

12장 환경미생물 및 그 응용

12.1 환경 미생물의 종류

미생물은 바이러스(virus)와 원생생물(protists)로 구분 할 수 있다. 원생생물은 원핵생물(prokaryotes)과 진핵생물(eucaryotes)로 나누어진다. 원핵 미생물군(eubacteria 와 archaeobacteria)은 생물학적 처리에서 가장 중요하며, 일반적으로 박테리아(bacteria)라 불린다. 생물학적 처리에 중요한 진핵 미생물로는 균류(fungi), 원생동물(protozoa), 로티퍼(rotifer) 및 조류(algae)가 있다.

12.1.1 바이러스 (virus)

바이러스는 생물과 무생물의 중간적 성격을 띠고 있는 비세포성 미생물이다. 살아있는 세포 밖에서는 독립적으로 증식과 대사를 할 수 없고 항상 숙주생물에 기생하여야만 증식 할 수 있으므로 보통 숙주의 종류에 따라 구분한다.

동물성 바이러스는 보통 척추동물에 기생하며 이들이 일으키는 질병에 의해 소아마비 바이러스(polio virus), 광견병 바이러스(rabies virus) 등과 같이 명명된다. 식물성 바이러스는 숙주식물의 종류와 감염방법, 감염 후 나타나는 특이한 현상에 의해 구분하며, 담배 모자이크 바이러스(tobacco mosaic virus), 외소증 바이러스 등이 있다. 미생물 바이러스는 숙주 미생물에 따라 구분된다. 세균에 기생하는 바이러스를 박테리오파지(bacteriophage)라 한다. 미생물 바이러스는 바이러스가 흡착되는 숙주표면의 수용체 성격에 따라 숙주특이성(host-specificity)을 가진다.

표 12.1 원핵세포와 진핵세포의 차이점

특 성	진핵세포	원핵세포
세포핵(nucleus)		
핵막(nuclear membrane)	있음	없음
유사분열(mitosis)	있음	없음
염색체(chromosomes)	여러개	1개
세포질(cytoplasm)		
리보솜(Ribosomes)	80-s	70-s
미토콘드리아(mitochondria)	있음	없음
망상구조(endoplasmic reticulum)		
엽록체(chloroplasts)	조류에 있음	없음
리소솜(lysosomes)	있음	없음
골지체(Golgi apparatus)	있음	없음
편모(flagella)	2~9개	1개
세포벽(cell wall)	셀룰로오스, 키틴	무코펩티드(mucopeptide)
세포크기(cell size)	20 μ m 이하	5 μ m 이하

12.2.2 원생생물(protoists)

원생생물은 더 많이 분화(differentiation)된 세포인 진핵생물(eucaryotes)과 이에 비하여 분화 정도가 낮은 세포인 원핵생물(procaryotes)의 두 그룹으로 나누어진다(표 12.1). 크기에 있어 평균적으로 원핵생물이 진핵생물의 1/100정도에 불과하다. 원생동물, 조류, 균류는 진핵생물 집단에 속하고, 박테리아, 방선균, 남조류는 원핵생물 집단에 포함된다.

원핵생물(procaryotes)

(1) 박테리아(bacteria)

박테리아는 종(species)이란 공통적인 형질을 지닌 균주들의 집합체이며, 각 종의 기준이 되는 균주를 대표균주(type strain)라고 한다. 박테리아의 모양은 구형(spherical), 막대기형(또는 간균: cylindrical) 및 나선형(helical) 중의 하나의 형태를 띤다. 그리고 온도, pH, 산소 등의 환경조건은 박테리아의 생존과 성장에 중요한 영향을 미친다.

최적 활동온도의 범위에 따라 박테리아는 친한성(psychrophilic), 친온성(mesophilic) 및 친열성(thermophilic)으로 분류된다(표 12.2). 일반적으로 박테리아의 성장을 위한 최적 pH는 6.5~7.5 사이이며 대부분의 박테리아는 pH 9.5 이상 또는 pH 4.0 이하에서 살기 힘들다.

박테리아는 산소요구 정도에 따라 호기성(aerobic)과 혐기성(anaerobic)으로 구분된다. 호기성 박테리아 중에는 산소요구량이 적은 미세호기성(microaerobic) 박테리아가 포함되며, 혐기성 박테리아 중에는 산소에 노출되면 죽어버리는 절대혐기성(satrictly anaerobic)인 것들이 있다.

표 12.2 여러 미생물의 전형적인 온도 범위

종 류	온 도(℃)	
	범 위	최 적
친한성(psychrophilic)	-10 ~ 30	12 ~ 18
친온성(mesophilic)	20 ~ 50	25 ~ 40
친열성(thermophilic)	35 ~ 75	55 ~ 65

표 12.3 그람양성 구균의 특성

속(genus)	세포형태	산소	catalase	cytochrome
<i>Micrococcus</i>	송이형, tetrads	절대 호기성	+	+
<i>Staphylococcus</i>	송이형, 쌍구균	통성적 혐기성	+	+
<i>Streptococcus</i> , <i>Lactococcus</i>	사슬형, 쌍구균	통성적 혐기성	-	-
<i>Leuconostoc</i>	쌍구균, 사슬형	통성적 혐기성	-	-

표 12.4 그람음성 호기성 간균의 특성

과	속	특 성
Acetobacteraceae	<i>Acetobacter</i> <i>Gluconobacter</i>	에탄올을 초산으로 발효, 메탄 이용
Azotobacteraceae	<i>Azotobacter</i> <i>Azomonas</i>	일부 cyst형성, 주모성 또는 극성편모
Legionellaceae	<i>Legionella</i>	생장인자로 시스테인과 철분을 요구
Methylococcaceae	<i>Methylococcus</i> <i>Methylomonas</i>	탄소 및 에너지원으로 메탄 이용
Pseudomonadaceae	<i>Pseudomonas</i> <i>Xanthomonas</i> <i>Zoogloea</i>	다양한 탄소원을 이용
Rhizobiaceae	<i>Rhizobium</i> <i>Agrobacterium</i>	콩과식물의 뿌리혹 형성에 관여

박테리아는 진정박테리아(procaryote)와 고박테리아(archaebacteria)로 크게 나눌 수 있다. 진정박테리아는 Gram 염색에 대한 반응에 따라 그람음성과 그람양성 박테리아로 구분된다.

(2) 방선균(Actinomycetes)

방선균은 곰팡이처럼 균사(hypha)를 형성하며 이 균사는 모여서 균사체(mycelium)을 만든다. 그러나 균사의 직경이 0.7 μ m로서 곰팡이보다 작고, 원핵세포로서 세포벽 조성이 그람양성균과 비슷하므로 방선균은 곰팡이와 박테리아의 중간적인 성질을 가진 별도의 미생물로 분류된다. 방선균 중에서 액트노마이세티스(Actinomycetaceae)과의 *Actinomyces*는 호기성이며 병원성이다. *Nocardia*도 호기성이며 우수한 탄화수소 분해능력이 있어 기름유출 지역에서 잘 성장한다. 스트렙토마이세티스(Streptomycetaceae)과의 *Streptomyces*는 호기성이며 항생제를 생산한다. *Micromonospora*는 균사 끝에 단일 포자가 형성되며 호수의 진흙에서 발견된다.

*Thermoactinomyces*는 고온균이다.

(3) 남조류(Blue-green algae)

남조류는 절대적인 광합성 독립영양균(photoautotrophs)이며 탄소원으로 이산화탄소를 사용하고 에너지는 태양광선으로부터 공급받는다. 그리고 물을 전자공여체(electron donor)로 사용하여 유기 탄소화합물을 합성한다. 남조류의 형태는 구상(cocoid)과 사상(filamentous)으로 구분된다. *Anabaena*와 *Nostoc*은 일반적으로 구상이며 사상균으로는 *Oscillatoria*가 있다.

진핵생물(eucaryotes)

(1) 조류(algae)

조류는 광합성을 하는 진핵생물의 여러 그룹을 통칭하는 명칭이다. 조류는 생물학적 처리공정에서 호기성 또는 임의성 산화지(oxidation pond)를 효과적으로 운영하기 위하여 매우 중요하다. 조류가 호기성 유기영양성 박테리아에게 산소를 공급하는 공생 관계에 있기 때문이다. 조류는 아래의 표 12.5와 같이 분류된다.

표 12.5 조류의 분류

분류	색소	기타 특성	대표적인 속
녹조류 (green algae)	클로로필 a, b	단세포, 다핵체, 혹은 세포	<i>Chlorella</i>
홍조류 (red algae)	조홍소	대부분 다세포; 해양성	<i>Polysiphonia</i>
갈조류 (brown algae)	조갈소	다세포; 대부분 해양성	<i>Fucus</i>
규조류 (diatoms)	클로로필 a, c 크산토펜, 엽황소	단세포, 사상성, 혹은 다핵체; 규산염, 세포벽	<i>Asterionella</i>
쌍편모조류 (dionflagellates)	클로로필 a, b 카로티노이드	대부분 단세포 쌍편모에 의한 운동	<i>Noctiluca</i>

(2) 균류(fungi)

균류는 다세포의 진핵세포 생물로서 비광합성 종속영양 미생물이다. 대부분의 균류는 엄격한 호기성, 다핵성(coenocytic)이며, 균사체라는 영양세포가 얽혀 실모양을 하고 있다. 균류는 낮은 pH 상태에서도 잘 견딘다. 대부분의 균류의 적정 pH는 5.6이지만 pH 2~9범위에도 생존한다. 균류는 수분이 낮은 조건에서도 성장할 수 있으며 질소 요구량이 박테리아의 절반 정도에 불과하다. 이러한 낮은 pH 조건, 적은 질소요구량, 그리고 섬유소(cellulose) 분해능력 때문에 균류는 공장폐수의 생물학적 처리나 유기 고형물의 퇴비화(composting)에 아주 중요한 역할을 한다.

균류는 조상균류(Plycomycetes), 자낭균류(Ascomycetes), 불완전균류(Fungi Imperfecti) 및 담자균류(Basidionmycetes)가 있다. 조상균류에는 털곰팡이목(Mucorales)과 노균목(Peronosporales)이 있다. 불완전균류에는 담색선균과(Moniliaceae)와 암색선균과(Dematiaceae)가 있다. *Mucor* 와 *Rhizopus*는 털곰팡이 목에 속하며, *Penicillium*과

Aspergillus는 담색선균과에 속한다. Neurospora와 yeast 는 자낭균류에 속한다.

(3) 원생동물(protozoa)

진핵생물의 한 부류인 원생동물은 이분법으로 분열(binary fission)한다. 원생동물은 단세포 미생물이지만 박테리아보다 크며 박테리아를 에너지원으로 섭취한다. 예를 들어 생물학적 처리공정의 유출수 내의 박테리아 및 고형유기물을 섭취하여 제거한다. 원생동물을 분류하면 다음과 같다.

1) 육질충류(Sarcodina) : 위족으로 아메바 운동을 하여 이동한다.

예 : *Amoeba*, *Enatmoeba*

2) 편모충류(Mastigophora) : 편모운동을 하며 광합성을 하는 것이 다수있다.

예 : *Englena*, *Volvox*, *Giardia*

3) 섬모충류(Cilliophora) : 많은 섬모에 의한 동일 운동을 한다.

예 : *Paramecium*

4) 포자충강(Sporozoa) : 보통 비운동성이며 기생성이다.

12.2 혼합배양

의약 및 식품 산업에서는 순수 미생물을 배양하여 특정물질을 생산하는 경우가 대부분이지만 치즈 생산 등의 경우처럼 몇 가지 정의된(defined) 미생물의 혼합체를 사용하는 경우가 있다. 혼합배양의 극단적인 경우는 환경분야에서 미생물 혼합체를 사용하는 것으로 이때에는 혼합체 내의 미생물 분포에 대하여 명확히 정의되어 있지 않다.

한 미생물 혼합체 내에서 집단 사이의 상호작용은 특정한 집단에게 이익이 되는 반면, 다른 집단에게는 손해가 되기도 한다. 이러한 긍정적 또는 부정적인 상호작용은 혼합체

표 12.6 미생물 집단 사이의 상호작용

상호관계	정 의	상호작용의 효과	
		집단 A	집단 B
중립(neutralism)	상호작용이 없음.	효과 없음	효과 없음
편리공생(commensalism)	한 종의 생장이 다른 종에 의해 촉진됨.	효과 없음	긍정적 효과
상조공생(synergism)	서로 상대방의 생장을 촉진함.	긍정적 효과	긍정적 효과
상리공생(mutualism)	특정한 두 종이 반드시 서로를 필요로 함.	긍정적 효과	긍정적 효과
경쟁(competition)	일반적인 성장제한요소(기질)를 공통적으로 요구함.	부정적 효과	부정적 효과
편해(amensalism)	한 종이 생성하는 저해물질에 의해 다른 종의 생장이 억제됨.	효과 없음 또는 긍정적 효과	부정적 효과
기생(parasitism)	기생체가 숙주의 세포물질을 이용해서 성장함.	긍정적 효과	부정적 효과
포식(predation)	포식자가 피식자를 잡아 먹음.	긍정적 효과	부정적 효과

내의 집단 사이에 생태학적인 평형을 유지하게 한다. 미생물 집단 사이에서 나타나는 상호작용의 형태는 상호작용이 없는 경우(중립), 긍정적인 경우(편리공생, 상조공생, 상리공생), 부정적인 경우(경쟁과 편해), 한 집단에는 이익이 되나 다른 집단에 해가 되는 경우(기생과 포식)가 있다. 단순한 군집에서는 위의 상호작용 중 하나 또는 몇 가지가 관찰된다.

12.2.1 공 생

공생에는 편리공생, 상보공생 및 상리공생이 있다.

편리공생

편리공생(commensalism)이란 한 집단은 이익을 얻는 반면 다른 집단은 어떠한 영향도 받지 않는 공생관계이다. 편리공생은 영향을 받지 않는 개체군이 정상적인 생장을 하는 과정에서 다른 개체군에 유리하게 작용할 수 있게 성장환경을 변형시킬 때 일어날 수 있다.

편리공생에서 타 집단에 이익을 주는 집단이 하는 일의 예를 들면 다음과 같다.

- 1) 통성혐기성 세균(facultative anaerobe)이 산소를 소모한다.
- 2) 성장인자(비타민, 아미노산 등)를 생성한다.

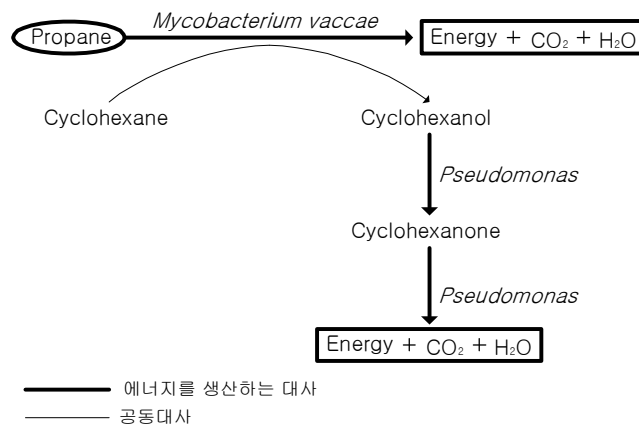


그림 12.1 공동대사에 기초한 편리공생의 예

- 3) 섬유소(cellulose)를 분해하여 올리고당과 포도당으로 만든다.
- 4) 독성물질(H₂S, Mn 등)을 제거 및 중화한다.

특정한 기질에서 자라고 있는 한 미생물이 자기 자신은 사용할 수 없는 다른 기질을 이유없이 산화하는 것을 공동대사(cometabolism)라 한다. 예를 들면, *Mycobacterium vaccae*는 프로판(propane)을 대사하여 사이클로헥산올(cyclohexanol)로 산화시킨다. *Pseudomonas* 집단은 사이클로헥산올을 대사하여 에너지를 만든다(그림 12.1). 따라서 사이클로헥산올을 이용할 수 없던 *Pseudomonas* 집단은 이익을 얻지만 *Mycobacterium*은 사이클로헥산올을 대사시킬 수 없으므로 아무런 영향도 받지 않는다.

상조공생

상조공생(synergism)이란 두 미생물 집단 모두가 이익을 얻지만 두 집단의 공생이 필수적이지는 않다. 상조공생의 예로 협동영양(syntrophism)이 있다. 이것은 필요로 하는 영양소를 둘 이상의 집단이 상호작용하여 공급하는 것이다. 예를 들어 *Streptococcus faecalis*와 *E. coli*는 모두 단독으로는 아르기닌을 푸트레신(putrescine)으로 변화시킬 수 없다. 그런데 *S. faecalis*가 아르기닌을 오르니틴(ornithine)으로 변화시킨 후에는 *E. coli*는 오르니틴으로부터 푸트레신을 생산할 수 있다(그림 12.2).



그림 12.2 *Streptococcus faecalis*와 *E. coli*의 상조공생

상조공생의 예는 다음과 같다.

- 1) *Azotobacter*가 고정화한 질소를 다른 토양세균이 이용하며, 다른 토양세균은 *Azotobacter*에게 유기물을 제공한다.
- 2) *Pseudomonas*에 의한 오르시놀(orcinol)의 대사는 다른 미생물이 그 대사산물을 소모하여 제거하여 줌으로써 되먹임제어 작용이 발생하지 않으므로 생장이 더욱 촉진된다.

상리공생

상리공생(mutualism)은 공생(symbiosis)이라고도 하며 상조공생의 특수한 경우로 두 집단 사이의 관계가 의무적인 경우이다. 두 집단이 상리공생 관계이면 단독으로는 생존할 수 없었던 서식지에서 생존이 가능하다. 예를 들어 지의류에서 조류와 균류는 상리공생을 한다. 조류공생자(phycobiont)인 시아노박테리아(cyanobacteria)와 녹조류 등은 광합성을 하여 균류에 유기물을 제공한다. 자낭균류 등으로 구성된 균류공생자(mycobiont)는 무기영양염류나 성장인자를 공급하고 조류공생자를 보호한다.

지의류는 건조나 온도변화 등에 대한 저항성이 크다. 그러나 대기오염으로 아황산가스(sulfur dioxide)의 농도가 증가하면 조류공생자의 엽록소가 파괴되어 사멸하게 된다. 이때 균류 단독으로는 그 서식지에서 생존할 수 없게 된다. 이러한 성질을 이용하여 지의류를 대기오염의 지표생물(indicator organism)로 사용할 수 있다.

12.2.2 경쟁 및 편해

경쟁(competition)은 생존과 생장의 측면에서 불리하게 영향을 받는 두 집단 사이의 부정적인 관계이다. 경쟁이 있으면 세포의 최대 밀도(maximal density) 및 성장률이 낮아진다. 경쟁은 하나의 공간이나 제한된 영양소(탄소, 질소, 인, 산소, 물 등)를 두 집단이 같이 이용하고 있을 때 발생한다. 경쟁적 배제(competitive exclusion)란 한 집단은 경쟁에서 이기고 다른 집단은 제거되기 때문에 두 집단이 생태적으로 분리되는 것을 말한다.

한 미생물 집단이 경쟁관계에 있는 다른 집단에게 유독한 물질을 생성할 수 있을 때 집단 사이의 관계를 편해(amensalism)라 한다. 이때 저해물질을 생성하는 집단은 이 물질에 의해 아무런 영향을 받지 않거나 또는 다른 집단이 저해되기 때문에 반사 이득을 얻는다. 항생작용(antibiosis)과 상대독성(allelopathy) 등이 화학물질 저해의 주된 작용이다. 예를 들어 젖산 등 저분자량의 지방산 생성 및 항생물질 생산은 많은 세균집단에 저해작용을 나타낸다.

12.2.3 기생 및 포식

일반적으로 작은 기생물(parasite)이 큰 숙주(host)로부터 영양물을 얻으며 살아가는 관계를 기생이라고 하는 데 기생물은 숙주의 내부(endoparasite) 또는 외부에(ectoparasite) 존재한다. 기생물-숙주 관계는 매우 특수해서 기생물이 특정한 숙주에만 기생할 수 있는데 이러한 현상을 숙주특이성(host specificity)이라 한다. 숙주특이성은 보통 물리적인 부착이 가능한 생물체 세포의 표면특성에 의해 일어난다. 기생을 하는 대표적인 것으로 바이러스가 있는데 바이러스는 박테리아, 균류, 조류, 원생동물 모두에 기생할 수 있다. 기생의 다른 예로 *Bdellovibrio* 라는 박테리아가 다른 그람음성 박테리아에 기생하는 경우가 있다. 이 박테리아들은 강한 회전으로 다른 박테리아의 세포벽을 뚫고 들어가 세포벽과 세포막 사이(periplasmic space)에서 자라나는 특이한 종류이다.

미생물 세계에서는 기생과 포식(predation) 사이의 구분이 명확하지 않다. 예를 들면,

Bdellovibrio 와 감수성이 있는 그람음성 세균 사이의 상호작용을 기생관계로 보기도 하고 포식의 관계로 보기도 한다. 포식은 먹는자(포식자: predator)인 한 생물이 먹히는자(피식자: prey)인 다른 생물을 섭취하여 소화시킬 때 전형적으로 일어난다.

포식자와 피식자는 상호작용에 의해서 그 수가 정기적으로 순환적인 변동을 한다. 각 순환에서 피식자 집단이 증가함에 따라 포식자의 집단도 증가하다가 피식자의 증가율을 추월하면 피식자가 감소한다. 이러한 감소는 포식자의 수효가 피식자 집단이 다시 증가할 수 있는 수준으로 떨어질 때까지 계속되며, 피식자 집단이 증가하기 시작하면 포식자도 다시 증가한다. 이론적으로 이러한 포식자-피식자 집단은 순환을 계속한다.

편모충류 원생동물에 의한 포식은 수계에서 박테리아 집단을 비교적 안정적으로 유지하는 데 필수적이다. 이러한 섭식활동은 먹이사슬 내에 탄소를 유지시키는 작용을 한다. *Paramecium*, *Vorticella*, *Stentor* 와 같은 섬모충류 원생동물은 *Enterobacter aerogenes* 와 같은 평균적인 피식자인 박테리아보다 $10^3 \sim 10^4$ 배의 세포질량을 나타낸다.

12.2.4 혼합배양의 산업적 이용

식품생산에 혼합배양이 사용되는 대표적인 예는 치즈 제조이다. 저온 살균된 신선한 우유에 정의된(defined) 젖산균의 혼합물을 접종함으로써 다양한 형태의 치즈가 생산된다. 젖산생산에 사용되는 박테리아는 혼합배양되는 *Streptococcus* 와 *Lactobacillus*의 여러 가지 종들이다. 맛과 향을 내기 위해서 이용되는 미생물로 *Brevibacterium linens*, *Propionibacterium shermanii*, *Leuconostoc* 종, *Streptococcus diacetylactise* 등이 있다.

옥수수과 완두콩 폐기물은 *Trichoderma viride* 와 *Geotrichium* 종의 혼합배양에 의해 처리된다. 여기서 두 균주는 아밀레이즈를 생산하는 데 *T. viride*는 셀룰로오스를 환원당 분자로 분해하고, *Geotrichium*은 녹말을 환원당(reduced sugar) 분자들로 쪼갬다.

*Pseudomonas*의 어떤 종(species)은 메탄을 메탄올로 산화시킨다. 이때 *Hyphomicrobium* 같은 메탄올을 사용하는 박테리아를 성장배지에 포함시키면 *Pseudomonas*가 메탄올에 의해 저해 받는 문제점을 제거할 수 있다. 이와 같은 상호관계는 *Pseudomonas*가 *Hyphomicrobium*에게 탄소원(메탄올)을 제공하고 *Hyphomicrobium*은 *Pseudomonas*의 성장 저해물질(메탄올)을 제거해 준다는 의미에서 상리적이다.

혼합배양의 가장 일반적인 경우는 바이오필터(biofilter)를 이용한 대기 중의 휘발성 무기 및 유기화합물 처리, 활성 오니 반응조를 이용한 폐수 내의 유기물과 난분해성 화합물의 처리, 음식물 쓰레기의 퇴비화 등이라고 할 수 있다. 이러한 혼합배양에 사용되는 미생물들은 그 종류가 명확히 정의(defined)되어 있지 않은 혼합체이다.

12.3 환경 미생물의 응용

환경 미생물이 응용되는 분야는 오염물질의 처리와 유용물질의 생성이다. 오염물질의 처리는

대기오염, 수질오염, 토양오염 및 고체폐기물의 처리이다. 유용물질의 생산은 연료 및 생분해성 플라스틱의 생산, 원유 및 금속의 회수 등이 있다.

12.3.1 수질오염, 대기오염 및 고체폐기물의 처리

생물학적인 폐수처리는 주로 미생물을 이용하여 폐수 내의 오염물질을 분해 및 해독시키는 것으로 유기물질을 이산화탄소나 메탄가스의 형태로 전환시켜 제거하는 방법이다. 자세한 내용은 13장에 설명되어 있다.

생물학적 대기오염 처리는 공기에 존재하는 휘발성 오염물을 분해하기 위하여 고정화된 미생물이 충전된 생물여과기(biofilter)를 이용한다. 유기성 고체폐기물은 고온성 호기 분해공정에 의해 퇴비화(composting)된다. 대기오염 및 유기성 고체 폐기물 처리에 관해서는 제14장에 상세히 설명되어 있다.

12.3.2 미생물에 의한 생분해성 플라스틱 생성

고체폐기물로서의 문제점 때문에 분해가 가능한 플라스틱의 개발이 많이 진행되었다. 생분해성 플라스틱은 그 얻는 방법에 따라 미생물 고분자, 천연 고분자 및 합성 고분자로 구분되며 미생물이 체외로 배출하는 분해효소(enzyme)의 작용으로 분해된다. 분해효소는 플라스틱의 긴 고분자사슬을 연결하고 있는 각종 화학결합(에스터 결합, 글리코시딕 결합, 펩티드 결합)을 가수분해반응에 의해 차례로 절단하여 분자량이 작은 유기산, 포도당, 아미노산으로 분해한다. 이들 저분자물질은 미생물 체내로 쉽게 흡수되어 대사경로를 거쳐 이산화탄소와 물로 분해된다. 따라서 생분해성 플라스틱은 더 이상 고체폐기물이 아니라 완전 분해되어 형태가 없어지게 된다. 이상적인 생분해성 플라스틱이란 사용기간 중에는 우수한 물리화학적 성능을 유지하다가 폐기 후에는 자연계에 존재하는 미생물에 의해 쉽게 분해되어 흙 속의 유기물 성분이나 이산화탄소와 물이 되어야 한다.

효소에 의한 플라스틱의 분해속도는 플라스틱의 분자구조에 의해 크게 좌우된다. 자연환경 중에서 빨리 분해되는 플라스틱을 개발하기 위해서는 효소에 의한 분해속도가 빨라야 할뿐만 아니라 환경 중에 해당 분해효소를 분비하는 미생물이 보편적으로 존재하여야 좋다. 생분해성 플라스틱은 그 분해생성물이 미생물에 의해 완전히 분해되어 환경 중에 잔류 또는 축적되지 않아야 한다. 분해생성물이 환경 속에 잔류하는 경우에는 그 잔유물의 안전성을 확인할 필요가 있다.

미생물이 만드는 분해성 플라스틱에는 폴리에스터, 당류(셀룰로오스, 카드란, 플루란 등), 폴리 아미노산(폴리글루타민산, 폴리로신) 등이 있다.

폴리에스터

poly- β -hydroxybutyrate(PHB)계 고분자는 미생물에 의해 생산되어 그 체 내에 저장되는 (intracellular) 폴리에스터(polyester)계 고분자로서 그 종류에는 PHB 단일 중합체

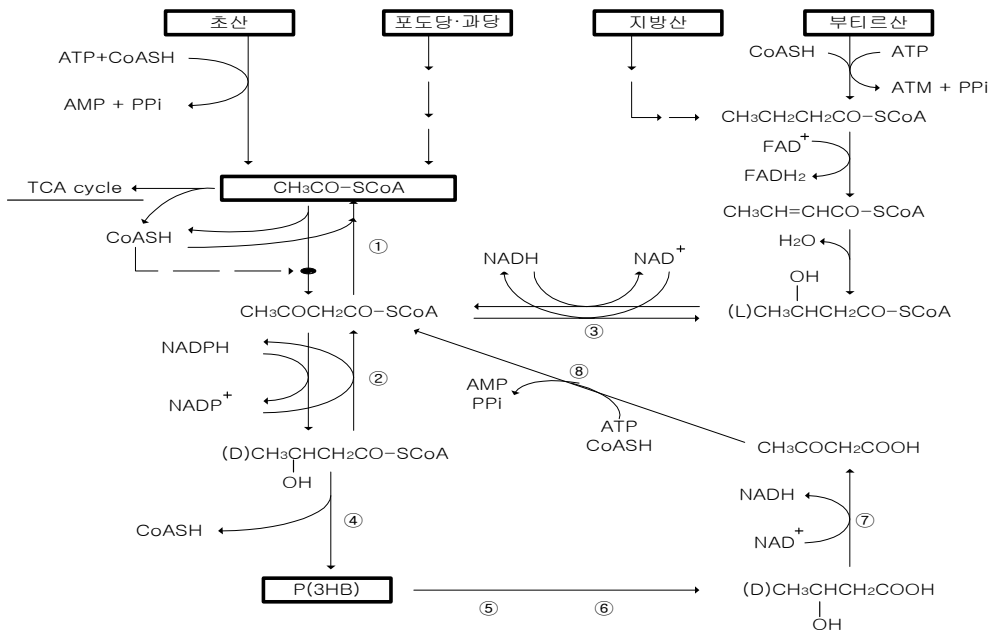
(homopolymer), poly-β-hydroxybutyrate-valerate(PHBV) 공중합체 (copolymer) 및 polyhydroxyalkanoates (PHA) 등이 있다.

PHB계 고분자는 미생물이 만드는 고분자 중에서 기존의 합성고분자와 물성이 가장 유사한 고분자이며, 특히 폴리프로필렌(polypropylene)과 폴리에스터(polyester) 중간 정도의 물성을 가지고 있다. 미생물이 생합성하는 폴리에스터계 고분자의 전형적인 예는 3-hydroxybutyrate(3HB)이며 단량체가 1만 개 이상 결합되어 있다.

PHB를 생합성하는 미생물은 탄소원(세포에게 필요한 탄소와 에너지의 공급원이 되는 물질)이 풍부한 환경하에서 PHB를 생합성하여 체내에 저장하였다가 탄소원이 없는 환경이 되면 PHB를 분해하여 생명활동의 에너지원으로 이용한다. 따라서 PHB는 동물의 지방이나 식물의 전분(starch)과 유사한 생리적 기능을 가진 물질이라 할 수 있다.

(1) PHB의 생합성 경로

PHB계 고분자가 미생물에 의해 생합성 및 분해되는 경로는 우선 탄소원(포도당 등 당류, 유기산, 알코올, 이산화탄소 등)이 여러 대사경로를 거쳐 활성아세트산이 된다. 이 활성아세트산은 보통 크렙스 회로(TCA 회로, 시트르산 회로)라는 경로에 도입되어 아데노신 삼인산의 형태로 에너지를 생산하고 아미노산 합성에 이용되는데, 만일 탄소원 이외의 성분 중에서 미생물 생장에 필수적인 어느 성분(예: 질소, 산소, 인 등)의 양이 제한을 받게 되면 크렙스 회로에 도입되던 활성아세트산의 양이 감소하여 활성아세트산이 축적된다. 미생물은 이를 신호로 하여 활성아세트산을 PHB로 변화시키는 효소 시스템을 작동시키게 되고 생산된 PHB는 미생물 체내에 축적하게 된다.



동그라미내의 번호는 아래의 효소를 나타낸다.
 1, 3-ketothiolase ; 2, NADPH-linked acetoacetyl-CoA reductase ;
 3, NADH-linked acetoacetyl CoA reductase ; 4, P(3HB) synthase ; 5, P(3HB) depolymerase ;
 6, D(-)-3-hydroxybutyrate-dimer hydrolase ; 7, D(-)-3 hydroxybutyrate dehydrogenase ;
 8, acetoacetyl-CoA synthetase.

- ① 1,3-ketothiolase ; ② NADPH-linked acetoacetyl-CoA reductase ;
- ③ NADH-linked acetoacetyl CoA reductase ; ④ P(3HB) synthase ; ⑤ P(3HB) depolymerase ;
- ⑥ D(-)-3-hydroxybutyrate-dimer hydrolase ; ⑦ D(-)-3 hydroxybutyrate dehydrogenase ;
- ⑧ acetoacetyl-CoA synthetase.

그림 12.3 PHB의 생합성 및 분해를 나타내는 순환 대사경로

및 분해를 나타내는 순환 대사경로를 나타내었다.

(2) PHB 계열의 공중합체(copolymer)

PHB는 3-hydroxybutyryl(3HB)이 직선모양으로 연결된 단일중합체(homopolymer, 한가지 종류의 단량체들이 중합되어 합성된 고분자물질)이며 탄소수가 짝수인 탄소원을 이용하여 만들어진다. PHB는 유연성이 부족하여 필름이나 섬유로 가공하기 어려운 단점이 있기 때문에 PHBV라는 공중합체를 만든다. PHBV는 미생물에 홀수의 탄소수를 가진 물질(예: 프로피온산, 프로판올 등)이 포함된 탄소원을 공급하여 생산한다.

PHB나 PHBV는 주로 *Alcaligenes eutrophus*(=*Ralstonia eutropha*) 균주를 이용하여 생산되나 사용가능한 탄소원이 제한되어 있다. 반면 *Pseudomonas* 계열의 미생물은 normal alkane, alkanolic acid, alkanol, alkandiol 등 다양한 탄소원을 이용하여 새로운 형태의 미생물 폴리에스터를 만들어 낸다. 최근에는 대장균(*E. coli*)에 PHB(V) 생성유전자를 도입하여 생산성을 크게 향상시켰으며, *Azotobacter vinelandii*를 이용한 생산도 보고되었다.

(3) PHB계 고분자의 물성 및 용도

PHB는 석유화학에서 유래된 합성 플라스틱에 비해 물성이 떨어지나 3HV를 포함하는 3HB/3HV 공중합체(PHBV)는 결정화도가 낮고 유연성이 높아 합성 플라스틱에 좋은 물성을 가지고 있다. PHB계 고분자는 인체에 독성이 없고 생체조직에 대한 적합성이 있고 생체 내에서 분해되기 때문에 수술용 봉합, 수술용 슝, 접골 이음새 등의 의료용품으로 사용되어질 수 있다. 또, 서방성(약물의 방출속도를 조절할 수 있는 특성)을 이용한 약물 전달 수단, 압전성을 이용한 압전소자, 광학적인 활성을 이용한 이성체 분리용 컬럼 충전제, 무독성을 이용한 식품포장 재료 등 기존의 합성 플라스틱이 사용되기 어려운 여러 분야에 응용될 수 있는 천연 폴리에스터이다.

표 12.7 PHB계열의 공중합체

종 류	구 조	특 징
3HB/3HV (PHBV)	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{-(O-CH-CH}_2\text{-C-)}_x\text{-} \end{array} \begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{-(O-CH-CH}_2\text{-C-)}_y\text{-} \end{array}$ <p style="text-align: center;">3HB 3HV</p>	용융점 130~160℃ 결정화도 낮고 유연성 있음 가공이 용이함
3HB/4HB	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{-(O-CH-CH}_2\text{-C-)}_x\text{-} \end{array} \begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{-(O-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-C-)}_y\text{-} \end{array}$ <p style="text-align: center;">3HB 4HB</p>	4HB가 40% 이상이면 고무와 같은 탄성체 폴리 에틸렌과 유사한 물성

(4) PHB계 고분자의 생분해성

PHB는 자연계에서 미생물에 의해 탄산가스와 물로 완전히 분해된다. Doi 등은 토양에서 분리한 *Alcaligenes faecalis* 라는 균주에서 정제해낸 PHB 분해효소를 이용하여 미생물 폴리에스터의 생분해되는 속도를 조사한 결과 PHB/4HB 공중합체 필름이 가장 빨랐으며 그 다음이 순수 PHB 필름이었고, 3HV를 포함하는 PHB/HV 공중합체의 분해속도가 가장 느렸다. 토양 내에서 PHB의 분해는 토양 미생물이 분비하는 고분자 분해효소나 에스테르화 효소 등의 작용에 의해서 뿐만 아니라 가수분해 작용에 의해서도 일어난다. 두께 70μm의 PHB계 고분자 필름의 경우 3HB와 3HV 공중합체는 토양에 매몰한지 100일 정도 지난 후 분자량이 저하되기 시작한다. 반면, 4HB 공중합체는 20~30일 정도가 지난 후에 이미 분자량이 저하되기 시작하며 4HB의 함량이 증가할수록 생분해속도가 빠르다.

다당류(polysaccharide)

(1) 카드란

카드란은 미생물이 생산하는 다당으로 400~500개의 포도당이 β-1,3 결합에 의해 규칙적으로 이어져 있다. 포도당을 주원료로 하는 배지(미생물의 성장에 필요한 영양소들을 함유한 물질)를 이용하여 32℃에서 6일 동안 미생물을 배양하면 포도당 소모를 기준하여서 50%의 수율로 카드란이 생산된다. 알칼리를 가해 카드란을 용해하여 균체를 제거한 후 산으로 중화하면 침전이 생기고 이를 건조하면 백색의 분말이 된다. 카드란은 수산화나트륨 등의 알칼리 수용액에는 용해되지만, 물 또는 알코올 등의 유기용제에는 용해되지 않는다. 카드란 분말 2~5 중량%를 물에 분산시켜 열을 가하면 물을 포함하여 전체가 겔화한다. 카드란의 용도는 이 겔화하는 특성, 높은 식품안전성, 소화되지 않은 성질 등을 이용한 식품분야가 중심이 되고 있다. 예를 들어 형태가 변하지 않는 아이스크림의 제조, 기름의 겔화, 다이어트 식품 등에 이용될 수 있다.

(2) 플루란(pullulan)

플루란은 포도당 3개가 규칙적으로 연결된 기본단위가 계단모양으로 이어진 고분자 물질이다. 포도당 배지 내에서 효모의 일종인 *Aureobasidium pullulans* 을 30℃에서 1주간 배양하면 70%의 수율로 플루란이 생산된다. 배지의 수소이온 농도(pH)를 조정하면 고분자의 중합도를

12000정도까지 높일 수 있다. 발효가 끝난 후 배양액에서 균체를 제거하고 메탄올을 가하면 플루란이 침전된다. 플루란은 무미, 무취의 부정형 백색분말이며 이 분말은 열에 의해 용융되지 않고 250 °C 정도부터 분해가 시작된다. 물에는 빨리 용해되지만 알코올류, 아세톤, 에테르 등의 유기용제에는 전혀 녹지 않는다. 플루란은 물에 녹여 폴리에스터 필름 위에 얇게 흘리거나 작은 구멍으로 밀어내면서 열풍에 건조하거나 알코올로 탈수하여 필립 등으로 성형할 수 있다. 플루란의 수용액은 다당류 중에서 점도가 낮은 부류에 들어가며, 산, 알칼리, 또는 염류를 첨가하여도 점도가 안정하고, 카드란과 달리 열을 가하여도 겔화가 되지 않는다. 플루란은 점도증가제 등의 공업적 응용 이외에 식품분야 등에 폭넓게 이용되고 있다. 자연계에서는 완전히 분해되지만 동물의 체 내에서는 분해되지 않는 무칼로리의 식품재료이다.

(3) 박테리아 셀룰로오스(bacterial cellulose)

박테리아 셀룰로오스는 식초를 만드는 초산박테리아(*Acetobacter aceti*)에 의해 생산되며 식물 중의 셀룰로오스와는 달리 리그닌(lignin)과 헤미셀룰로오(hemicellulose)와 같은 불순물이 없는 순수한 셀룰로오스이다. 박테리아 셀룰로오스는 단당을 주원료로 하는 배지에 초산균을 30 °C에서 정치배양(보통 미생물 배양은 배지를 넣은 플라스크를 진탕기에서 흔들여 주는 반면 이 경우에는 플라스크를 선반 등에 그대로 놓아둠)하여 얻어진다. 한천모양의 물질이 생성되는데 이 중 1%가 셀룰로오스이고 99%가 물이지만 탄력이 있고 강하다. 초산박테리아는 호기성(미생물이 자라는 데 산소를 필요로 하는 성질)이기 때문에 공기가 접촉되는 배양조의 표면에서 얇은 막의 형태로 셀룰로오스가 생산되며 하루에 약 1 mm씩 두께가 증가한다. 한천상 물질을 알칼리에 씻어 균체를 제거하면 순수한 셀룰로오스가 얻어진다. 박테리아 셀룰로오스는 자연계에서 분해되나 동물의 체 내에서는 분해되지 않기 때문에 무칼로리 식품으로 이용할 수 있다. 박테리아 셀룰로오스를 구성하는 마이크로피브릴(microfibril)의 굵기는 목면(cotton)의 일천분의 일로 극히 가느다랗기 때문에 기능성 재료로의 개발이 기대된다. 한천상의 박테리아 셀룰로오스를 105 °C에서 압축 건조하면 물이 증발되고 마이크로피브릴의 표면이 서로 수소결합되어 시트(sheet) 모양이 된다. 이 시트는 종이보다 강하고 영률(Young's modulus)이 매우 크기 때문에 스피커나 헤드폰 내의 음향 진동판으로 사용될 수 있다. 또 마이크로피브릴은 표면적이 크며 보습성도 높기 때문에 효소를 부착시켜 생물반응기 내에서 이용하거나 인공피부의 응용이 검토되고 있다.

폴리아미노산(poly amino acid)

아미노산 분자 내에는 산성을 나타내는 카르복실기와 알칼리성의 아미노기가 좌우 양편에 있는데 두 개의 아미노산 분자에서 카르복실기와 아미노기가 탈수결합하면 펩티드결합(peptide bond)을 이룬다. 생체 내에서는 세포 내 유전자정보에 따라 아미노산이 펩티드결합을 하여 단백질의 백질을 만든다. 화학합성에 의해서도 조절할 수 없기 때문에 단백질이라고는 하지 않고 폴리아미노산이라고 부른다. 글루타민산과 리신의 두 아미노산은 미생물의 체 내에서 고분자로까지 합성된다.

(1) 폴리글루타민산(polyglutamic acid)

폴리글루타민산은 글루타민산의 α-펩티드결합으로 이루어져 있고 박테리아의 일종인

*Bacillus natto*에 의해 생산된다. 폴리글루타민산은 생체 내의 단백질 분해효소에 의해서는 분해되기 어려우나 하수도 내의 흙같은 자연계에 존재하는 미생물에 의해서 용이하게 분해된다. 분자량은 100~110만으로 약 7000개의 글루타민산 분자가 연결되어 있다. 소량만 물에 용해되어도 점도가 매우 높고 실과 같은 성질을 나타내므로 식품분야는 물론, 의약, 화장품, 세라믹스 등의 분야에서 사용되어질 수 있다.

(2) 폴리리신(polylysine)

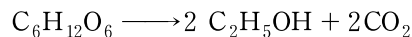
폴리리신은 알칼리성을 나타내는 아미노산인 라이신이 25~30개 정도 사슬모양으로 연결된 것으로 포도당을 주원료로 하는 배지에 방선균의 일종인 *Streptomyces albulus*를 30℃에서 8~9일간 배양하면 11.5 g/L의 농도까지 합성된다. 이온 교환수지 등을 이용하여 분리 정제하면 백색의 분말로 얻어진다. 폴리리신은 자연계에서는 쉽게 분해되지만 생체 내에서는 단백질과 펩티드결합의 골격이 다르기 때문에 소화하기 어렵다. 안전성이 높은 염기(알칼리)성 폴리머이기 때문에 식품, 화장품, 의약, 농약, 전자재료 분야에 사용할 수 있다.

12.3.3 미생물에 의한 연료생산

미생물은 탄수화물 등 유기물질을 분해하여 액체연료(예: 에탄올, 부탄올)와 기체연료(예: 메탄, 수소)를 생산할 수 있다.

에탄올/부탄올

효모, *Zymomonas* 등의 미생물은 당당류의 탄수화물을 발효시켜 에탄올을 만들 수 있다.



이 에탄올을 휘발유에 10% 첨가한 가소홀(gasohol)은 일반 휘발유용 엔진을 개조 하지 않고 사용할 수 있다. 이것은 원유의 사용량을 절감할 뿐만 아니라 에탄올은 휘발유에 비해 더 산화된(oxygenated) 형태의 연료이기 때문에 완전연소가 가능하여 대기오염을 감소시킬 수 있다.

발효에 의한 대규모 에탄올 생산에 흔히 사용되는 탄수화물은 옥수수 전분을 가수분해하여 얻은 포도당이다. 가수분해하는 이유는 효모가 전분을 분해할 능력이 없기 때문이다. 탄소원이 풍부한 유기폐기물, 식물체 등을 에탄올 생산원료로 사용할 수 있다. 특히 식물체 내에 다량 함유되어 있는 셀룰로오스 등을 원료로 사용하기 위해서는 *Trichoderma viride* 등의 셀룰로오스 분해 능력이 있는 균류로 우선 셀룰로오스를 포도당으로 분해한 후 효모나 박테리아에 의해 발효시킨다. 또한 셀룰로오스 내의 자일로오스(xylose) 등의 오탄당(pentose) 기질을 효율적으로 사용할 수 있는 균주를 개발하여야 한다.

에탄올 발효는 회분식 발효보다 발전된 각종 연속식 방법이 개발되어 있다. 또한 고정화 세포를 이용한 방법과 에탄올을 발효조 내에서 동시분리(simultaneous fermentation and separation)하는 방법도 개발되어 있다. 에탄올 생산능력을 개선한 재조합 균주나 에탄올에 대한 저항성을 높인 균주 등도 개발되어 있다. 또한 발효액으로부터 에탄올을 분리하는 방법으로

막분리(membrane separation) 등 증류이외의 공정이 다수 개발되어 있다.

부탄올은 *Clostridium acetobutylicum* 등의 균주에 의해 단당류의 탄수화물로부터 생산할 수 있으며 아세톤 및 에탄올과 혼합된 형태로 만들어진다. 부탄올은 에탄올에 비해 몰당 발열량이 크고, 연료라인이 증기로 막히는 현상이 적으며, 물과 희석되는 정도가 낮아 대체 연료로서 더 우수한 성질을 가지고 있다. 그러나 부탄올 발효는 혐기성 발효이기 때문에 발효공정을 수행하는 데 상대적으로 어렵다.

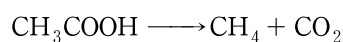
메탄가스

메탄가스는 하수처리장의 혐기성 소화조, 유기폐기물의 토양 매립지, 대규모 가축 또는 동물 사육장의 폐기물 처리장 등에서 발생하며 이것을 포집하여 천연가스를 대신하는 에너지원으로 사용하던가, 미생물이나 화학반응에 의해 메탄올로 전환시켜 내연기관의 연료로도 사용 가능하다.

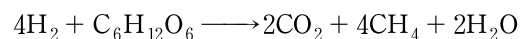
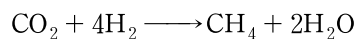
혐기성 조건에서 유기물은 최종 전자수용체로서 산소가 아닌 다른 분자들을 이용할 수 있는 미생물에 의하여 분해된다. 이 혐기성 분해는 궁극적으로 메탄, 이산화탄소, 소량의 수소, 질소, 황화수소 등의 생물가스를 생산한다. 그러나 혐기성 분해는 일반적으로 가수분해(hydrolysis), 산의 형성(acid production), 그리고 메탄형성(methane production)의 3단계로 진행된다. 첫째로 가수분해란 미생물이 분비하는 세포 외 효소를 이용하여 탄수화물, 지방, 단백질 등의 거대 유기분자를 분자량이 작은 단당류, 아미노산, 지방산 및 글리세롤 등으로 분해시키는 과정이다. 두 번째 단계는 첫째 단계의 생성물이 미생물의 세포막을 통해 세포 내로 들어가 대사되는 과정에서 여러 가지 유기산이 생성되고 이것들이 세포 밖으로 내보내진다. 세 번째 단계는 저분자량의 유기산들이 메탄생성균에 의해 메탄과 이산화탄소로 분해되는 과정이다.

메탄생성균들은 유기물산화(organic oxidation)와 이산화탄소 환원반응을 연결할 수 있는 독특한 능력을 가지고 있다. 이 과정에서 이산화탄소는 최종 수소수용체가 된다. 메탄생성균에는 *Methano-bacterium*, *Methanobacillus*, *Methanococcus*, *Methanosarcina* 등이 있다.

수소가 없는 상태에서 메탄생성반응은 다음과 같다.



수소존재하에서 이산화탄소는 다음과 같은 반응에 의해서 메탄을 생성한다.



메탄가스 생성에 영향을 미치는 요소는 온도, pH, 수분, 영양물질의 농도, 금속이온 등이 있다. 유기성 폐기물을 메탄으로 전환하는 장치 내에 있는 미생물들을 균형 있는 미생물 군집으로 구성하여 활발히 메탄을 생성할 수 있도록 하여야 한다. 그림 12.4는 농촌에서 사용될 수 있는 메탄가스 생성을 위한 반응조의 모식도이다.

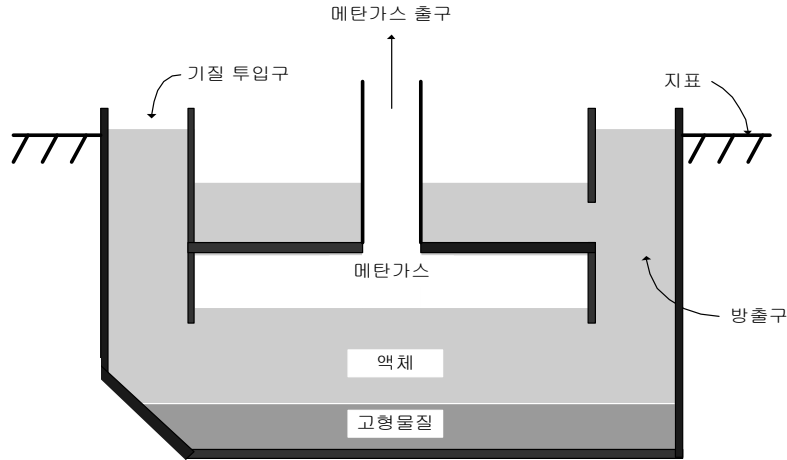


그림 12.4 농촌의 전형적인 생물가스 반응조

12.3.4 미생물을 이용한 원유회수 및 탈황

원유회수

자연분출에 의한 원유생산은 총원유 매장량의 1/3에 불과하다. 그래서 생산량을 증가시키기 위하여 사용하는 2차 원유회수 기술이란 펌핑, 가스압력 가하기, 물의 주입, 고온법 등을 말한다. 가스나 물을 유정에 주입시키면 원유는 다공층으로 부터 빠져 나와 유정입구로 나오게 된다. 스팀을 주입시키거나 연소시켜 원유의 온도를 올리면 원유의 유동성이 증진되어 회수하기 쉬워진다.

3차 원유회수 기술이란 2차 원유회수 기술로도 채굴할 수 없었던 원유의 추가회수를 위하여 원유가 지질학적인 구조로부터 잘 빠져 나오게 할 수 있도록 유기용매, 계면활성제, 고분자물질을 사용하는 방법이다. 잔탄검(Xanthan gum)은 *Xanthomonas campestris*라는 박테리아가 발효공정을 통해 생산하는 고분자 계면활성제이다. 이 물질을 유정에 물을 주입시킬 때 첨가제로 사용하면 원유의 유동성을 증가시켜 원유가 지층의 미세구멍을 잘 빠져 나올 수 있게 한다.

탈 황

산업활동에 의해서 다량의 황을 함유하는 화석연료를 사용하면서 아황산가스의 배출로 인한 대기오염과 그로 인한 산성비(acid rain)의 피해가 심각해지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 황을 제거해야 하는 데, 박테리아는 화석연료를 처리하여 함유된 유기 및 무기황화합물을 감소시키는 데 중요한 역할을 할 수가 있다. 이러한 화석연료의

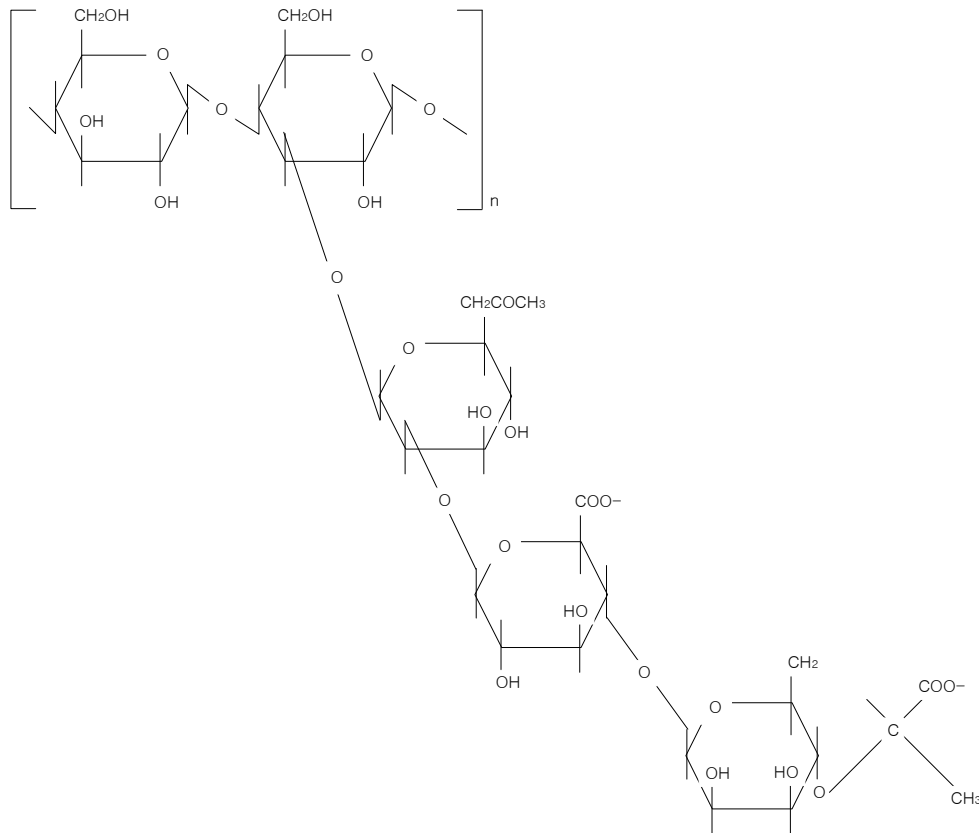


그림 12.5 *Xanthomonas campestris*에 의해 생산된 Xanthan gum의 구조

생물학적 탈황(bio-desulfurization)은 황화합물이 물과 반응하여 제거 가능한 수용성의 중간 대사물이 생성되기 때문에 가능하다.

화석 연료 내에 함유된 유기황은 구조적으로 복잡하고 다양하지만 dibenzylsulfide, thiophenes, benzothiophenes, dibenzothiophenes (DBT) 등이 대표적인 처리 대상물질이다. 탈황에 사용되는 미생물의 종류에는 *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Sulfolobus*, *Thiobacillus* 속 등이 있다.

미생물에 의한 dibenzothiophenes (DBT)의 탈황기작은 두 가지가 보고되었다. 첫째, 탄소 분해경로(carbon-destructive pathway)는 수산화(hydroxylation)에 의한 주변 방향족 고리구조의 열림에 의하여 수용성의 대사산물로 전환시키는 것으로 *Pseudomonas*와 *Beijerinckia* 속에 의하여 수행되는 것으로 알려져 있다. 둘째, 황특이 경로(sulfur-specific pathway)는 DBT가 2-hydroxybiphenyl을 형성하는 과정에서 황산염(SO_4^{2-})의 형태로 황을 제거하며, *Rhodococcus*, *Corynebacterium*, *Brevibacterium* 속 등의 미생물이 이 경로로 탈황하는 것으로 알려져 있다. 그림 12.6은 미생물에 의한 DBT의 대사경로를 설명하고 있다.

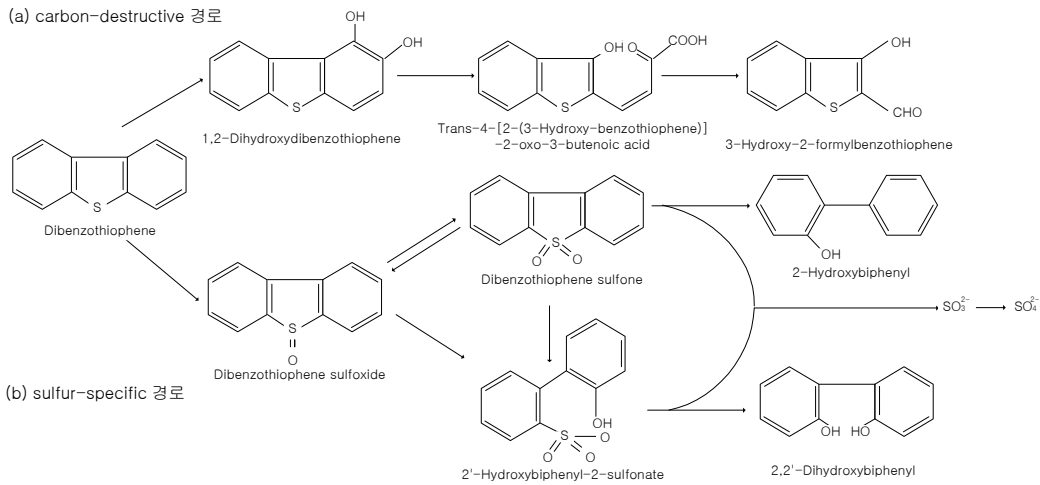


그림 12.6 미생물에 의한 dibenzothiophene의 탈황 대사경로

12.3.5 미생물에 의한 금속회수

금속회수(metal recovery)란 미생물을 이용하여 광석이 포함하고 있는 금속을 용출시켜 회수하는 방법이다. 미생물학적 방법에 의하여 회수될 수 있는 금속은 구리, 니켈, 납, 아연, 우라늄 등이 있다. 금속회수에 가장 흔히 사용되는 미생물은 *Thiobacillus thiooxidans*와 *T. ferrooxidans*이다. 이외에도 *T. concretivorus*, *Pseudomonas fluorescens*, *P. putida*, *Achromobacter*, *Bacillus licheniformis*, *B. cereus*, *B. luteus*, *B. polymyxa*, *B. megaterium*, *Sulfolobus acidocaldarius*를 포함하는 몇몇 고온성 세균이 금속회수 능력이 있음이 보고되었다.

미생물에 의한 금속회수는 경제성과 효율성이 낮아서 화학적으로 처리가 곤란한 경우에 적용된다. 실제적인 회수방법으로는 경사면 추출, 더미 추출, 현장 추출이 있다(그림 12.7).

경사면 추출(slope leaching)이란 잘게 부순 광석을 산비탈에 쌓은 뒤, *Thiobacillus ferrooxidans*를 포함하는 배지를 계속해서 살포하는 방법이다. 미생물과 광석과의 반응으로 생성된 금속을 포함하는 물은 바닥에 고이며, 이 물로부터 금속을 뽑아낸 후, 물은 배지로서 다시 사용한다. 더미 추출(heap leaching)이란 광석을 평지에 큰 더미로 쌓아두고 경사면 추출과 같은 방식으로 처리한다. 현장 추출(in situ leaching)이란 광석을 땅에 묻혀 있는 그대로 두고 구멍을 뚫어 통로를 만든 후 *Thiobacillus ferrooxidans*가 들어있는 배지를 투여한다. 배지가 암석에 흡수, 침투하여 바닥에 고이게 되며, 금속은 회수하고 미생물이 함유된 배지는 재순환된다.

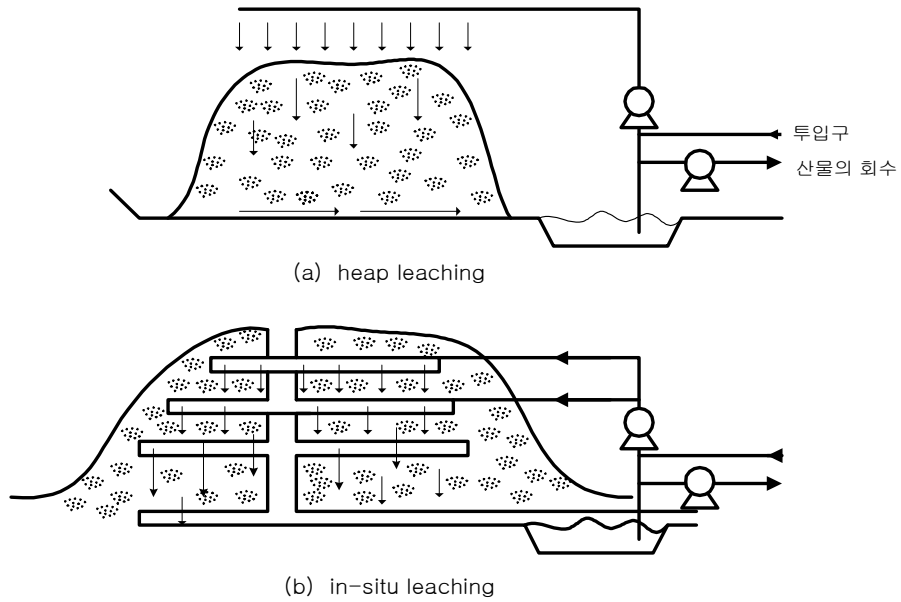
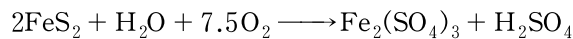


그림 12.7 미생물에 의한 금속회수 모형도

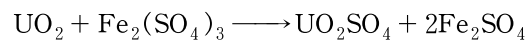
우라늄 제련

T. thiooxidans 는 가장 많이 연구된 미생물로서, 짧은 크기의 간상형의 그람음성 세균이다. 독립영양 세균으로 이산화탄소를 고정시킬 수 있는 능력을 가진다. 그리고 Fe^{2+} 를 Fe^{3+} 로 산화시키거나 또는 원소상의 황과 환원된 황화합물을 황산염으로 산화시켜 에너지를 얻을 수 있다.

미생물에 의한 우라늄 제련은 *T. thiooxidans* 이 다음 반응식과 같이 우라늄 광석내의 pyrite 를 산화하여 ferric sulfate와 황산을 만들기 때문에 가능하다.



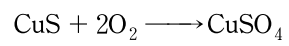
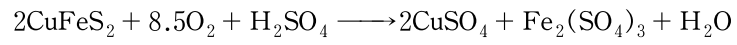
불용성의 4가(tetravalent) 우라늄은 뜨거운 황산과 Fe^{3+} 의 용액과 함께 가용성의 6가(hexavalent) 우라늄황산염으로 산화된다.



미생물에 의한 우라늄 회수는 미국, 캐나다, 남아프리카 등에서 수행되고 있으며 회수를 위한 최적의 조건은 pH 1.5~3.5, 35 °C 내외의 온도, 0.2% 이산화탄소가 포함된 공기의 공급이다.

구리의 회수

구리는 황동광($CuFeS_2$, chalcopyrite), 휘동광(Cu_2S , chalcocite), 동람(CuS , covellite) 등의 광석으로부터 생산되는데 황동광에는 26%의 구리가 함유되어 있다. 미생물에 의한 구리의 제련법은 미국, 호주, 캐나다, 멕시코, 남아프리카, 스페인, 일본 등의 여러 나라에서 사용되고 있는데, 구리 총생산량의 약 5%가 미생물에 의하여 생산되고 있다. 황동광과 동람은 미생물학적인 반응에 의하여 각각 다음과 같이 $CuSO_4$ 로 산화된다.



배지(sulfate/Fe³⁺ 용액)가 구리광석을 쌓은 더미에 뿌려지고 구리를 많이 함유한 용액이 밑으로 흘러나온다. 이 용액으로부터 구리를 침전시켜 회수하고, 용액은 재사용한다.