

14장 대기오염 및 고체폐기물의 생물학적 처리

14.1 퇴비화

퇴비화(composting)는 비교적 고온(40~55 °C)에서 이루어지는 호기성(aerobic) 분해공정이며 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 있을 뿐만 아니라 퇴비의 질을 높일 수 있다.

(2) 생물학적 분해

퇴비화에는 2가지 기본적인 방식이 있다. Windrow 방식은 약 9m의 너비에 3m 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 30m에 폭 5m의 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 과정의 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. variens</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	방선균	곰팡이
<i>Bacillus stearothermophilis</i>	<i>Micromonospora vulgaris</i>	<i>Absidia ramosa</i>
<i>B. licheniformis</i>	<i>Nocardia brasiliensis</i>	<i>Aspergillus fumigatus</i>
<i>B. subtilis</i>	<i>Pseudonocardia thermophila</i>	<i>Byssosclamsy sp.</i>
<i>B. coagulans</i>	<i>Streptomyces rectus</i>	<i>Chaetomium thermophile</i>
<i>B. circulans</i>	<i>S. themofuscus</i>	<i>Humicola insolens</i>
<i>B. brevis</i>	<i>S. thermophilus</i>	<i>H. griseus</i>
<i>B. sphaericua</i>	<i>S. thermovulgaris</i>	<i>H. lanuginosa</i>
	<i>S. violaceruber</i>	<i>Malbranchea pulchella</i>
	<i>Thermoaactinomycetes vulgaris</i>	<i>Mucor pusilus</i>
	<i>Themonospora curvata</i>	<i>Sporotrichum thermophile</i>
	<i>T. fusca</i>	<i>S. chlorinum</i>
	<i>T. glaucus</i>	<i>Stilbella thermophila</i>
	<i>Thermopolyspora polyspora</i>	<i>Talaromyces duponti</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 차지하는 데, 이것의 일부는 균체형성에 쓰이고 일부는 산화에 의해 성장 에너지로 사용되어 최종적으로 CO₂로 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 줄어들는데 산소는 기계적인 교반으로 공급해 줄 수 있다. Windrow system의 경우 퇴비화가 진행될수록 폐기물 더미의 부피와 높이가 줄어들는데 이 결과 퇴비 내의 공극(porosity)이 줄고 수분함량(water tension)이 증가되어 혐기상태가 유발되기도 한다.

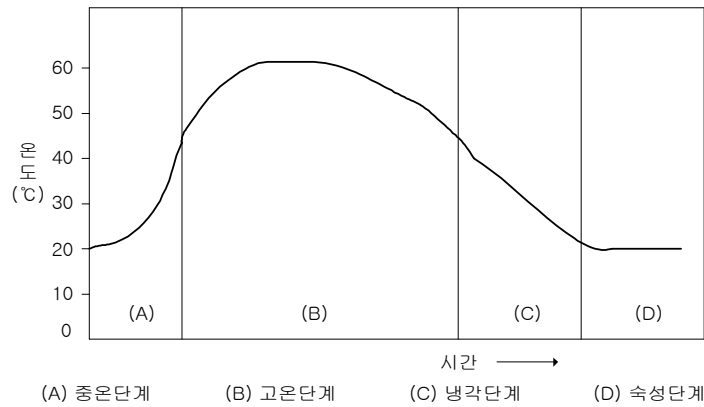


그림 14.1 퇴비화 진행 단계별 온도변화

(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

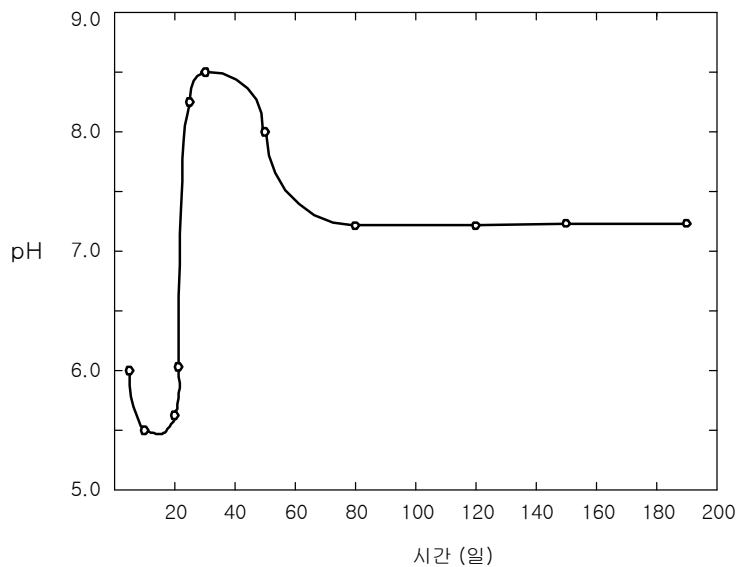


그림 14.2 식물성 폐기물의 퇴비화 과정에서 pH의 전형적인 변화

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 분해 활동에 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 °C를 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, CO₂ 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.

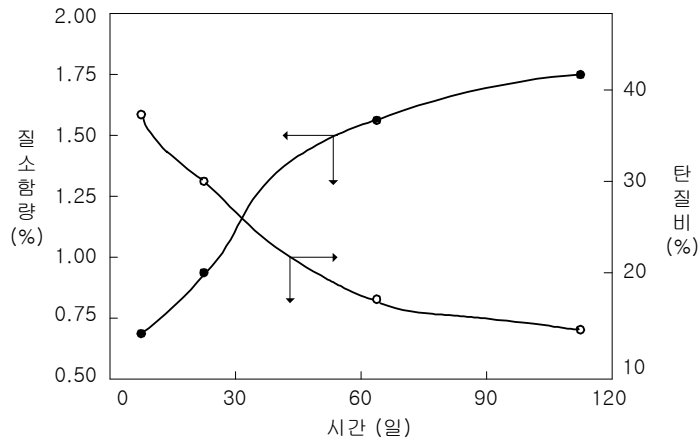


그림 14.3 부패하는 질 속의 질소함량 및 탄질비(C/N)의 변화

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, CO₂ 발생량, 탄질비, 식물생육 억제정도 등을 추적하여 퇴비화 숙성도를 간접적으로 알 수 있다.

14.2 토양처리법

토양처리법은 토양을 이용하여 다양한 오염물질을 물리적, 화학적 및 생물학적으로 해독 또는 분해시키는 방법이다. 토양처리법(land treatment)은 토양경작법(land farming)이라고도 하며 다양한 폐수 및 폐기물을 표층토양에 살포하거나 표층에서 수 cm 정도의 깊이에 기계적인 조작으로 주입한 후 방치하거나 경작(tilling)하여 여러 가지 반응, 특히 미생물에 의한 유기물 분해반응을 활용하는 방법이다.

처리속도를 최대한 증가시키기 위해서 폐기물 투여속도(waste loading rate), 토양 pH와 수분량을 조절한다. 또한 주기적으로 경작을 하여 산소공급을 용이하게 하고 폐기물 성분이 고르게 섞이게 하며 질소, 인 등의 무기 영양염류를 보충해 준다.

토양처리법은 특히 유기물 함량이 높은 폐수나 폐기물의 처리에 적합한 방법이며 통상적인 활

성 슬러지법이나 살수여상법 등으로 처리가 어려운 유해물질이 함유된 여러 가지 산업폐수나 폐기물 처리에 이용할 수 있다. 미국에서는 토양처리법이 자원보존 및 회복에 관한 법규 (Resource Conservation and Recovery Act)에 유해물질 처리방법(hazardous waste management)의 하나로 기재되어 있다.

14.2.1 폐기물 처리 도구로서 토양의 특성

토양은 다양한 크기의 미세서식지(microhabitat)로 이루어져 있으며 각 미세서식지의 물리, 화학적 성질이 다를 수 있다. 표층 15 cm까지 깊이의 토양에 들어 있는 미생물과 미소동물의 양은 헥타아르(ha) 당 0.5~4 t 정도이다. 이 미생물은 유기성 폐기물을 분해하여 탄소와 에너지원으로 이용하면서 성장하는 데 호기성 조건에서는 최종 생성물이 이산화탄소, 물과 기타 무기물 성분이 된다. 또한 토양의 산화 환원도에 따라 질소나 황화합물이 산화 또는 환원된다. 토양 미생물군은 안정되고 저항성이 있어서 독성물질의 유입 등 가혹한 조건에서도 짧은 시일 내에 이를 극복하고 원상태로 돌아올 수 있다. 이렇게 토양 미생물군이 난분해성 유기물을 분해할 수 있는 것은 미생물의 적응(adaptation)과 공동대사(cometabolism) 때문이다.

폐수 및 폐기물 처리에 관여하는 토양 미생물들의 역할은 다음과 같다.

- 1) 유기물 성분을 분해하며 각종 유기산, 메탄, 수소, 이산화탄소를 생성한다.
- 2) 암모니아 및 질산염을 기체질소로 탈질화시키며 시안화물을 무기질소 화합물로 변화시킨다.
- 3) 금속을 산화 또는 환원시킨다.
- 4) 폐기물 성분과 반응 또는 흡착할 수 있는 부식질(humic compound)과 같은 복합 유기화합물을 생성한다.

14.2.2 처리 가능한 폐기물의 종류

폐수와 폐기물에 중금속 등 유해물질이 비교적 적은 경우에는 경작지에 뿌려 농작물 생육에 이용할 수 있다. 이러한 폐기물의 예로는 동물성 분뇨, 하수 및 하수 슬러지 등이 있다. 농경지에 투여하기 곤란한 석유산업 폐기물, 전자산업 폐기물, 유기용매 등의 경우에는 삼림 또는 초지 등 비농경지에 투여하여 식물의 성장에 도움이 되게 한다. 그러나 중금속이나 유해성분이 다량 함유되어 있는 산업폐수 및 폐기물의 경우에는 전문적인 처리공간 내에서 본격적인 처리를 해주어야 한다(표 14.3).

표 14.3 토양처리에 적합한 산업폐기물의 예

산 업	폐기물 종류	유 해 성
석유정제	저장 탱크 찌꺼기	고농도의 니켈, 구리, 납
유기성 화학물질	폐수처리 슬러지	특정 화학물질 성분
목재 보존	폐수	크레오소트, pentachlorophenol
식품	폐수, 슬러지	고농도의 나트륨(Na)과 용해성 고형물
제약	폐기균사	고농도의 아연과 질산염
섬유	2차 폐수처리 슬러지	중금속

14.2.3 유류 슬러지의 토양처리

정유공장에서 나오는 원유정제 슬러지 등 탄화수소 농도가 높은(30~50%) 슬러지와 생물학적 처리공정에서 나오는 낮은 탄화수소 농도(5~10%)의 슬러지를 모두 토양처리법으로 처리할 수 있다. 미생물의 분해능을 증가시키기 위하여 1~4주 간격으로 경작하여 토양을 통기(aeration)시키고, 산성토양의 경우 탄산칼슘(CaCO₃) 성분의 석회를 이용하여 pH를 7.5내지 7.8정도로 조절하고, 질소와 인을 적절히 보충하여 C:N:P가 대략 500~1,000:5~15:1의 비율이 되게 한다. 탄화수소 분해에 가장 적합한 토양온도는 20~30℃이며, 15℃ 이하에서는 분해능이 훨씬 감소하며, 5℃ 이하에서는 분해가 거의 일어나지 못하므로 겨울철에는 분해가 잘 안 된다.

토양처리법은 정유공장 이외의 다른 소스(source)로부터 나오는 각종 유류함유 폐기물들도 처리할 수 있다. 특히 중간 증류물(middle distillate)인 제트유, 등유, 경유 등이 토양에 유출되었을 경우 효과적으로 이용될 수 있다.

14.3 생물학적 대기오염 처리

수질오염 및 토양오염과 마찬가지로 대기오염도 미생물을 이용하여 처리할 수 있다. 대기오염 물질은 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)과 악취성 무기화합물(malodorous volatile inorganic compounds, VICs)로 구성된다. 이 물질들은 암, 호흡기장애 등으로 시민의 건강을 위협할 뿐만 아니라 스모그(smog), 온실 효과, 오존 파괴, 산성비 등 환경과피의 주범이다.

대기오염 물질은 여러 소스에서 만들어진다. 음식물 쓰레기 퇴비화 시설, 공장, 하수 종말 처리장, 폐수 처리장 등에서 황화수소, 암모니아, 메르캡탄(mercaptan), 알코올, 케톤 등의 악취물질이 발생한다. 또한 표면 코팅공장, 목재공장, 펄프와 제지공장에서는 염화

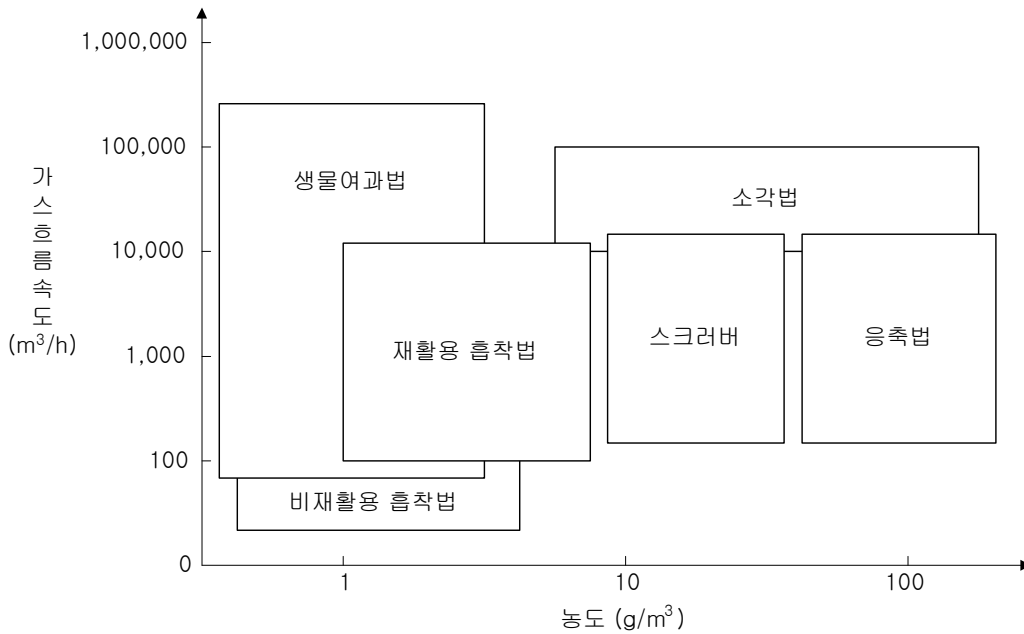


그림 14.4 가스흐름 속도와 농도에 따른 적절한 대기오염 제어기술

화합물, 메탄올, 페놀, 포름알데히드, 클로르포름 등의 VOC가 생성된다. 지하 유류 탱크에서 기름이 유출된 토양이나 지하수로부터 방향족(aromatic) 및 지방족(aliphatic) 탄화수소가 방출된다. 이러한 물질들은 부근 지역주민으로부터 민원발생의 요인이 된다.

대기오염 물질을 제거하는 방법에는 여기서 소개하는 생물여과법 이외에도 응축법, 소각법, 흡착법, 흡수법(스크러버) 등의 물리·화학적 방법이 있는데 배출되는 가스흐름 속도와 농도에 따라 적절한 방법을 선택하게 된다(그림 14.4). 생물여과법(biofiltration)은 1970년대 이후 발전되어 온 미생물을 이용한 대기오염물 처리법으로 1,000~50,000 m³/h 범위의 폐기가스 공급 속도와 1 g/m³ 정도의 오염물 농도에 대해 효과적이다.

휘발성 유기화합물(VOC) 중 저분자이고 단순한 구조의 물질(예: 알코올, 알데히드, 케톤) 및 일부 간단한 방향족 화합물(벤젠, 톨루엔 등)은 잘 분해되지만 페놀, 염화탄화수소 등의 물질은 분해속도가 느리다. 황화수소와 암모니아 등 무기화합물은 분해가 잘 된다. 이러한 분해도 차이는 미생물이 대상물질을 분해하는 데 필요한 효소를 갖고 있는지의 여부에 달려 있다.

생물여과법은 오염된 기체가스를 미생물이 부착된 다공성 지지체를 통과시켜서 기체가스 내에 함유된 유기 및 무기물질들을 미생물에 의해 대사하여 분해하는 것으로 탄소원의 경우 CO₂로 산화된다(그림 14.5).

생물여과기는 엄격한 의미로는 여과장치(filtration unit)가 아니다. 공기 중에 있는 오염

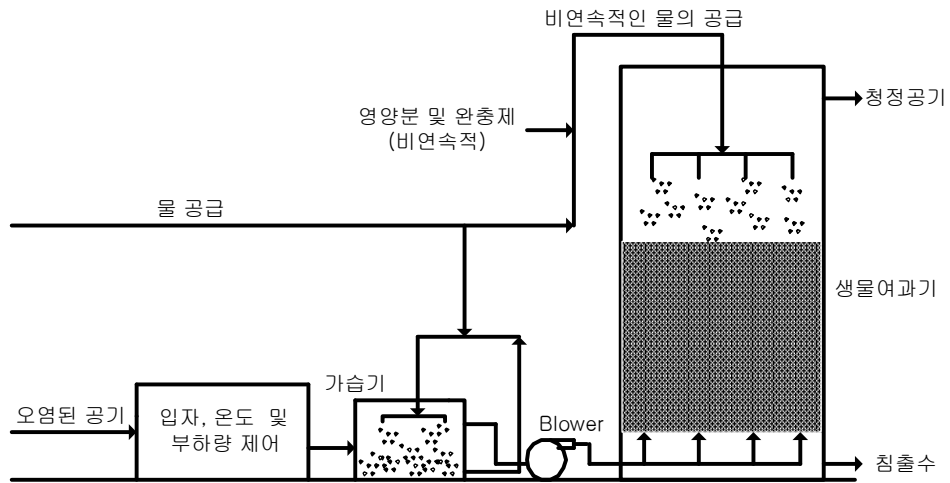


그림 14.5 생물여과기의 모식도

물은 생물막(biofilm)과 filter매체로 흡수되기는 하지만 결국은 미생물에 의해 분해되어 CO₂와 물이 생성된다(그림 14.6).

일반적으로 기체흐름은 생물여과기에 들어가기 전에 가습되어 진다. 그러나 수분함량이 높을 때에는 수분제거가 필요할 수도 있다. 생물여과기의 효율은 지지매체의 다공성, 보습능력 등에 의해 좌우되며 효율적인 미생물 혼합체를 사용하는 것이 중요하다. 생물여과기에 사용되는 미생물은 대개 처리장 부근에서 채취한다. 생물여과기 조작 변수로는

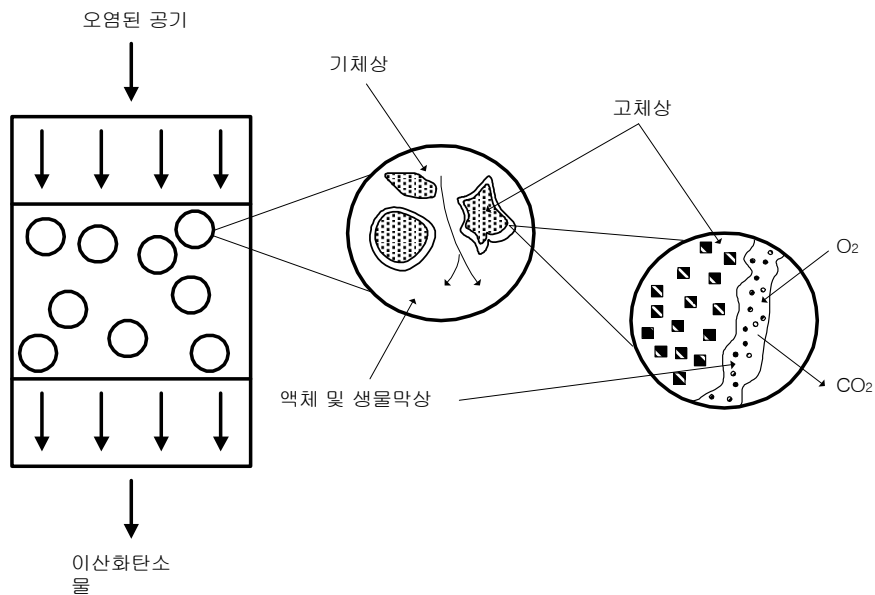


그림 14.6 생물여과기(biofilter)의 개략도

매체의 pH, 온도, 수분, 오염물의 농도 및 공급속도, 매체의 영양공급능력 등을 들 수 있다.

생물여과법은 악취제거, VOC와 유해 오염물질의 처리, 또는 탄화수소가스의 제거 분야에서 시장성이 크다. 미국에서 생물여과기의 시장 규모는 약 1억불로 추정된다.

