 공정을 끝낼 수 있다. 퇴비화는 호기성 공정이기 때문에 보다 원활한 산소공급을 위해 톱밥이나 나무조각(wood chips)을 폐기물에 섞어서 처리한다.

### (3) 양생, 건조 및 마무리

완전히 안정되지 않은 퇴비를 토양에 투여하면 식물체가 이용할 질소를 퇴비가 먼저 소모해 버리는 문제점이 발생하기 때문에 2~3 주 정도까지 양생(curing)한다.

농업 또는 원예용도의 퇴비는 수분함량이 30 % 이하가 되도록 기계적으로 건조시켜야 한다. 퇴비의 균질성도 중요하기 때문에 큰 덩어리를 제거하기 위해 다시 분쇄하고 거르기도 한다. 또한 원활한 산소공급을 위한 혼합재로 사용된 나무조각은 채로 걸러서 재사용한다.

## 14.1.2 퇴비화 공정의 환경변화

### 생물학적 환경변화

#### (1) 초기 단계

퇴비화 과정의 초기에는 중온성(mesophilic) 진균(fungi)과 박테리아들이 주로 유기물을 분해하고, 이들의 작용에 의해 퇴비 더미의 온도가 40 °C 이상으로 상승됨에 따라 고온성 세균과 방선균(Actinomycetes)으로 대체되기 시작한다. 중온성 미생물들은 일반적으로 토양 중의 유기물에 존재하는 미생물들과 비슷한 종류가 많다(표 14.1).

#### (2) 고온 단계

초기 단계에서 중온성 미생물에 의해 폐기물이 분해되어 열이 발생되고 퇴비 더미의 온도가 상승하면 중온성 미생물들의 밀도와 분해활동이 급격히 감소한다. 반면에 고온성(thermophilic) 미생물의 농도가 증가한다.

표 14.1 퇴비로부터 분리된 중온성 박테리아 및 균류

박테리아	균류(fungi)
<i>Bacillus cereus</i>	<i>Aspergillus niger</i>
<i>Cellulomonas folia</i>	<i>A. terreus</i>
<i>Chondrococcus exiguus</i>	<i>A. fumigatus</i>
<i>Enterobacter cloacae</i>	<i>Chaetomium globosum</i>
<i>Flavobacterium balustinum</i>	<i>C. aureum</i>
<i>Myxococcus virescence</i>	<i>C. homopilatum</i>
<i>M. fulvus</i>	<i>Coprinus cinereus</i>
<i>Myxococcus thiooxidans</i>	<i>C. megacephalus</i>
<i>Pseudomonas fluorescense</i>	<i>C. pagopus</i>
<i>P. putida</i>	<i>Fusarium culmorum</i>
<i>P. stutzeri</i>	<i>Geotrichum</i>
<i>Xanthobacterium</i>	<i>Gliocladium candidum</i>
<i>Xanthomonas maltophilia</i>	<i>Mucor spinescens</i>
	<i>M. abundans</i>
	<i>M. varians</i>
	<i>M. heimallis</i>
	<i>Penicillium ochrochloron</i>
	<i>P. griseofulvum</i>
	<i>Rhizopus nigricans</i>
	<i>R. oryzae</i>
	<i>Stysanus stemonitis</i>
	<i>Trichoderma viride</i>
	<i>T. harzianum</i>
	<i>T. hamatum</i>

고온 단계에서 퇴비 온도는 50~60℃로 유지되지만 때에 따라서 온도가 60℃ 이상 상승하면 퇴비 중의 고온성 박테리아 및 방선균 조차 모두 사멸하고 열에 견딜 수 있는 포자형성 박테리아만 남게 되어 퇴비화 효율이 급격히 떨어진다. 퇴비화 진행이 65~70℃의 고온에서 빨리된다고 알려진 것은 잘못된 지식이며, 여러 미생물학자들의 실험에 의해 퇴비화는 40~55℃에서 가장 효율적으로 진행됨이 판명되었다.

고온 단계의 퇴비에서 발견되는 고온성 미생물들의 종류는 표 14.2와 같다.

### (3) 숙성 단계

고온성 미생물의 작용에 의한 분해가 끝나면 대부분의 분해 가능한 유기물이 제거되었기 때문에 분해속도가 느려지고 퇴비 온도도 40℃ 이하로 떨어진다. 이때 다시 중온성 미생물이 재정착을 하는 데 초기 단계의 미생물 종류와 밀도와는 차이가 있다. 왜냐하면 숙성 단계의 유기물들은 상당부분이 더 이상 분해가 쉽지 않는 부식질(humus)이기

표 14.2 퇴비로부터 분리된 고온성 박테리아, 방선균 및 곰팡이

박테리아	방 선 균	곰 팡 이
<i>Bacillus stearothermophilis</i>	<i>Micromonospora vulgaris</i>	<i>Absidia ramosa</i>
	<i>Nocardia brasiliensis</i>	<i>Aspergillus fumigatus</i>
<i>B. licheniformis</i>	<i>Pseudonocardia thermophila</i>	<i>Byssochlamys</i> sp.
	<i>Streptomyces rectus</i>	<i>Chaetomium thermophile</i>
<i>B. subtilis</i>	<i>S. thermofuscus</i>	<i>Humicola insolens</i>
	<i>S. thermophilus</i>	<i>H. griseus</i>
<i>B. coagulans</i>	<i>S. thermovulgaris</i>	<i>H. lanuginosa</i>
	<i>S. violaceruber</i>	<i>Malbranchea pulchella</i>
<i>B. circulans</i>	<i>Thermoaactinomyces</i>	<i>Mucor pusilus</i>
	<i>vulgaris</i>	<i>Sporotrichum thermophile</i>
<i>B. brevis</i>	<i>Themonospora curvata</i>	<i>S. chlorinum</i>
	<i>T. fusca</i>	<i>Stilbella thermophila</i>
<i>B. sphaericua</i>	<i>T. glaucus</i>	<i>Talaromyces duponti</i>
	<i>Thermopolyspora polyspora</i>	<i>Thermoascus curanticus</i>
		<i>Torula thermophilus</i>

때문이다. 부식질은 리그닌(lignin) 함량이 높고, 가용 영양분의 함량이 낮기 때문에 이러한 환경에 적합한 방선균이 많아진다.

물리·화학적 환경변화

퇴비화 과정의 물리·화학적 변화는 거의 모두가 생물작용의 결과 생기는 것으로 미생물에 의한 생화학적 분해작용 이외에도 지렁이나 미소곤충에 의한 작용도 중요한 역할을 한다. 유기성 폐기물은 탄수화물(cellulose, pectin, 전분 등), 단백질, 지질과 무기염류 등으로 구성되어 있다. 유기성 폐기물은 보통 탄소가 40~50%(건조 중량비)를 차지하는데, 이것의 일부는 균체형성에 쓰이고 일부는 산화에 의해 성장 에너지로 사용되어 최종적으로 CO<sub>2</sub>로 변화된다.

(1) 물리적 변화

퇴비화가 진행되면 유기물의 산화분해로 인한 열이 발생되어 퇴비 더미 속의 온도가 60℃까지 상승하고 그 후 다시 실온으로 냉각된다(그림 14.1). 온도변화와 함께 퇴비 내의 수분, 산소량 등도 줄어드는데 산소는 기계적인 교반으로 공급해 줄 수 있다. Windrow system의 경우 퇴비화가 진행될수록 폐기물 더미의 부피와 높이가 줄어드는데 이 결과 퇴비 내의 공극(porosity)이 줄고 수분함량(water tension)이 증가되어 혐기상태가 유발되기도 한다.

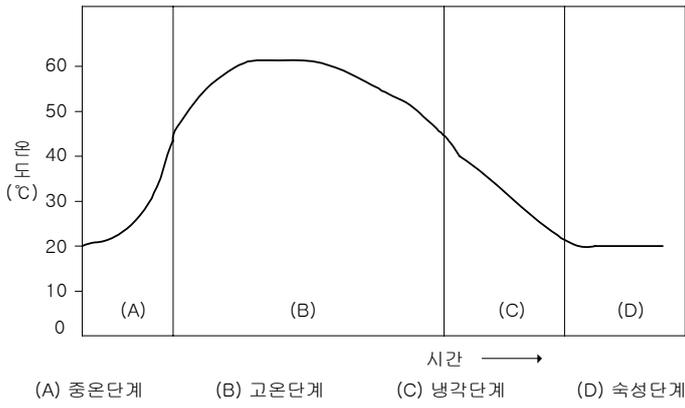


그림 14.1 퇴비화 진행 단계별 온도변화

(2) 화학적 변화

퇴비화가 진행되면 총유기탄소(total organic carbon)의 함량이 처음보다 30 % 정도 감소하며 아미노산과 저급 지방산의 양도 많이 감소한다. 유기 탄소/질소비(탄질비)도 처음의 26에서 최종적으로 5~6으로 변한다.

유기물이 분해되어 부식으로 형성되는 과정에서 pH도 변화한다. 식물체 성분을 퇴비화할 때 처음에는 미생물이 산을 생성하여 pH가 낮아진다. 그 후 암모니아가 생성되면서 알칼리성으로 전환되었다가 부식이 형성됨에 따라 이것의 완충능력으로 인하여 다시 중성인 pH 7~8로 돌아온다(그림 14.2). 산에 의해 pH가 낮아졌을 때는 초산 또는 부티르

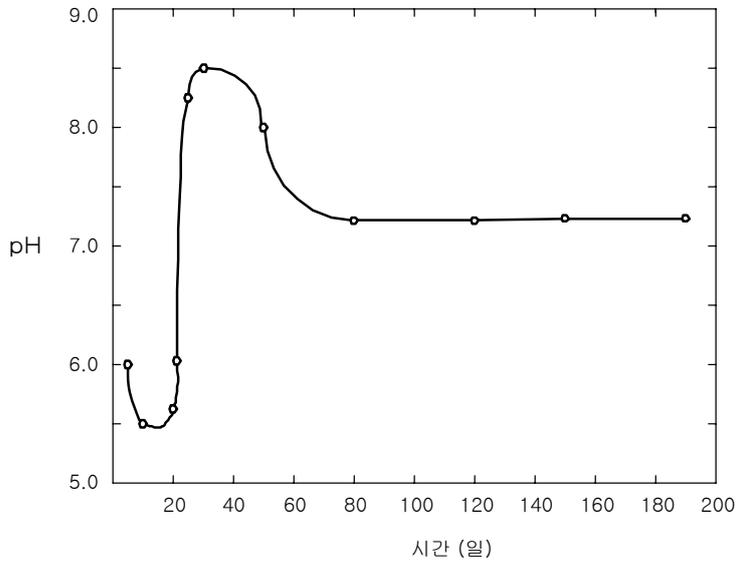


그림 14.2 식물성 폐기물의 퇴비화 과정에서 pH의 전형적인 변화

산(butyric acid)의 냄새가 감지된다. 그러나 퇴비화 조건에 따라서는 pH가 일정하게 유지되는 경우도 있다.

### 14.1.3 퇴비화 공정의 주요 환경인자

퇴비화 공정을 설계하는 데 있어 가장 우선적으로 고려되어야 할 사항은 미생물의 성장과 분해활동에 가장 적합한 환경요인, 즉 온도, 공기, pH, 수분과 유기물질의 탄질률을 최적화하는 것이다.

#### 온도

퇴비화 진행과 함께 일어나는 온도변화를 추적하면 퇴비화가 어느 정도 진행되고 있는지를 알 수 있다. 퇴비더미 내에서도 위치에 따라 온도편차가 발생하는 데 더미 외부는 상온이 유지되나 내부로 들어갈수록 퇴비자체의 단열효과로 인하여 온도가 높아진다. 퇴비화 중 최고 온도가 60℃를 넘지 않도록 조절하는 것이 퇴비화의 효율성을 높일 수 있다.

#### 공기

퇴비화 과정은 주로 유기물의 호기적(aerobic) 산화분해이기 때문에 산소의 존재가 필수적이다. 퇴비화 과정에서 공급되는 공기는 미생물이 호기적 대사를 할 수 있도록 하고, 온도를 조절하며, 수분, CO<sub>2</sub> 및 다른 기체들을 제거하는 역할을 한다. 그러나 과도하게 많은 공기를 공급하면 필요한 수분이 제거되고 겨울철에는 퇴비온도가 저하되어 퇴비화가 늦어진다.

#### pH

퇴비화를 위해 적합한 pH 범위는 폐기물 발생장소에 따라 차이가 있겠지만 대략 미생물의 생장이 활발한 pH 5.5~8.8로서 퇴비화 진행중의 전형적인 pH 변화는 앞의 그림 14.2에서 나타난 바와 같다.

#### 수분

퇴비 중의 수분함량은 미생물의 활동에 결정적 영향을 미치는 환경요인이다. 퇴비화 과정 중 수분함량은 퇴비 내의 조건에 따라 증가하기도 하고 감소하기도 한다. 퇴비화에 적당한 수분함량은 50~60%이다. 40% 이하가 되면 분해효율이 감소하고 60% 이상이 되면 기공 내로 산소확산(oxygen diffusion)이 잘 되지 않아 혐기성 발효가 일어나 악취가 발생하거나 퇴비화 효율이 떨어진다.

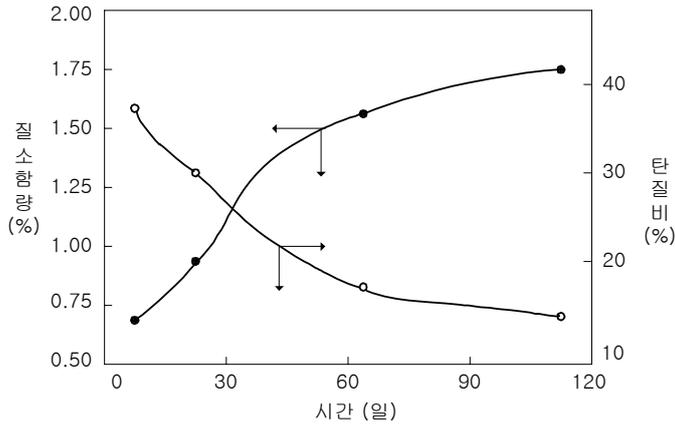


그림 14.3 부패하는 질 속의 질소함량 및 탄질비(C/N)의 변화

### 탄질비

유기성 폐기물의 탄질비(탄소/질소비)는 효과적으로 퇴비화를 진행시키기 위해 가장 중요한 인자이다. 탄소는 미생물들이 성장하기 위한 에너지 생성 및 탄소골격 물질의 합성에 사용되고, 질소는 생장에 필요한 단백질 합성에 주로 쓰인다. 탄질비는 분해대상 유기성 폐기물에 따라 다른데, 처음에는 높다가 분해가 진행될수록 낮아져서 최종적으로 미생물 세포자체의 탄질비(5~15)와 비슷해 질 때까지 감소한다.

### 숙성도

퇴비화가 완료된 시점을 정확히 결정하는 것은 퇴비화 시스템의 효과적 운용 측면에서 볼 때 중요하다. 그러나 아직까지 여러 가지 폐기물에 공통적으로 적용될 수 있는 퇴비화의 완료정도, 즉 퇴비 숙성도(compost maturity)를 나타내는 뚜렷한 지표가 없다. 폐기물의 종류에 따라서 온도, CO<sub>2</sub> 발생량, 탄질비, 식물생육 억제정도 등을 추적하여 퇴비화 숙성도를 간접적으로 알 수 있다.