

제7장 생물학적처리 기초

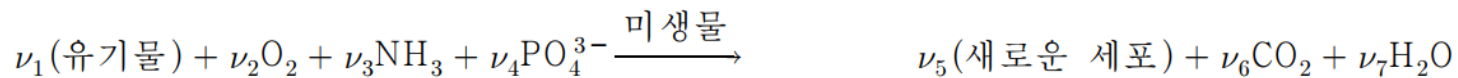
- 미생물 1 -

- ✓ 하수처리와 미생물
- ✓ 미생물 물질대사
- ✓ 세균성장, 에너지론과 사멸

1. 하수처리와 미생물

1. 하수처리에서 미생물 역할

- ✓ 하수에 존재하는 용존 또는 입자상태의 탄소성 BOD 제거와 유기물질의 안정화는 여러종류의 미생물, 특히 박테리아에 의해서 생물학적으로 이루어짐
- ✓ 미생물은 용존 또는 입자상태의 탄소성 유기물질들을 다음과 같은 호기성 산화식에 의해 간단한 최종 부산물과 새로운 생물체로 산화 혹은 전환시킴



식 (1)

- ✓ 식에서 산소(O_2), 암모니아(NH_3)와 인산염(PO_4^{3-})은 유기물질을 간단한 최종 부산물인 CO_2 와 H_2O 로 전환시키는데 필요한 산소와 영양물질들이다.
- ✓ “새로운 세포”는 유기물 산화결과로 생성된 미생물 생체량(biomass) 임

- ✓ 미생물은 폐수처리공정에서 질소(N)와 인(P)을 제거하는데, 어떤 박테리아는 암모니아를 아질산과 질산염으로 산화, 어떤 박테리아는 산화된 질소를 질소가스로 환원시킬 수 있음
- ✓ 인(P) 제거를 위한 생물학적 공정들은 상당량의 유기성 인을 섭취하여 저장할 수 있는 기능을 지닌 박테리아의 성장을 촉진시킬 수 있도록 구성되기도 한다.
- ✓ 미생물 생체(biomass)는 물보다 비중이 약간 크기 때문에 중력침전에 의해 처리된 폐수로부터 분리할 수 있음
- ✓ 유기물질로부터 생성된 미생물 생체를 주기적으로 제거하지 않으면, 미생물 자체가 또 다른 형태의 유기물질이며 방류수 중의 BOD로 측정되기 때문에 완전한 처리가 이루어질 수 없음
- ✓ 미생물 생체량을 처리수로부터 완전히 제거하지 않으면, 폐수 원수에 있던 유기물질의 일부가 박테리아에 의해 산화되는 정도만 처리가 되고 합성된 미생물 생체량은 부유물질로 유출되어 불완전한 폐수처리가 된다.

2. 미생물 조성과 분류

- ✓ 하수에 생물학적 폐수처리공정들은 세균(bacteria), 고세균(archaea), 원생동물(protozoa), 균류(fungi), 윤충류(rotifers), 조류(algae)를 포함한 혼합 미생물 군집들을 내포하고 있다.
- ✓ 어떤 경우는 생물학적 처리 목적을 달성하기 위해 특별한 미생물 종(種)이 필요할 수도 있다.
- ✓ 하수도 미생물의 기본적인 특성에 관한 이해를 돕기 위해 폐수처리에서 주된 역할을 수행하는 원핵생물, 세균, 고세균에 초점을 맞춰 (1) 세포구성요소, (2) 세포조성 성분, (3) 미생물 활성도에 영향을 미치는 환경인자들, (4) 미생물 동정과 분류에 쓰이는 방법 등 검토

1) 세포구성요소

- ✓ 폐수처리에서 미생물의 능력을 결정하는 주요 구성요소는 세포의 유전정보와 효소생성과 관련된 DNA와 리보솜(ribosome) 으로 리보솜은 효소생성에 필수적인 단백질 합성 장소이고, DNA는 합성되는 단백질 구조를 결정하는 유전정보를 제공
- ✓ 세포효소는 단백질과 조효소(cofactor)인 금속이온(아연, 철, 구리, 망간, 니켈 등)으로 되어 있으며, 폐수처리에 관련된 미생물의 대사능력을 결정하는데, 이런 효소는 분자량이 10,000 ~ 1,000,000의 범위에 있는 거대 유기분자들이다.
- ✓ 효소는 가수분해, 산화-환원 반응 그리고 세포합성 반응과 같이 세포기능에 필수적인 생물학적 반응의 촉매작용을 하며, 세포는 체외의 활성도를 위한 효소(세포외 효소)를 생성할 수도 있다.
- ✓ 입자와 고분자의 가수분해가 세포외 효소기능에 대한 한 예이며, 이를 통해 세포에 필요한 물질이 세포막을 통과할 수 있으며, 효소는 구성(constitutive) 효소와 유도(inducible) 효소로 구분
- ✓ 구성효소는 세포에 의해 계속적으로 생성되나, 유도효소는 특정화합물이 존재할 때 생성되는데 효소활성도의 속도는 주로 온도와 pH에 의해 영향을 받음

표. 세균 세포성분의 설명

세포성분	기 능
세포벽 (Cell wall)	세포 모양을 지탱할 수 있는 힘을 제공하고 세포막을 보호한다. 일부 박테리아는 캡슐(capsule) 또는 점질층(slime layer)이라고 불리는 끈끈한 다당류로 구성되어 있는 층을 세포벽 외부에 생성시키기도 한다.
세포막 (Cell membrane)	용해성 유기물질과 영양분들이 세포로 들어가고 폐기물과 대사 부산물이 세포 밖으로 빠져나오게 조절해준다.
세포질 (Cytoplasm)	세포 기능을 수행할 수 있도록 세포 내에 들어있는 물, 영양소, 효소, 리보솜(ribosome) 그리고 조그만 유기분자들을 함유하고 있다.
세포함유물 (Cytoplasmic inclusions)	탄소, 영양소, 에너지를 공급할 수 있는 저장물질들로서 폴리하이드록시부티레이트(PHB), 글리코겐(glycogen), 폴리포스페이트(polyphosphate), 지방(lipids), 황미립자(sulfur granules) 등의 탄수화물 침적체들이다.
데옥시리보뉴클레익산 (DNA)	생성된 세포단백질과 효소의 성질을 결정하는 유전 정보들을 갖고 있는 이중나선형 분자
리보솜 (ribosome)	세포질에 떠있는 입자성 물질로 단백질을 생성하는 곳이며 리보뉴클레익산(RNA)과 단백질로 구성되어 있다.

2) 세포 조성성분

- ✓ 생물학적 시스템에서 미생물 성장을 위해서는 적절한 영양물질들이 있어야 됨
- ✓ 미생물의 세포 성분을 조사하면 성장에 필요한 영양물질들을 알 수 있는데, 원핵생물은 수분이 80%이고, 건조 물질이 20%이며, 건조 물질 중 90%는 유기물이고 10%는 무기물이다.

표. 박테리아 세포의 전형적인 조성

성분 / 원소	건조중량 %	성분 / 원소	건조중량 %
주요 세포물질		질소 (N)	12.0
단백질	55.0	수소 (H)	9.0
다당류	5.0	인 (P)	2.0
지방	9.1	황 (S)	1.0
DNA	3.1	칼륨 (K)	1.0
RNA	20.5	나트륨 (Na)	1.0
기타 (당, 아미노산)	6.3	칼슘 (Ca)	0.5
무기성 이온들	1.0	마그네슘 (Mg)	0.5
세포구성원소		염소 (Cl)	0.5
탄소 (C)	50.0	철 (Fe)	0.2
산소 (O)	22.0	기타 미량원소들	0.3

- ✓ 가장 널리 이용되고 있는 세포 유기성분에 대한 경험식은 $C_5H_7O_2N$ 으로 세포 유기성분 전체 무게의 53%는 탄소이며, 인을 고려할 경우에는 $C_{60}H_{87}O_{23}N_{12}P$ 가 사용되기도 한다.
- ✓ 이 두 경험식은 모두 추정된 것이고 시간과 종(種)에 따라 변할 수 있지만 실제 현장에서 쓰이고 있다.
- ✓ 질소와 인은 비교적 많은 양이 필요하기 때문에 거대 영양물질(macronutrient)로 취급하고, 아연, 망간, 구리, 몰리브덴, 철, 코발트 같은 소량의 금속이온을 미량영양물질(micronutrient)로 본다.
- ✓ 이러한 모든 원소와 화합물은 환경으로부터 얻어야 되기 때문에 이 물질 중 일부가 부족할 경우 성장이 제한되기도 한다.

3) 환경인자

- ✓ 일반적으로 대부분의 미생물은 보다 넓은 온도나 pH 범위에서 생존할 수 있지만, 특정의 미생물은 아주 좁은 범위에서만 최적의 성장을 한다.
- ✓ 일반적으로 적정온도 이하 온도에서 미생물 성장속도는 적정온도 이상에서보다 더 심각한 영향을 받는데, 적정온도에 도달할 때까지 미생물 성장속도는 온도가 10 °C 증가 할 때마다 두 배가 된다.
- ✓ 원핵생물의 기능이 최상인 온도범위에 따라 **친냉성 (psychrophilic)**, **중온성 (mesophilic)**, **친열성 (thermophilic)**으로 분류
- ✓ 또한 pH는 생물의 성장에 있어서 핵심 환경 인자인데, 대부분의 세균은 pH 4.0이하이거나 9.5이상에서 생존할 수 없으며, **일반적으로 세균의 성장을 위한 최적 pH는 6.5 ~ 8.5**

표. 생물학적 공정의 온도에 따른 분류

구 분	온도 범위 (°C)	적정온도 범위 (°C)
친냉성 (psychrophilic)	10 ~ 30	12 ~ 18
친온성 (mesophilic)	20 ~ 50	25 ~ 40
친열성 (thermophilic)	35 ~ 75	55 ~ 65

2. 미생물 물질 대사

1. 미생물 물질대사 개요

- 물질대사는 세포가 존속하고 증식하는 근본수단으로 폐수처리에서는 이를 이용하여 용존 유기물질과 영양물질 등을 제거함
 - 이화작용 : 에너지 생산, 동화작용 : 세포 합성
- 한 미생물의 물질대사에는 약 2000가지의 화학반응이 포함되는데 이들 반응은 거의 다 독특한 효소에 의하여 중개됨
- 효소란?
 - 단백질로 된 생체 내의 촉매이며, 단백질을 구성하는 아미노산의 결합 서열에 따라서 그 특이성이 생김
 - 효소의 활성 중심 - 기질과 작용
 - 촉매 부위(반응에 관여), 특이성 부위(촉매의 특이성 지배)로 나뉘며 이들은 각 효소에 고유한 아미노산 결합 서열에 의하여 형성
 - 생물학적 폐수처리시 효소의 촉매작용이 반응속도에 영향 미침

2. 미생물 성장을 위한 탄소원과 에너지원

- ✓ 미생물이 증식과 적절한 기능을 계속하기 위해서는 에너지원과 새로운 세포를 합성할 수 있는 탄소원, 그리고 질소, 인, 황, 칼륨, 칼슘, 마그네슘과 같은 무기물(영양소)이 필요
- ✓ 유기 영양소(성장인자)도 세포합성을 위해 필요

1) 탄소원

- ✓ 미생물은 유기물질이나 CO_2 로부터 세포성장을 위한 탄소를 얻는데, 바이오매스 합성을 위해 유기탄소를 이용하는 생물을 종속영양생물(heterotrophs)이라고 하고, CO_2 로부터 세포탄소를 획득하는 생물을 독립영양생물(autotrophs)이라함
- ✓ CO_2 를 세포의 탄소화합물로 전환시키는 과정을 동화작용이라 하고, 순에너지 공급이 필요하다. 따라서 독립영양생물은 종속영양생물에 비해 합성에 더 많은 에너지를 소비하기 때문에 일반적으로 세포증식량과 성장속도가 낮다.

표. 전자공여체와 전자수용체, 세포 탄소원 그리고 최종 생성물에 의한 미생물 분류

박테리아의 형태	통상 반응명	탄소원	전자공여체 (기질의 산화)	전자 수용체	최종 생성물
호기성 종속영양세균	호기성 산화	유기화합물	유기 화합물	O ₂	CO ₂ , H ₂ O
호기성 독립영양세균	질산화	CO ₂	NH ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻	O ₂	NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻
	철산화	CO ₂	Fe(II)	O ₂	철이온 Fe(II)
	황산화	CO ₂	H ₂ S, S ⁰ , S ₂ O ₃ ²⁻	O ₂	SO ₄ ²⁻
통성혐기성(임의성) 종속영양세균	탈질화 무산소 반응	유기화합물	유기 화합물	NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻	N ₂ , CO ₂ , H ₂ O
혐기성 종속영양세균	산발효	유기화합물	유기 화합물	유기 화합물	휘발성지방산(VFAs) (아세테이트, 프로피온산, 부티레이트)
	철환원	유기화합물	유기 화합물	Fe(III)	Fe(II), CO ₂ , H ₂ O
	황환원	유기화합물	유기 화합물	SO ₄	H ₂ S, CO ₂ , H ₂ O
	메탄생성	유기화합물	휘발성지방산(VFAs)	CO ₂	메탄
혐기성 독립영양세균	Anammox	CO ₂	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	N ₂ , NO ₃ ⁻

(2) 에너지원

- ✓ 세포합성에 필요한 에너지는 빛이나 화학적 산화반응에 의해서 공급
- ✓ 에너지원으로 빛을 이용할 수 있는 생물을 **광영양생물(phototrophs)**이라 하는데, 광영양생물은 종속영양성(황 환원박테리아)이거나 독립영양성(조류와 광합성 박테리아)이다.
- ✓ 화학반응에서 에너지를 얻는 생물을 **화학영양생물(chemotrophs)**이라고 하는데, 광영양생물에서와 같이 화학영양생물도 종속영양성(원생동물, 균류, 대부분의 박테리아)이거나 독립영양성(질산화 박테리아)이다.
- ✓ **화학독립영양생물(chemoautotrophs)**은 암모니아, 아질산염, 철염, 아황산염 등과 같은 환원된 무기화합물에서, **화학종속영양생물(chemoheterotrophs)**은 대개 유기화합물을 산화시켜서 에너지를 얻는다.

영양원적 관점에서의 미생물 분류

종 류		에너지원	탄소원	예
독립 영양생물	화학독립 영양생물	환원형 무기물	CO ₂	소화세균(obligate chemoautotroph), 수소세균, 메탄세균(facultative chemoautotroph), 일산화탄소세균 등
	광독립 영양생물	빛	CO ₂	Chromatiaceae, chlorobiaceae, acidophila, Rhodospirillum tenue
종속 영양생물	화학종속 영양생물	유기물	유기물	홍색비유황세균중 H ₂ 를 전자공여체로 하여 이용하는 것
	광종속 영양생물	빛	유기물	동물

(3) 산화-환원반응

- ✓ 화학영양생물에 의한 에너지 생성 화학반응은 산화-환원반응으로 전자가 전자공여체에서 전자수용체로 전달되며, 이 때 전자공여체는 산화되고, 전자수용체는 환원된다.
- ✓ 전자공여체와 수용체는 미생물에 따라 유기 미지 무기화합물이 될 수 있으며, 전자수용체는 대사작용 동안 세포내에서 이용 가능하거나, 세포 밖에서 얻을 수 있다(예, 용존산소).
- ✓ 효소 작용으로 외부 전자수용체에 전자를 전달하여 에너지를 생산하는 미생물은 호흡대사 작용을 한다. 내부 전자수용체를 이용하는 것은 발효대사이며, 에너지 생산과정이 호흡에 비하여 비효율적이다.
- ✓ 절대 발효성 종속영양생물은 호흡성 종속영양생물에 비하여 낮은 성장속도와 세포수율을 갖는 특성이 있다.

(4) 산소이용

- ✓ 전자수용체로 산소를 이용하는 반응을 호기성, 다른 전자 수용체를 이용하는 반응을 혐기성
- ✓ 무산소(anoxic)는 혐기성에서 전자수용체로 아질산염(NO_2)이나 질산염(NO_3)을 사용하는 것을 다른 전자수용체 사용과 구분하기 위하여 사용하는 말이다.
- ✓ 무산소 조건에서 아질산염이나 질산염은 환원되어 질소가스(N_2)로 전환되며, 이 반응을 생물학적 탈질(denitrification)이라 한다.
- ✓ 산소만을 사용하여 에너지를 얻을 수 있는 생물을 절대호기성 세균이라고 한다. 일부 세균은 산소를 이용하거나 산소를 이용할 수 없을 때 질산염과 아질산염을 전자 수용체로 이용 할 수 있다. 이러한 세균을 임의 호기성(facultative aerobic)세균이라고 한다.

용존산소에 따른 미생물 분류

분 류	특 징
호기성	유리산소인 O_2 가 존재하는 상태에서 증식하는 미생물
혐기성	화합물 내의 산소를 탈취해서 증식하는 미생물
임의성	호기성이나 혐기성 환경에 구애되지 않고 증식하는 미생물

5) 발효 에너지

- ✓ 발효에 의해 에너지를 생성하고 산소가 결여된 환경조건에서만 생존할 수 있는 생물을 **절대혐기성 세균**이라 한다.
- ✓ 산소분자의 유무에 관계없이 성장할 수 있는 임의 혐기성 세균은 물질 대사능력에 따라 두 그룹으로 분류된다.
- ✓ 진정한 임의 혐기성 세균은 산소분자의 유무에 따라 발효성에서 호기성 호흡 대사로 바꿀 수 있다. 산소내성 혐기성 세균은 절대 발효성 대사 작용을 하지만 산소의 존재에 상대적으로 민감하지 않다.

3. 영양물질과 성장인자

- ✓ 탄소 또는 에너지원보다 **영양물질이 때로는 미생물의 세포합성과 성장을 위한 제한물질일 수 있다.**
- ✓ 미생물에 필요한 주요 무기성 영양물질은 N, S, P, K, Mg, Ca, Fe, Na, Cl 등이며, 주요 미량 영양물질로는 Zn, Mn, Mo, Se, Co, Cu, Ni 등이 포함된다.
- ✓ 성장인자로 알려진 유기성 영양물질은 생물에 필요한 화합물로 다른 탄소원으로부터 합성할 수 없는 전구물질 또는 유기성 세포물질의 구성성분이다.
- ✓ 생물에 따라 필요성장인자가 다르지만 주요 성장인자는 (1) 아미노산, (2) 질소 염기 (예, purines, pyrimidines) 그리고 (3) 비타민의 3 종류로 구분된다.
- ✓ 도시하수처리를 위해서는 일반적으로 하수에 충분한 영양물질이 존재하지만, 산업폐수처리를 위해서는 영양물질을 생물학적처리 공정에 첨가해 줄 필요가 있다.
- ✓ 질소와 인의 부족은 특히 식품가공 폐수나 유기물 함량이 높은 폐수에서 일반적으로 볼 수 있다.
앞서 기술한 미생물 세포 조성에 대한 식 $C_{12}H_{87}O_{23}N_{12}P$ 을 이용하면 세포 생체량 100g 당 필요한 질소와 인의 양은 각각 약 12.2g과 2.3g이다

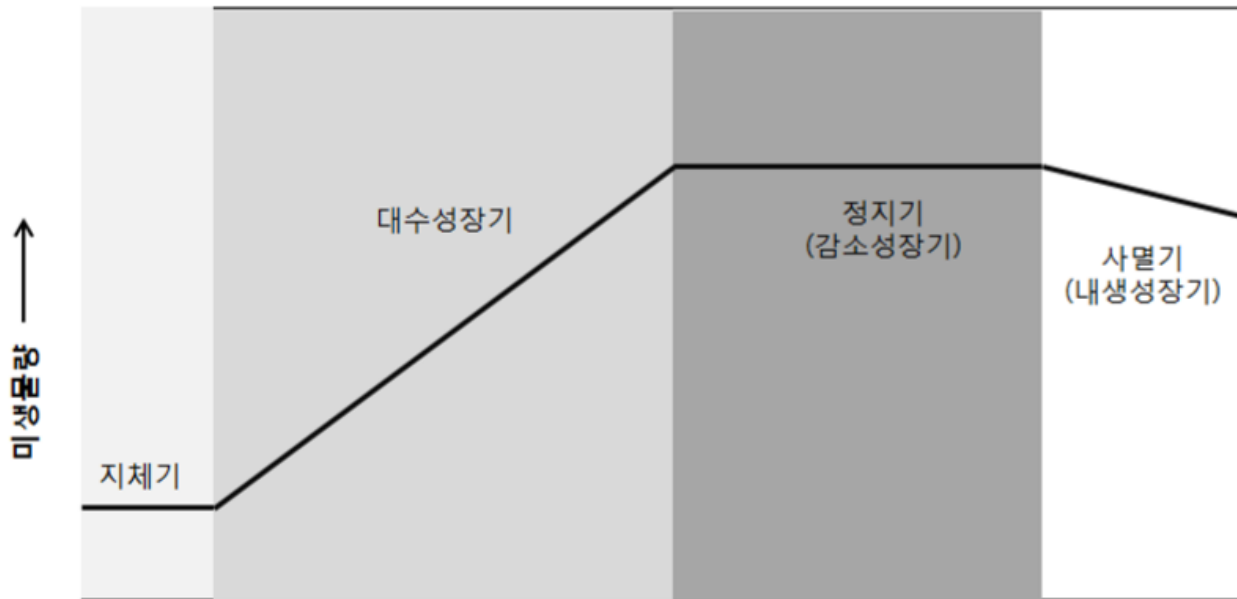
3. 세균성장, 에너지론과 사멸

1. 세균 증식

- ✓ 세균은 이분법, 무성생식, 발아(budding)의 방법으로 번식할 수 있으며, 일반적으로 세균은 이분법에 의해 새로운 두 개의 개체로 분할
- ✓ 각 세포 분열에 필요한 세대 시간은 20분 이내에서 수일간으로 다양하며, 세대 시간이 30분 이라면, 하나의 세균이 12시간 후에 224(16,777,216개) 개체로 증식
- ✓ 직경이 1 μm 이고, 비중이 1.0인 구형이라 가정하면, 세균 한 세포의 무게는 약 $5.0 \times 10^{-13} \text{ g}$ 이다. 그러면 12시간 후에 세균의 질량은 약 $8.4 \times 10^{-6} \text{ g}$ (8.4 μg)이 될 것이다. 즉, 세포의 수는 세포의 질량과 비교할 때 아주 크다.
- ✓ 이러한 시간에 따른 바이오매스량의 급속한 증식은 하나의 가정에 근거한 예이다. 생물학적 처리시스템에서 세균은 기질과 영양물질 공급 등의 환경적 제한요소로 인하여 무한정 계속해서 분열할 수는 없다.

2. 회분식 반응기에서 세균의 성장유형

- ✓ 회분식 반응기내 세균의 성장은 뚜렷한 몇 단계로 구분할 수 있다.
- ✓ 아래 그림은 회분식 반응기내에 반응 초기 기질과 영양분은 충분하고, 바이오매스량이 아주 소량으로 존재할 때를 나타낸 것이다.
- ✓ 기질이 이용되면서 4개의 뚜렷한 성장 단계가 연속적으로 나타나게 된다.



1) 유도단계(지체기)

- ✓ 성장 초기에는 새로운 환경에 적응하는 시간을 가지면서 증식 분열 준비를 하며 수분 흡수에 의하여 세포가 커지지만 정지기를 갖게 됨
- ✓ 좀더 시간이 지나면서 미생물은 증식 가속기에 접어들어 크기가 2~3배로 증대됨

2) 대수성장단계

- ✓ 미생물의 성장과 증식이 왕성한 단계로, 미생물이 유기물을 이용하여 빠르게 증식하게 됨
- ✓ 수처리 과정에서는 유기물질이 최대로 제거되는 대수성장단계가 바람직하나, 침전효율이 낮아지는 문제가 있음
- ✓ 대수성장단계의 조건은 유기물의 양이 많은 단계이므로, 비교적 F/M비가 높은 조건임
- ✓ F/M비는 생물학적 처리에서 먹이와 미생물량의 비를 말하며, 처리시설의 가장 중요한 운전 인자 중의 하나임

3) 감소성장단계 (정지기 또는 정상기)

- ✓ 미생물 개체수가 증가해서 영양분이 제한 받게 되며, 증식률과 사멸률이 비슷한 단계에 있으므로 정체기라 하며, 미생물 증식곡선의 정점에 해당되는 구간이므로 정상기라고도 함
- ✓ 이 단계 미생물은 floc 형성이 되어 침전성이 좋아지고 폐수처리에서는 효율적 단계
- ✓ 감소성장단계는 대수성장단계 보다 유기물량이 적으므로 F/M비가 낮은 특성이 있음

4) 내생성장단계 (사멸기)

- ✓ 영양분이 부족해지고 미생물이 증식률보다 사망률이 높아지는 단계임
- ✓ 미생물은 자신의 원형질을 분해시켜 에너지를 얻는 **자산화(autooxidation) 과정**을 갖게 됨
- ✓ 자산화 후 미생물은 결국 대수사멸기에 도달하게 되어 전체 원형질 무게가 감소하게 됨
- ✓ 또한 이 단계는 F/M비가 낮은 단계로 생물학적 floc의 형성이 잘 되고 침전성이 높아 맑은 상층수를 얻을 수 있음

3. 세균의 성장과 바이오매스 수율

- ✓ 생물학적 처리공정에서 세포성장은 유기 또는 무기화합물의 산화와 동시에 발생
- ✓ 바이오매스 합성수율은 **이용된 기질의 양에 대한 생성된 바이오매스량의 비(g바이오매스량/g기질)** 정의되며, 일반적으로 사용된 전자공여체에 대한 상대량으로 정의되기도 한다.

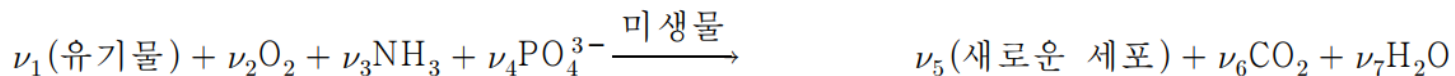
$$\text{바이오매스 합성 수율, } Y = \frac{g \text{ 생성 바이오매스량}}{g \text{ 기질 소모량}}$$

식 (2)

- ✓ 유기성 기질과 반응하는 호기성 종속영양생물의 증식은 **(g바이오매스/g유기성 기질)**로 표시
- ✓ 질산화세균 수율은 **(g바이오매스/g산화된 $\text{NH}_4\text{-N}$)**으로 표시
- ✓ 메탄생성을 위한 휘발성 지방산(VFAs)의 혐기성 분해반응에서, 수율은 **(g바이오매스/g사용된 VFA)**
- ✓ 도시하수와 산업폐수의 호기 및 혐기성 처리에 있어서 수율은 COD나 BOD 같이 전체 유기화합물의 소모량을 반영한 측정 가능한 매개변수로 산출하는데, 수율은 **(g바이오매스/g제거된 COD)** 또는 **(g바이오매스/g제거된 BOD)**로 표현`

(1) 화학양론으로부터 바이오매스 수율과 산소요구량 산출

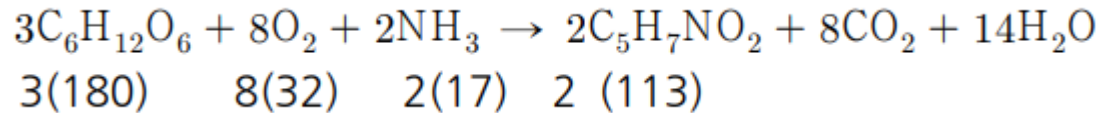
- ✓ 식 (1)과 같이 제거된 기질과 호기성 종속영양생물의 생분해 동안 소비된 산소의 양과 겹보기 바이오매스 수율 사이에 명확한 화학양론적 관계가 성립된다.
- ✓ 기질의 분해 과정을 규명하는데 사용되는 가장 일반적 접근방법은 COD 물질수지를 세우는 것이다.
- ✓ COD가 사용되는 이유는 폐수내 기질농도가 산소당량으로 정의되기 때문이며, 바이오 매스량이나 산화된 상태의 COD값으로 보존되기 때문에 물질수지식 작성이 가능하다.
- ✓ (가) 바이오매스 수율, (나) 산소요구량 산정



식 (1)

가. 바이오매스 수율

- ✓ 폐수 내 혼합 화합물의 생물학적 산화에 관한 정확한 화학양론은 알려져 있지 않다.
- ✓ 그러나 유기물질을 $C_6H_{12}O_6$ (포도당)로 표기하고, 새로운 세포를 $C_5H_7NO_2$ 로 표기할 수 있으며, 질소 이외의 다른 영양물질들을 무시하면 식 (1)은 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

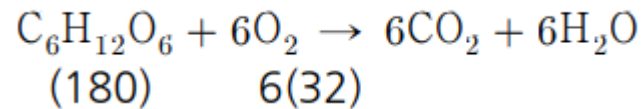


식 (3)

- ✓ 위 식에서 주어진 것처럼 포도당과 같이 이용된 기질은 새로운 세포에서 발견된 것과 CO_2 및 H_2O 를 생성하면서 산화된 것으로 나누어진다. 소모된 포도당에 대한 수율은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} Y &= \frac{\Delta(C_5H_7NO_2)}{\Delta(C_6H_{12}O_6)} = \frac{2(113 \text{ g/mole})}{3(180 \text{ g/mole})} \\ &= 0.42 \text{ g 세포/g 소모된 포도당} \end{aligned}$$

- ✓ 실제로 COD와 VSS가 유기물질과 새로운 세포를 각각 표현하는데 이용되는데, COD에 근거한 수율을 나타내기 위해서는 포도당의 COD를 계산해야 한다.
- ✓ 포도당의 COD는 다음과 같이 포도당이 이산화탄소로 산화되는 화학양론 반응식을 이용하여 결정될 수 있다.



식 (4)

- ✓ 포도당의 COD는 아래와 같음

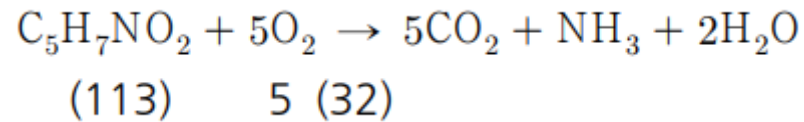
$$\text{COD} = \frac{\Delta(\text{O}_2)}{\Delta(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6)} = \frac{6(32 \text{ g/mol})}{(180 \text{ g/mole})} = 1.07 \text{ g O}_2/\text{g glucose}$$

- ✓ 기질이 세포로 전환된 양을 설명하는 COD로 표현된 이론적인 수율은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Y &= \frac{\Delta(\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2)}{\Delta(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \text{ as COD})} = \frac{2(113 \text{ g/mole})}{3(180 \text{ g/mole})(1.07 \text{ COD/g glucose})} \\ &= 0.39 \text{ g 세포/g 사용된 COD, 혹은 } 0.39 \text{ g VSS/g 사용된 COD} \end{aligned}$$

나. 산소 요구량

- ✓ 이용된 산소량은 (1) 기질이 CO_2 와 H_2O 로 산화되는데 이용된 산소, (2) 바이오매스의 COD, (3) 분해되지 않은 기질의 COD를 고려하여 계산할 수 있다.
- ✓ $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$ 의 분자식 으로 표기되는 바이오매스(일반적으로 VSS로 측정)의 산소당량은 아래와 같이 1.42 g COD/g biomass VSS이다.



식 (5)

- ✓ 세포조직의 COD는 다음과 같음

$$\text{COD} = \frac{\Delta(\text{O}_2)}{\Delta(\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2)} = \frac{5(32 \text{ g/mole})}{(113 \text{ g/mole})} = 1.42 \text{ gO}_2/\text{gcells} = 1.42 \text{ gO}_2/\text{gVSS}$$

- ✓ 위의 관계식으로부터 식 (3)의 반응에서 이용된 단위 COD당 소비된 산소량은 COD 물질수지식으로부터 결정될 수 있다. 제거된 COD는 산화되거나 세포 성장에 사용된다.

$$\text{COD}_r = \text{COD}_{\text{cells}} + \text{COD}_{\text{ox}} \quad \text{식 (6)}$$

여기에서, COD_r = 이용된 COD, g COD/d

$\text{COD}_{\text{cells}}$ = 세포 합성에 관여된 COD, g COD/d

COD_{ox} = 산화된 COD, g COD/d

- ✓ 산화된 기질의 COD는 소비된 산소량과 동일하므로
- ✓ 소비된 산소 = 이용된 COD - 세포 COD 식 (7)

$$\begin{aligned} &= \left(\frac{1.07 \text{ g O}_2}{\text{g 포도당}} \right) \left(3 \text{ mole} \times \frac{180 \text{ g 포도당}}{\text{mole}} \right) \\ &- \left(\frac{1.42 \text{ g O}_2}{\text{g 세포}} \right) \left(2 \text{ moles} \times \frac{113 \text{ g 세포}}{\text{mole}} \right) \\ &= 577.8 \text{ g O}_2 - 320.9 \text{ g O}_2 = 256.9 \text{ g O}_2 \end{aligned}$$

- ✓ 따라서 이용된 단위 COD당 소비된 산소량은 다음과 같다.

$$\frac{\text{산소소비량}}{\text{포도당 COD}} = \frac{256.9 \text{ g O}_2}{3 \text{ mole (1.07 g COD/g 포도당)}(180 \text{ g 포도당/mole})}$$

$$= 0.44 \text{ g O}_2/\text{g COD}_r$$

- ✓ 위와 같이 COD 물질수지에 근거한 산소요구량은 포도당 3 mole에 대해 8 mole의 산소가 요구되는 식 (10-3)의 화학양론식에 근거한 산소 사용량과 일치한다.

$$\frac{\text{산소 이용량}}{\text{포도당 COD}} = \frac{8(32 \text{ g O}_2/\text{mole})}{3(180 \text{ g/mole})(1.07 \text{ g COD/g 포도당})}$$

$$= 0.44 \text{ g O}_2/\text{g COD}_r$$

- ✓ 0.39 g VSS/g COD 이용량으로 표현되는 세포 수율은 0.56 g CODcells/g COD_r과 같고, 에너지 생산에 사용된 g 산소량/g COD_r (0.44)와 합하면 1.0 g COD/g COD_r이 된다.
- ✓ 즉, 총 COD는 이용된 산소량과 생성된 바이오매스 COD로 분포하게 된다.

(2) 다른 성장조건에서 바이오매스 합성 증식

- ✓ 바이오매스 합성증식은 전자가 전자공여체(초산)에서 전자수용체(산소)로 이동할 때 생산되는 에너지와 관련이 있다.
- ✓ 산화-환원반응으로부터 생성되는 에너지는 전자수용체가 산소에서 질산염, 황산염 그리고 이산화탄소로 바뀔에 따라 감소하며 따라서 더 낮은 세포 증식을 예상할 수가 있다.
- ✓ 폐수처리과정에 있는 일반적인 전자공여체와 전자수용체에 대한 대표적인 합성수율의 범위는 아래와 같음

표. 폐수처리에서 일반적 생물반응에 대한 세균의 합성 수율

성장조건	전자 공여체	전자 수용체	합성계수
호기성	유기화합물	산소	0.45 g VSS/g COD
호기성	암모니아	산소	0.12 g VSS/g $\text{NH}_4\text{-N}$
무산소	유기화합물	질산기	0.30 g VSS/g COD
혐기성	유기화합물	유기화합물	0.06 g VSS/g COD
혐기성	아세테이트	이산화탄소	0.05 g VSS/g COD

강의 요약

1. 하수처리에서 미생물의 역할

- ✓ 하수처리에서 미생물의 역할은 용존 또는 입자상태의 탄소성 유기물들을 호기성 산 화식에 의해 간단한 최종산물과 새로운 생물체로 산화 혹은 전환시킨다.
- ✓ 미생물 생체는 물보다 비중이 약간 크기 때문에 중력침전에 의해 처리된 폐수로부 터 분리할 수 있다. 중요한 것은 유기물질로부터 생성된 미생물 생체를 주기적으로 제거해 주지 않으면, 미생물 자체가 또 다른 형태의 유기물질이며 방류수 중의 BOD 로 측정되기 때문에 완전한 처리가 이루어질 수 없다는 것이다.

2. 미생물 조성과 분류

- ✓ 원핵생물은 수분이 80%이고, 건조 물질이 20%이며, 건조 물질 중 90%는 유기물 이고 10%는 무기물이다. 세포의 유기성분에 대한 경험식은 $C_5H_7O_2N$ 으로 세포 유 기성분 전체 무게의 53%는 탄소이다.
- ✓ 일반적으로 세균의 성장을 위한 최적 pH는 6.5 ~ 7.5이고, pH 4.0이하이거나 9.5이 상에서 생존할 수 없다. 원핵생물은 최적성장을 나타내는 온도범위에 따라 친냉성 (psychrophilic), 중온성(mesophilic), 친열성 (thermophilic)으로 분류한다.

3. 미생물 물질대사 개요

- ✓ 새로운 세포합성을 위해 유기탄소를 이용하는 생물을 종속영양생물(heterotrophs)이라고 하고, CO₂로부터 세포 탄소를 획득하는 생물을 독립영양생물(autotrophs)이라고 한다. 독립영양생물은 종속영양생물에 비해 합성에 더 많은 에너지를 소비하기 때문에 일반적으로 세포증식량과 성장속도가 낮다.
- ✓ 화학영양생물에 의한 에너지 생성 화학반응은 산화-환원반응으로 전자가 전자공여체에서 전자수용체로 전달되며, 이 때 전자공여체는 산화되고, 전자수용체는 환원된다. 전자공여체와 수용체는 미생물에 따라 유기화합물이거나 무기화합물이 될 수 있다.

4. 세균성장, 에너지론과 사멸

- ✓ 회분식 반응기내 세균의 성장은 지체기, 대수 성장기, 안정기 및 사멸기로 대별되는 4개의 뚜렷한 성장 단계가 연속적으로 나타나게 된다.
- ✓ 하수처리공정에서 미생물에 의해 제거된 COD는 산화되거나 세포 성장에 사용되는 데, 포도당을 대상으로 하였을 때 산화반응에 소비되는 산소량은 0.44 g 산소량/g COD_r이고 세포로 전환된 수율은 0.56 g COD_{cells}/g COD_r로써 두 가지를 합하면 1.0 g COD/g COD_r이 된다.

감사합니다.