

## 13장 생물학적 수질오염 처리

### 13.1 생물학적 폐수처리

폐수처리방법에는 물리·화학적 방법과 생물학적 방법이 있는데 물리·화학적 방법은 시설 투자비가 적게 들고 처리속도는 빠르지만 화학약품 소모 등에 의해 운전비용이 많이 소요된다. 또한 처리 후의 생성물을 재처리 또는 처분해야 하므로 다른 형태의 환경오염을 일으키는 단점이 있다. 이에 반하여 생물학적 방법은 자연환경에 별로 해를 끼치지 않는다.

생물학적 처리방법은 박테리아, 균류, 조류, 원생동물 등을 이용하여 폐수 내의 오염물질을 분해 또는 해독시키는 것으로 유기물질을 이산화탄소나 메탄가스의 형태로 전환시켜 제거한다. 생물학적 폐수처리법은 도시 생활하수의 2차 처리, 유기물을 함유한 산업폐수 처리공정 등에 널리 이용된다.

#### 13.1.1 폐수의 종류와 성분

폐수에는 유기화합물과 난분해성 화합물이 들어 있다. 가정이나 도시하수에는 사람의 배설물과 각종 세척수가 다량 함유되어 있다. 사람의 배설물에는 유기산, 탄수화물뿐만 아니라 아미노산이나 단백질 음식에서 유래된 많은 양의 질소가 존재하며 무기화합물도 상당량 존재한다. 산업 폐수는 그 조성이 다양하며 난분해성 물질이나 독성물질을 함유하고 있는 경우가 있어서 생물학적 처리가 어려울 때가 있다. 매립지의 침출수는 pH와 용존산소가 낮으며 각종 중금속 농도가 높고 염화탄화수소(chlorinated hydrocarbon) 등 난분해성, 독성물질을 많이 함유하고 있기 때문에 지표수나 지하수를 오염시킨다.

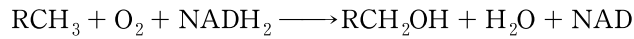
#### 유기화합물

폐수에 들어 있는 유기화합물 중 당류와 탄수화물이 가장 쉽게 분해되며 아미노산도 일반적으로 쉽게 분해된다. 이것은 이러한 화합물들을 분해하는 효소를 보유하고 있는 미생물이 널리 분포되어 있기 때문이다. 몇 가지 유기화합물에 대해 분해성이 높은 것부터 나열하면 다음과 같은 순서이다.

유기산, 에스터 > 알코올 > 알데히드 > 케톤 > 에테르

알코올은 일반적으로 쉽게 분해되지만 3급 알코올(tertiary alcohol)은 노르말(normal) 알코올에 비해 분해성이 현저하게 나쁘다. 비닐화합물과 옥시화합물은 저분자량일 때는 분해가 용이하나 분자량이 커질수록 분해성이 낮아진다. 미생물을 대상물질에 순화(적응)시킨 후 분해가 가능한 물질로는 메탄올, 에테르(디옥시산, 디페닐에테르), 페놀류(모노 및 디하이드록시 페놀, 크레졸), 아민, 시안화물, 니트릴이 있다. 할로겐화 페놀, 알데히드, 3급 부탄올, 아밀 알코올, 펜타에리스리들은 난분해성 물질이다.

탄화수소(hydrocarbon)는 탄수화물(carbohydrates)에 비하여 잘 분해되지 않는다. 미생물이 탄화수소를 분해하는 전략은 우선 산화효소(oxygenase)에 의해 산소를 도입하여 탄화수소를 알코올로 산화시킨다.



이 알코올은 탈수소효소(dehydrogenase)의 작용으로 유기산으로 산화된 후 β산화(β-oxidation)에 의해 acetyl-CoA가 되어 대사과정으로 들어간다.

방향족(aromatic) 탄화수소는 지방족(aliphatic) 탄화수소보다 일반적으로 분해성 정도가 떨어진다. 방향족 탄화수소는 우선 카테콜(catechol)이나 프로토키테추에이트(protocatechuate)로 전환된다. 그리고 나서 dioxygenase의 작용으로 방향족 고리(aromatic ring)가 끊어지고, 계속해서 대사과정을 거쳐 아세틸 CoA와 숙신산(succinate)이 된다(그림 13.1). 벤젠은 분해되기 쉽지만 벤젠고리에 니트로기, 아미노기, 할로젠이 치환되면 분해성이 저하된다. 직쇄(straight chain) 알킬벤젠은 직쇄알킬기가 쉽게 산화분해되며, 알킬기가 분지쇄형(branched type)이면 난분해성이 된다.

탄화수소의 분해에 작용하는 산화효소(oxygenase)는 *Pseudomonas*, *Mycobacterium* 과 yeast 속의 일부 종(species)에서 발견된다.

## 난분해성 화합물

### (1) 합성세제

합성세제의 주성분은 주로 음이온계와 비이온계의 계면활성제이다. 일반적으로 알킬설퍼산염

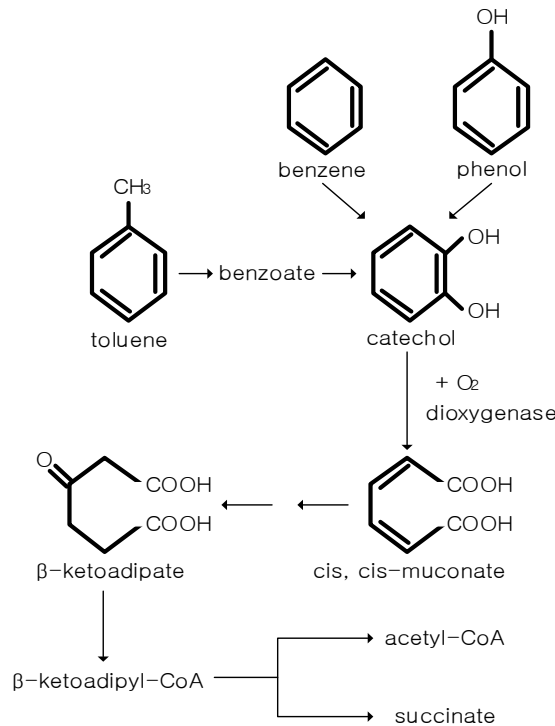


그림 13.1 방향족 화합물 분해경로의 예

포네이트(alkylsulfonate, AS)나  $\alpha$ -올레핀술포네이트( $\alpha$ -olefin sulfonate, AOS), 고급 알코올의 황산에스터 등의 벤젠고리가 분자 내에 있으면 분해가 어렵다. 선상 알킬벤젠술포네이트(linear alkylbenzene sulfonate, LAS), 폴리옥시에틸렌라우릴에테르(polyoxyethylene-laurylether)와 같이 분자 내에 벤젠고리나 에틸렌옥사이드 사슬을 지닌 계면활성제는 AS나 AOS에 비해 분해가 느리다.

## (2) 시안화합물

시안화합물은 생물에 대한 독성이 매우 커서 주로 화학적처리로 제거되고 있다. 그러나 시안을 잘 분해하는 곰팡이 균인 *Fusarium solani*를 순화(馴化)시키면, 고농도(3000 mg/L)의 시안 분해가 가능하다. 이 균이 맹독성 시안을 분해할 수 있는 것은 일반적인 미생물과는 다른 별도의 호흡산소 시스템을 갖고 있기 때문으로 추정된다.

그 외의 난분해성 물질인 폴리염화 비페닐(polychlorinated biphenyl, PCB)은 토양 중에서 극히 소량씩 분해되며 *Alcaligenes*나 *Acetobacter*에 속하는 세균이 10 mg/L 농도의 PCB를 분해한다고 보고되어 있다. 유기염소계 농약인 BHC(benzene hexachloride), DDT(dichloro-diphenyl-trichloro-ethane), 딜드린, 알드린 등은 식품이나 환경 중에 장기간 잔류하기 때문에 사용이 금지되었으며, 토양 중에서 분해되는 데 10년 정도 필요하다는 연구 보고가 있다. 유기 니트릴화합물과 폴리에틸렌그리콜도 난분해성 물질이다.

### 13.1.2 생물학적 처리의 종류

생물학적 폐수 처리공정에서 미생물이 성장하는 형태는 부유식 성장(suspended growth)과 부착식 성장(attached growth)으로 나눌 수 있다. 부유식 성장을 이용한 처리에서는 기질의 분해와 세포의 생장이 폐수 내에 부유된 상태에서 이루어진다. 부유식 성장을 이용한 처리방법에는 활성 슬러지법, 안정지, 혐기성 소화법 등이 있다.

부착식 성장의 경우에는 유기물의 분해가 일어나면서 세포가 성장하여 얇은 점액질의 생물막(biofilm)이 고체표면에 생성된다. 이를 이용한 폐수처리 방법을 생물막 공정 또는 고정막(fixed film) 공정이라 부른다. 생물막 공정의 예로는 살수여상법, 회전원판법, 침적여상법, 혐기성 생물막 공법 등이 있다.

산소의 이용 유무에 따라 생물학적 처리공정을 호기성 공정(aerobic process)과 혐기성 공정(anaerobic process)으로 나눌 수 있다. 호기성 처리는 산소를 이용하는 미생물의 호기성 호흡(aerobic respiration)을 이용하는 것으로 활성 슬러지법, 살수여상법, 회전원판법, 침적여상법 등이 해당된다. 호기성 처리에서는 유기물이 분해되어 이산화탄소와 물이 생성되므로 자연환경에 아무런 해가 되지 않는다. 또한 미생물들의 생장이 빠르므로 처리가 신속하나 산소를 지속적으로 공급해 주어야 하며 이로 인한 운전비용이 증가되는 단점이 있다. 고농도의 폐수의 경우에는 산소 소모속도에 비하여 산소 전달속도가 느리기 때문에 호기성 처리가 어려워진다.

혐기성 처리(anaerobic treatment)는 혐기성 미생물의 혐기성대사, 즉 혐기성 호흡(anaerobic respiration)과 발효(fermentation)를 이용하는 것으로 산소공급이 필요없다. 혐기성 소화법,

부패조법, 혐기성 안정지, 혐기성 생물막 공법 등이 대표적인 방법들이다. 혐기성 처리에서는 폭기(aeration)가 필요하지 않기 때문에 운전비용이 저렴하고 메탄가스가 생성되어 에너지 자원의 회수가 가능하다.

그림 13.2는 일반적인 생물학적 폐수처리 모식도이다.

## 13.2 호기성 폐수처리

호기성 폐수처리 방법에는 활성 슬러지법과 생물막 처리법이 있다. 호기성 폐수처리를 시행하기 앞서 폐수를 침전조에서 2~6시간 1차 침전시킨다.

### 13.2.1 활성 슬러지 공정

활성 슬러지법(activated sludge process)은 폐수 내에 존재하는 물질을 산화시키기 위해



그림 13.2 생물학적 폐수처리

호기성 생물체들의 혼합배양을 이용한다. 활성 슬러지라는 용어는 생물체들이 자유롭게 부유한 floc의 형태로 존재하는 공정에 대하여 일반적으로 적용할 수 있다. floc은 세포 밖으로 분비된 접착성 물질에 묻혀 있는 많은 세포들의 집합체로 직경이 약 0.2~1 mm 정도이다. floc 내에 존재하는 미생물들은 별도로 2차 침전조에서 침전시켜 뭉쳐지게 할 수 있다. floc이 없는 상등액은 유출수로 방류되며 침전되어 뭉쳐진 세포들은 폭기조(aeration tank)로 반송되어 유입 폐수와 섞이게 된다. 이 공정은 균체를 재순환(recycle)하는 1단계 연속배양(chemostat) 시스템과 동일한 방법으로 해석할 수 있다.

#### 활성슬러지법의 운전조건

##### (1) 균체의 농도

폭기조 내의 균체의 농도는 혼합액 부유 고형물(mixed liquor suspended solids, MLSS)로 나타낼 수 있다. 그러나 MLSS는 무기 고형물도 포함하고 있을 수 있으므로 생물적 구성요소를 보다 정확히 나타내려면 혼합액 휘발성 부유 고형물(mixed liquor volatile suspended solids, MLVSS)을 이용한다. MLSS나 MLVSS의 정의는 필터를 통과하지 못하는 모든 부유성 또는 휘발성 부유 고형물을 포함하는 것이므로 살아있는 세포뿐만 아니라 죽은 세포, floc에

있는 세포 외로 분비된 물질, 하수에 유입된 부유 휘발성 물질도 포함하게 된다.

(2) 성장률, 체류시간, 희석률

균체의 성장률은 보통 슬러지 일령(sludge age)이나 세포 평균 체류시간(mean cell residence time,  $\Theta_x$ ), 또는 슬러지 체류시간(sludge retention time, SRT)으로 나타낸다. 이 조건은 비성장속도( $\mu$ )의 역수와 같다.

$$\Theta_x = \frac{1}{\mu} = \frac{Vx_1}{F_2 x_2 + F_3 x_3}$$

$$= \frac{\text{폭기조 내의 전체 균체량}}{\text{방류수를 따라 나가는 균체량} + \text{폐기 슬러지를 따라 나가는 균체량}}$$

여기서,  $x_1$ ,  $x_2$ 와  $x_3$ 는 각각 폭기조, 방류수와 폐기 슬러지 내의 균체농도이며,  $F_2$ ,  $F_3$ 는 각각 방류수, 폐기 슬러지의 유속이며,  $V$ 는 폭기조의 부피이다(그림 13.2(a)).

수리학적 체류시간(hydraulic retention time, HRT,  $\Theta$ )은 공정 내에서 유입수가 체류한 평균 시간으로 희석률  $D$ 의 역수가 된다. 여기서  $F_1$ 은 유입수의 유속이다.

$$\Theta = \frac{1}{D} = \frac{V}{F_1}$$

(3) 기질부하(substrate loading)

기질부하는 공정부하(plant loading) 또는 슬러지부하(sludge loading)라고도 하며 공정의 기질 투여율이 된다.

$$\text{기질부하} = \frac{\text{기질량}}{\text{단위 생물량} \cdot \text{일}}$$

로도 나타낼 수 있다.

활성 슬러지의 생물학적 활성

활성 슬러지 공정이 성공적으로 운영되려면 floc의 기질흡착(adsorption) 능력이 우수하고, 유기물의 동화(assimilation)와 산화(oxidation) 속도가 빠르며, 질소의 산화가 가능하며, 균체의 응집(flocculation) 성질이 우수하여 2차 슬러지를 효율적으로 침전시킬 수 있어야 한다.

(1) 활성 슬러지의 미생물 조성

활성 슬러지에서 미생물을 분리 동정하는 것은 쉽지 않다. 평판계수(plate counts)에 나타난 집락(colony)이 floc에서 유래된 경우에는 개별적인 세포로부터 생성된 것이라기 보다는 세포들의 덩어리로부터 비롯된 것으로 보아야 한다. 그러나 floc이 아닌 물층에 존재하는 세포에서 유래된 것들은 개별적인 집락을 형성할 것이다. 따라서 평판계수로는 활성 슬러지 floc에 존재하는 우점종(dominant species)을 파악하기가 어렵다.

다양한 분산(dispersion) 방법을 이용하여 활성 슬러지의 세균조성을 알아낸 결과 혼합액

(mixed liquor)은 약  $5 \times 10^4$  마리/ml의 원생동물을 함유하며 수백 개의 다른 종들이 존재할 수 있으나 대부분은 섬모충류(ciliates)들이다. 원생동물은 floc을 형성하는 세균의 종류를 결정하는 데 기여하며 자유롭게 떠다니는 세포들을 포식하여 방류수의 탁도를 감소시킨다. 원생동물은 또한 floc의 구조에 직접적으로 기여할 수도 있는 것으로 생각된다.

## (2) 응집(flocculation)

낮은 비성장속도(specific growth rate)가 응집에 유리한 것으로 알려져 있다. 탄소원이 과량 존재하고 다른 영양물질이 고갈되었을 때 일부 세균들은 고분자물질인 poly- $\beta$ -hydroxybutyrates(PHB)를 축적하며 이 물질이 일부 세균의 응집에 관여하는 것으로 알려졌다. 그러나 PHB를 축적하지 않는 다른 종들도 여전히 응집되며 캡슐(capsule) 또는 점액질층(slime layer)의 형태로 세포 밖으로 분비되는 다양한 고분자 물질(exopoly saccharides 등)들도 응집에 기여하는 것으로 생각된다.

## (3) 응집 방해현상

활성 슬러지가 응집하지 못하여 적절한 침전이 일어나지 않는 것이 공정상 가장 큰 문제점이다. 그 원인에는 팽화 현상, 슬러지 부상, pin-point floc 등이 있다.

### ■ 팽화 현상

Floc 내의 *Sphaerotilus*와 같은 필라멘트형 미생물(filamentous microorganism)이 과다하게 존재하면 세포들이 응집되어도 조밀하게 뭉쳐지지 못하는 팽화현상이 일어난다. 이 경우 floc의 침강이 저해되며 따라서 최종 방류수로 많은 양이 섞여 나가게 된다. 그러나 필라멘트형 미생물이 존재하더라도 팽화현상이 일어나지 않는 경우도 있기 때문에 팽화에는 다른 요소들도 관여하는 것으로 보인다.

### ■ 슬러지 부상(sludge rising)

무산소 층에서 산소 대신 질산염을 최종 전자수용체(terminal electron acceptor)로 이용하는 *Pseudomonas* 등에 의해 탈질화 작용(denitrification)이 일어나면 질산염(nitrate)이 질소기체로 환원되고 이산화탄소가 발생한다(13.4절 참조). 따라서 기포가 생성되어 floc의 부력을 증가시켜 부상하게 하여 방류수에 섞여 나가게 된다.

### ■ pin-point floc

Pin-point floc은 정상적인 floc 군집이 낮은 기질농도의 조건에서 극도의 내생 호흡(endogenous respiration)을 거친 후에 남게된 생물학적으로 난분해성의 잔류물로서 침전이 잘 안되는 매우 작은 입자이다.

## (4) 질화작용(nitrification)

암모니아는 ppm 정도의 농도라도 물속에서 사는 생물에 독성을 미치고 산소 요구도를 높인다. 가정 하수는 미생물 성장용 배지라는 측면에서는 탄소가 제한된 배지이므로 미생물의 성장에 의해 제거되는 암모니아는 그 양이 그리 많지 않다. 이 보다는 암모니아를 에너지원으로 이용하는 특정한 호기성 독립영양체인 *Nitrosomonas*와 *Nitrobacter*가 암모니아를 아질산염

(nitrite)을 거쳐 질산염(nitrate)으로까지 산화시킴으로써 암모니아를 제거하는데 이 과정을 질화작용이라고 한다.

#### (5) 탈질화작용(denitrification)

암모니아가 질화작용에 의해 아질산염과 질산염이 된 폐수가 유입된 물을 마시면 건강상 큰 위험이 된다. 아질산염은 음식물에 있는 아민(amines)과 반응하여 발암성이 매우 높은 니트로스아민(nitrosamines)을 형성하기 때문이다. 질산염은 어린아이나 가축의 장 내에서 아질산염으로 환원되어 혈액으로 들어가 헤모글로빈과 결합하며 이로 인해 헤모글로빈의 산소운반을 저해하게 된다. 따라서 아질산염과 질산염을 제거하기 위하여 탈질화공정을 거쳐야 한다.

탈질화작용은 *Pseudomonas spp*같은 통성 호기성 종속영양체들이 용존산소가 없을 때 최종 전자수용체로 질산염을 사용하여 일어나는 과정이다. 그러나 일반적으로 질산염으로 전자를 줄 수 있는 호흡기질이 부족하므로 탈질화공정이 효과적으로 수행되기 위해서는 탄소기질을 추가로 공급해야 한다.

### 운전상의 변형

호기성 공정의 변형공정에는 완전 혼합법, 플러그 흐름법, 점감식 폭기법, 계단식 폭기법, 접촉 안정법 등이 있다(그림 13.3).

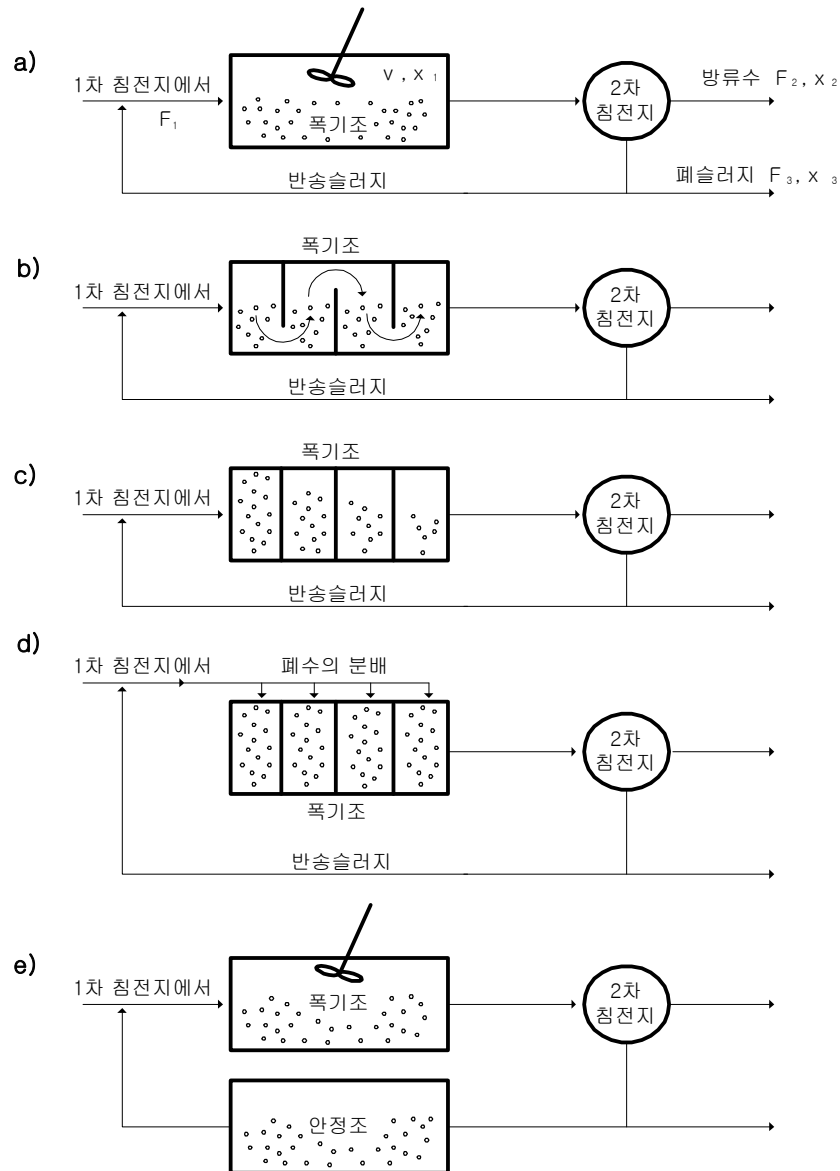
#### (1) 완전 혼합법

완전 혼합법(completely-mixing system)은 그림 13.3(a)처럼 1차 침전지에서 나온 폐수를 폭기조 내에서 반송슬러지와 완전히 혼합한 후 5~24시간 정도 폭기하여 전체 폭기조 내의 유기물농도와 산소이용률을 균일하게 한다. 적당한 체류시간 경과 후 폐수는 2차 침전지로 옮겨진다. 2차 침전지에서 2~5시간 슬러지를 침전시켜 일부는 반송슬러지가 되어 폭기조로 돌려 보내지고 나머지는 슬러지 처리시설로 보내진다.

#### (2) 플러그 흐름법

반송슬러지와 1차 침전지에서 보내진 폐수가 폭기조 입구에서 혼합된 후 더 이상의 혼합없이 계속해서 길이 방향으로 흐르도록 설계된 것이 플러그 흐름법(plug-flow system)이다(그림 13.3(b)). 폭기조를 따라 흐르는 동안 유기물의 분해가 일어나므로 폐수 내 기질(유기물)농도와 산소요구량 및 용존산소의 기울기가 생기게 된다. 즉, 폭기조 유입부에서는 유기물농도와 산소요구량이 높고, 폭기조 유출부에서는 유기물농도와 산소요구량이 낮게 된다. 따라서 공기유입을 전 폭기조 내에 균일하게 하면 폭기조 위치에 따라 용존산소농도에 차이가 생긴다.

점감식 폭기법(tapered aeration system)은 이러한 용존산소농도의 차이를 시정하기 위해 폭기조 유입부쪽에 공기를 많이 주입하고 유출부쪽으로 갈수록 공기주입량을 줄이는 방



(a) 완전 혼합법, (b) 플러그 흐름법, (c) 점감식 폭기법, (d) 계단식 폭기법, (e) 접촉안정법

그림 13.3 활성 슬러지 공정의 예

법이다(그림 13.3(c)). 계단식 폭기법(step-aeration system)이란 폐수가 전량 폭기조 유입부에 공급되는 것이 아니라 폭기조의 길이에 따라 몇 번에 나뉘어 주입함으로써 유기물농도와 산소요구량을 비교적 균일하게 만드는 것이다(그림 13.3(d)).

### (3) 접촉안정법

접촉안정법(contact-stabilization system)은 폐수를 폭기조에서 짧은시간(약 30분) 동안 폭기시킨 후 2차 침전지에서 슬러지를 분리시키고 안정조(stabilization tank)에서 반송슬러지를 약 6시간 재폭기시키는 방법이다(그림 13.3(e)). 이 방법은 높은 흡착 능력을 가진 미생물을 이용



하여 폭기조 내의 유기물질을 슬러지에 신속히 흡착시켜 제거하며, 이런 폭기조를 일명 접촉조 (contact tank)라고도 부른다.

#### (4) 장기 폭기법

장기 폭기법(extended aeration system)은 폭기를 12시간 이상 장시간 하는 방법으로 폭기조 내 미생물들이 유기물 고갈로 인해 자산화(autooxidation)되어 균체량(슬러지량)의 상당량이 감소하여 폐기될 잉여 슬러지의 양을 적게하는 방법이다. 또한 산화율이 높아지므로 질화세균(nitrifying bacteria)에 의한 질소화합물의 질화작용이 잘 일어나기 때문에 질소함유량이 높은 폐수를 처리하는 데 효과적이다.

#### 활성 슬러지의 미생물

활성 슬러지법에 관여하는 미생물은 수천 종으로 추정되며 이들 중 상당수가 현재의 미생물배양법으로는 순수분리 및 동정이 불가능하다. 대부분의 미생물들은 슬러지 floc에 응집되어 있으나 일부는 폐수 내에서 자유로이 부유 생활을 하고 있다.

이들 미생물은 박테리아, 균류, 조류, 원생동물로서 중속영양 박테리아가 대부분이다. 박테리아는 사체기생성(saprophytic) 원생동물과 더불어 가장 낮은 영양단계를 구성하며 활물영양성(holozoic) 원생동물과 윤충류(rotifer)가 이들을 먹고산다. 슬러지 floc에는 대부분의 박테리아들이 죽어있는 상태이며, 건조중량 1g당  $10^7 \sim 10^9$  마리 정도의 살아있는 미생물 세포들이 존재한다. 박테리아 종류 중 대표적인 것들과 기능이 표 13.1에 나타나 있다.

표 13.1 활성 슬러지에서 작용하는 박테리아와 그 기능

속	기능
<i>Arthrobacter</i>	탄수화물 제거
<i>Pseudomonas</i>	탄수화물 제거, 탈질작용
<i>Bacillus</i>	단백질분해
<i>Nitrosomonas</i>	질화작용
<i>Nitrobacter</i>	질화작용
<i>Sphaerotilus</i>	filament 형성
<i>Zoogloea</i>	점액질 형성
<i>Acinetobacter</i>	Polyphosphate 저장
<i>Cytophaga</i>	고분자 중합물 분해

#### 13.2.2 생물막 처리법

생물막 처리법은 폐수가 고체입자의 표면에 형성된 생물막을 따라 흐르면서 호기성 미생물들에 의해 대사되는 방법이다. 폐수 내의 용해성 유기물과 용존산소는 막 내부로 확산되고 이산화탄소, 물, 그리고 기타 대사산물은 폐수층으로 방출된다. 이 과정을 통해 생물막이 점차 두꺼워지면서 유기물과 산소의 농도기울기가 생기고 표면에 0.1~0.2 mm 정도의 호기성층 안쪽으로는 산소나 유기물이 전혀 확산되어 들어가지 못하는 혐기성층이 생긴다. 이 혐기성층에서는 미생

물들이 내생호흡(endogenous respiration)을 하게 되며 고체표면에 대한 부착력을 잃어버린다. 이때 폐수흐름 또는 고체매질의 이동으로 전단력(shear force)이 생겨서 막이 떨어지는 탈리(sloughing)가 일어난다. 막이 탈리되면 보통 표면에 얇은 생물막이 남게 되는데 이 생물막에 산소와 유기물이 공급되어 새로운 생물막이 형성된다. 떨어져 나온 생물막(sloughed biofilm)은 침전조에서 침전시켜 제거한다. 생물막의 모식도 및 막 내부의 산소와 유기물의 농도 분포는 그림 13.4와 같다.

생물막을 이용한 실제 폐수 처리방법으로는 살수여상법(trickling filter), 회전원판법

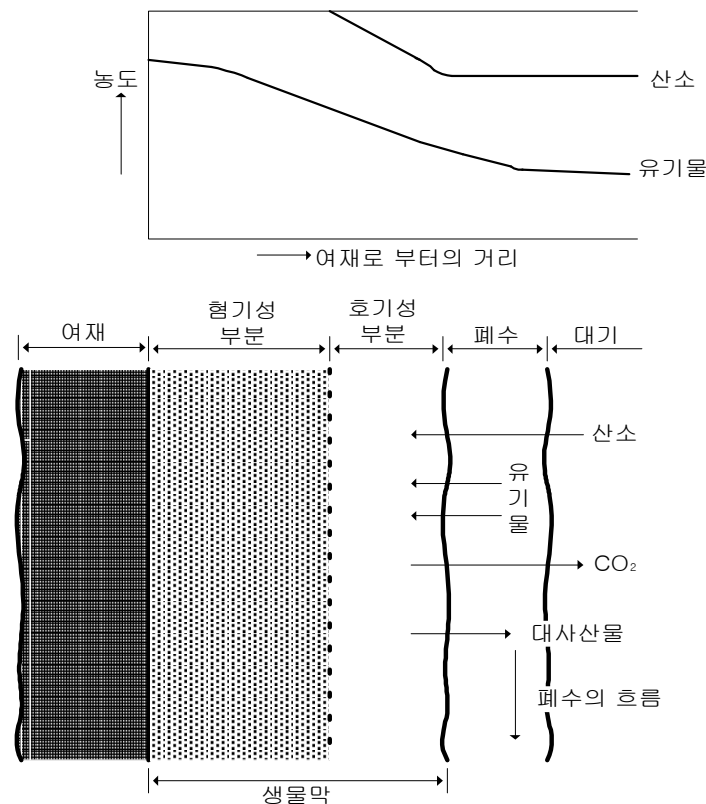


그림 13.4 생물막의 구조 및 생물막 내부의 산소와 유기물 농도분포

(rotating biological contactor), 활성 생물막법(activated biofilter), 침적여상(submerged filter)과 여러 가지 혐기성 생물막 공법 등이 있다.

생물막에서 확산이 고려되어야 하는 반응에 대한 속도식은 10장을 참조하여라.

### 살수여상법

살수여상법(trickling filter bed)은 가장 흔히 사용되는 생물막 반응기인데 입자 크기가 5~10 cm인 쇄석, 자갈, 소피(clinker), 또는 광재(slag)로 채워진 원형 또는 사각형 여상(filter bed)으로 구성되어 있다. 여상을 채우는 물질을 여재(media)라 부르는데 보통 1.5~2.0 m 깊이이며 집수장치(underdrain) 위의 큰 돌들로 된 층으로 지탱된다. 여상 위에는 살수장치(distributor)가 있어서 여상표면 위에서 1차 침전을 거친 하수를 살수한다. 원형여상에서는 보통 4개의 방

사상 살수관으로 구성되어 있다.

살수여상에서 상당기간 동안 균체의 농도가 안정상태에 있지 않을 수도 있다. 막의 생장은 기질이용에 의해 조절되며 막의 축적률은 폐수가 흘러내리면서 막을 벗겨내는 탈리(sloughing) 효과와 포식(grazing)에 의한 제거효과 때문에 한계가 있다. 살수여상은 고행지지물, 생물막, 폐수에 젖은 표면, 공기 공간, 그리고 비교적 건조한 지역 등으로 구성되어 전체적으로 활성 슬러지보다 더욱 복잡한 서식처를 제공한다. 살수여상에는 곤충의 유충과 선충류(nematode)를 포함한 다양한 공기호흡을 하는 고등동물까지 존재하게 된다. 이것들은 생물막을 직접 섭취하여 막의 양을 감소시키고 호흡활동에 의해 전체적인 2차 슬러지 생산을 감소시킨다.

### 회전원판법

회전원판법(rotating biological contractor, RBC)은 살수 여상보다 발전된 폐수처리법으로 회전축(shaft)에 수직으로 가까이 배치한 얇은 원형판들을 폐수가 흐르는 물통에 약 40% 정도가 잠기게 한 후 수직축을 1rpm 속도로 회전시킨다(그림 13.5). 원판이 회전하며 폐수에 잠기는 동안에는 호기성 생물막이 폐수 내의 유기물을 제거하며, 생물막이 공기에

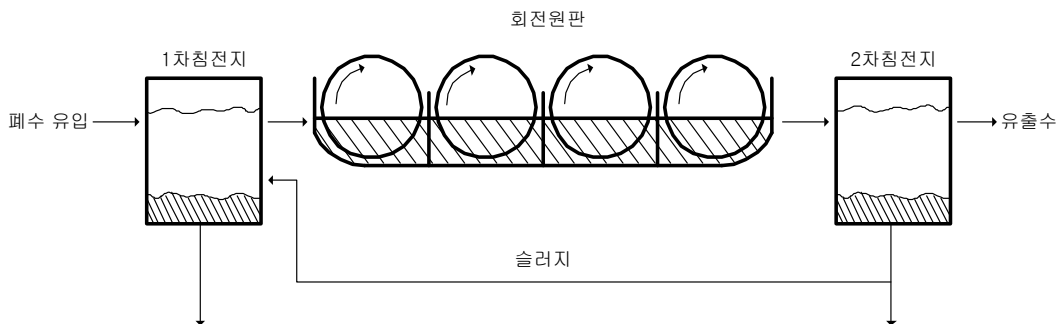


그림 13.5 회전원판법의 처리과정

노출되면 산소의 지속적인 공급이 이루어진다. 원판표면에 두꺼운 생물막이 생성되면 원판의 회전으로 인한 전단력 때문에 막이 탈리되고 탈리된 생물막은 2차 침전지에서 제거된다.

회전원판법에 의한 폐수처리시 미리 1차 처리를 하는 것이 바람직하다. 1차 처리를 안할 경우 회전원판법 반응조 내에 고행유기물 등이 축적되면 혐기성 조건이 되어 악취가 발생한다. 회전원판법 처리공정은 일반적으로 3~4단으로 분리된 회전축이 직렬로 연결되어 있는 다단 구조로 이루어져 있으며 폐수가 각 단계를 지나면서 처리율이 높아진다.

### 기타 생물막 공정

침적여상(submerged filter)은 표면적이 큰 접촉재(쇄석, 세라믹, 원판, 또는 벌집형 플라스틱 제재 등)의 표면에 형성된 생물막이 지속적으로 폐수 내에 잠겨있게 하여 유기물을 처리하는 방법이 있다.

## 13.3 혐기성 폐수처리

혐기성 처리(anaerobic treatment)는 호기성 처리(aerobic treatment)에 비해 높은 생물학적 산소요구량(biological oxygen demand, BOD)를 가진 폐수나 폐기물의 처리에 적합하다. 혐기성 소화공정(anaerobic digestion process)은 하수처리에서 나오는 폐기 슬러지를 최종 처분하기 전에 처리와 안정을 위한 방법으로 이용해 왔다.

혐기성 슬러지 소화(sludge digestion)의 주된 목적은 악취를 제거하고, 슬러지의 부패 현상을 저하시키며, 병원체의 숫자와 미생물 활성을 감소시키는 것 등이다. 슬러지가 소화되면 30~40%의 고형물이 기체로 전환되면서 유기물이 감소되고 안정된다.

혐기성 처리는 산소전달의 제한을 받지 않으므로 호기성 처리에서 감당하지 못하는 고농도 기질의 폐수도 처리할 수 있다. 혐기성대사는 에너지 생성률 및 세포 생성률이 낮아서 슬러지 발생량도 매우 적다. 또한, 최종 산물인 메탄(methane)은 가연성 기체이므로 에너지원으로 활용할 수 있다. 그러나 혐기성 시스템은 처리속도가 늦고 그로 인해 체류시간이 길며 독성물질에 대한 민감성이 크고, 악취가 심하고, 공정이 불안정한 단점을 가지고 있다.

### 13.3.1 혐기성 슬러지 소화

#### 공정의 개요

혐기성 소화란 슬러지에 존재하는 탄수화물, 지방, 단백질의 형태의 유기 고형물을 가수분해하고 발효시켜 궁극적으로 메탄으로 전환시키는 혐기성 미생물들의 일련의 혼합

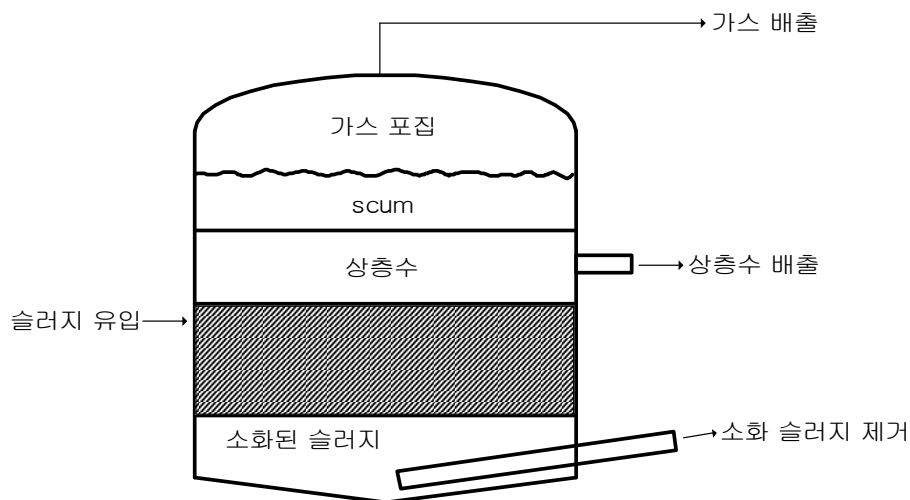


그림 13.6 혐기성 소화장치 개념도

배양 과정을 말한다. 보통 슬러지의 유기 고형물량은 이런 방법에 의해 50%까지 감소한다.

소화조(digester)는 보통 균체가 재순환되지 않는 반응기를 사용한다. 생성되는 메탄가스를 포집하기 위해 떠있는 덮개(floatation cover)가 설치된 밀폐된 반응기가 사용되던가 부피가 고정된 반응기에서 별도의 기체 저장장치를 설치한다(그림 13.6).

혐기성 소화공정은 슬러지를 그다지 혼합할 필요가 없다. 저속 소화는 거의 혼합을 하지 않으

나 고속 소화에서는 간헐적으로 혼합한다. 대부분의 재래식 소화조는 반회분식(semi-batch)으로 운영되어 새로운 슬러지(raw sludge)의 투여와 안정된 산물의 회수가 1주일 정도의 간격으로 간헐적으로 수행된다.

### 혐기성 소화의 대사경로

고분자량의 유기물이 분해되어 메탄이 형성되기까지 거치는 네 단계의 반응은 가수분해(hydrolysis), 분해산물의 발효(fermentation), 휘발성 지방산으로부터 초산의 생성(acetic acid production), 발효 최종산물을 기질로 이용한 메탄생성(methanogenesis)이다.

#### (1) 가수분해

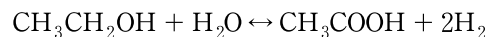
탄수화물은 아밀라아제 등에 의해 가수분해되어 포도당이 된다. 대부분의 세포 외 지질 분해효소들(extracellular lipases)은 *Clostridia*와 *Micrococci*에 의해 생성된다. 이 효소들은 triglycerides를 분해하여 반응산물로 지방산(fatty acids)과 글리세롤을 만든다. 단백질 분해효소들(proteases)은 상당히 넓은 pH 범위(5~11)에서 작용한다. pH 7~8 범위에서 활성을 보이는 특정한 효소들은 아연을 함유하는 금속 단백질(metalloprotein)로 EDTA같은 강력한 chelating agents에 의해 저해받는다.

#### (2) 발효

아미노산과 당류는 가장 쉽게 발효될 수 있는 기질들이며 일부 혐기성 미생물들은 alkanolic acid, 퓨린(purines), 피리미딘(pyrimidines) 등을 발효하기도 한다. 당류는 보통 알코올로 발효된다. 아미노산이 발효되면 중요한 중간물질인 피루브산(pyruvate)이 생성되고 이로부터 젖산(lactate), 프로피온산(propionate), 부티르산(butyrate), 포름산(formate), 초산(acetate)이 생성된다. 초산(acetate)이 주된 최종 생산물인 산생성 발효(acidogenic fermentation)는 혐기성 소화에서 가장 중요하다. 초산, 프로피온산, 부티르산, 카프로산(caproate), valerate, heptanoate 들은 혐기성 소화공정에서 중요한 중간물질로서 휘발성 지방산(volatile fatty acids)이라고 알려진 화합물들이다.

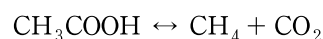
#### (3) 초산생성

절대 수소발생 초산생성 박테리아(obligatory hydrogen-producing acetogenic bacteria)는 에틸알코올을 초산으로 전환한다.



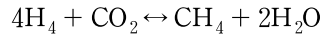
#### (4) 메탄생성

초산이 중요한 기질이기는 하지만 그로부터 메탄을 생성할 수 있는 박테리아는 극소수이다.



초산분해 박테리아(acetoclastic bacteria)인 *Methanosarcina barkeri*는 메탄올( $\text{CH}_3\text{OH}$ )을 기질로 이용할 수도 있다. 메탄생성 박테리아의 일부는 포름알데히드( $\text{HCHO}$ )도 기질로 이용할

수 있다. 이들 박테리아들은 이산화탄소를 최종 전자수용체(terminal electron acceptor)로 이용하여 수소분자의 산화로부터 에너지를 얻는 것으로 알려져 있다.



이 반응은 메탄생성 박테리아들에게 공통이다. 그러나 이산화탄소를 환원하는 경우보다 초산으로부터 발생하는 메탄이 약 2배이다.

### 소화슬러지 내의 미생물

혐기성 소화는 균류와 원생동물의 역할없이 거의 전적으로 박테리아의 활성에 의한 것으로 보인다. 슬러지에서 발견되는 박테리아는 크게 가수분해균, 발효균, 메탄생성균의 3가지로 나뉜다.

슬러지로부터 분리된 박테리아 중 많은 것이 *Clostridia*, *Bacteroides spp.*, *Pseudomonas*, *Bacillus spp.* 등이다. 혐기성 소화의 주된 발효미생물은 절대 혐기성 세균들(obligatory anaerobic bacteria)이다. *Clostridium spp.*는 *Butyribacterium*, *Propionibacterium*, *Megasphaera spp.*와 더불어 발효균으로도 탁월하다. *Streptococci*와 *Lactobacilli*도 발견될 수 있다. 메탄생성 박테리아들도 절대 혐기성이다.

혐기성 공정은 환원적 조건(reduced condition)에서 이루어지기 때문에 특징적인 황화수소( $\text{H}_2\text{S}$ ) 냄새를 발생한다. 이때 황화수소의 일부는 시스테인 등 황 함유 아미노산에서 유래되나, 대부분은 미처리 하수에 존재하는 황산염이 혐기성 세균인 *Desulfovibrio desulfuricans*에 의해 환원되어 생성된다. 폐수가 처리장에 도달하기 전에 하수도에서 위 환원반응이 일어나면 황산화 세균인 *Thiobacillus sp.*가  $\text{H}_2\text{S}$ 를 호기적으로 재산화하여 황산을 만들기 때문에 하수도의 콘크리트 벽이 부식된다.

### 13.3.2 기타 혐기성 폐수 처리방법

혐기성 연못(anaerobic pond)은 경사가 급한 벽으로 둘러싸인 깊이 4.5m 정도의 연못으로 폐수가 바닥 부근으로 유입되고 슬러지층(sludge blanket)에 있는 미생물에 의해 유기물이 제거된 상층수가 형성된다. 이 상층수 표면을 몇 cm 두께의 그리이스(grease)가 덮고 있어 열 손실과 악취발생을 방지하고 혐기성 상태를 유지시켜 준다. 처리수의 방류관은 연못 반대편 끝의 그리이스층 밑에 위치하며 처리수의 유출시에 세균의 floc이 침전하므로 혐기성 슬러지가 계속 하층에 남아 있게 되며 슬러지의 재순환은 불필요하다. 혐기성 연못에서 혐기성 세균들은 유기물을 분해하여  $\text{CO}_2$ 와  $\text{CH}_4$ 을 생성하며, 부수적으로 유기산과 황화수소와 같은 악취물질도 발생한다.

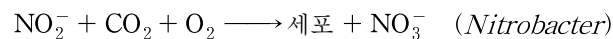
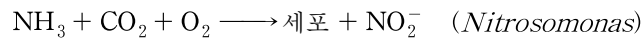
정화조(septic tank)는 가장 간단한 형태의 혐기성 처리장치로 하수시설이 없는 시골지역에서 많이 이용된다. 유기물의 혐기성 분해가 제한되게 일어나며 슬러지와 잔류고형물은 바닥에 침전되고 상부에 스크(scum)층이 생기게 된다. 바닥에서 생성되는 가스에 의해 폐수가 섞이게 되므로 유출수에는 부유물질이 많이 함유되어 있다. 이런 유출수를 침출지(leaching field)에

살포하여 호기성 미생물에 의해 분해가 일어나게 한다. 따라서 침출지는 상수원 근처에 위치하지 않도록 주의하여야 한다. 임호프(Imhoff)조는 보다 발전된 형태의 정화조로 혐기성 조건을 보다 엄격하게 유지하여 유용한 메탄을 생성시키는 장치이다.

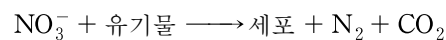
### 13.4 생물학적 고도 처리

폐수의 3차 처리(tertiary treatment)는 1, 2차 처리에 의해 제거하지 못한 난분해성 유기물과 무기영양소, 특히 질소와 인의 제거가 주요목적이며 고도처리(advanced treatment)라고도 한다. 클로로페놀(chlorophenol), PCB와 같은 유기염소화합물을 포함한 많은 종류의 난분해성 유기화합물은 대부분 독성을 함유하고 있기 때문에 이들을 폐수로부터 제거하여야 한다. 또한 질소화합물과 인산염은 수계에서 부영양화(eutrophication)를 유발하여 여러 가지 악영향을 초래한다. 질소화합물 중 암모니아는 그 자체가 동물체에 독성을 나타내며 아질산염과 질산염으로 산화되면서 용존산소를 소모시킨다. 일반적으로 생물학적 고도처리는 2차 처리가 끝난 후 별도의 처리과정을 두지않고 주로 2차 처리공정을 변형시켜서 유기물 제거와 동시에 영양염류와 난분해성 유기물을 제거하게 된다.

생물학적 고도처리에서 대표적인 것이 질소 제거(nitrogen removal)인데 그 원리는 연속적인 질화작용/탈질화작용을 이용하는 것이다. 먼저 폐수 내의 유기질을 종속 영양박테리아들이 암모니아로 전환시킨다. 질화박테리아들(*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*)은 종속 영양박테리아와의 경쟁에서 뒤지며 절대 호기성이고 또한 유기물에 의해 저해를 받으므로 보통 질화작용은 유기물이 어느 정도 제거되며 용존 산소가 풍부한 조건에서 잘 일어나게 된다.



탈질화작용(denitrification)은 질소 환원반응으로 혐기성 박테리아들(*Pseudomonas spp*)이 질산염을 전자 수용체로 이용하여 질소가스로 환원시키는 과정이다.



생물학적 인(phosphorus) 제거방법은 폐수처리에 관여하는 미생물들이 인을 과잉 섭취하게 하여 제거하는 방법인데, 활성 슬러지법에서는 슬러지를 혐기성 조건과 호기성 조건에 반복해서 노출시키면 인 함유율이 높은 슬러지를 생성하는 원리를 이용한다. 즉, 혐기성 상태에서는 유기물을 흡수하여 polyhydroxybutyrate (PHB) 형태로 저장하며 인을 세포 밖으로 방출하고 다음에 호기성 상태에서는 저장된 탄소원을 사용하여 인을 과잉 섭취하여 polyphosphate의 형태로 세포 내에 저장한다. 인 제거에 관계되는 미생물로는 *Acinetobacter*가 있으며 그 외에 *Bacillus*, *Aeromonas*, *Pseudomonas* 등도 관여한다.

질소와 인을 동시에 제거하는 방법으로 조류(algae)를 배양하는 방법이 있다. 이 방법은 2차 처리가 끝난 처리수를 안정지에서 조류가 성장하면서 폐수 내의 질소와 인을 제거시킨 후 조류를 거둬내는 방법이다. 그러나 이 방법은 조류가 광합성을 하여 성장하기 때문에 태양광이 충분한

계절과 지역에서만 적당하다. 이 문제를 극복하기 위하여 태양광의 접촉면적을 넓힌 새로운 형태의 조류배양기가 개발되었다. 조류생장이 왕성하면 광합성에 의해 이산화탄소가 소모되어 pH가 상승하여 물에 용해되어 있던 인산이 침전되는 문제점이 있다.