

# 폐하수처리 미생물과 사상균의 분류특성 및 제어방법

〈1〉

宋 準 相

(국립환경연구원 연구담당관)

## 제1장 폐하수처리미생물

### 1. 미생물의 정의 및 특징

#### 가. 정의

일반적으로 산업폐수 및 생활하수의 생물학적 처리에 관계하는 미생물의 종류는 약 1,000-2,000종에 이르는 것으로 추정된다. 이와 같은 미생물의 범위는 매우 넓어서 세균, 균류는 물론이고, 조류, 원생동물, 후생동물까지 포함한다.

미생물을 정의하기는 매우 어렵지만 일반적으로 정의하면, 현미경과 같은 도구를 이용하지 않고는 식별할 수 없는 작은 생물, 즉 개체의 크기가 1mm 정도 이하의 생물로 세포 분화나 조직 분화가 잘 되어 있지 않은 하등생물이다. 산업폐수 및 생활하수 처리 분야에서는 이상의 정의에 포함되는 생물을 모두 미생물에 포함시키고 있다.

#### 나. 특징

미생물은 자연계 물질 순환에서 분해자이며, 청소원으로 역할을 충실히 수행하고 있으며 다음의 중요한 4가지 특징을 가지고 있다.

첫째, 미생물은 대사속도(Metabolic Rate)가 빠르므로 각종 오염물질을 쉽게 분해할 수 있다. 미생물은 고등생물에 비하여 크기가 작으므로 세포 부피당 체표면적이 매우 크므로 쉽게 영양분(오염물질)

을 흡수하고 배설할 수 있으므로 대사속도가 매우 빠르다.

둘째, 미생물은 증식속도(Growth Rate)가 매우 빠르다. 미생물은 세대시간(Generation Time)이 짧아서 단시간에 많은 수로 증식된다. 대장균은 세대시간이 약 15분 정도이므로 한마리의 대장균은 24시간 후에는 약 10억 마리로 증식된다.

셋째, 대사활성(Metabolic Diversity)이 다양하다. 즉 미생물은 탄수화물, 단백질, 지방과 같은 양질의 영양물질 뿐만 아니라 농약, 플라스틱, 합성세제와 같은 독성 유기물질 등도 분해하는 다양한 식성을 가지고 있다.

넷째, 미생물은 자연계에 널리 분포되어 있다. 미생물은 지구상의 어느 곳에도 존재하므로 오염물질이 있는 곳에서는 충실한 청소원으로의 역할을 수행할 수 있다.

#### 다. 미생물의 분류

그림 1은 미생물의 종류를 체계적으로 분류하고 요약하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 작고 미세한 후생동물까지도 미생물의 범위에 포함시키고 있으며, 이와 같은 후생동물은 윤충류, 선충류, 원시빈모류 등 극히 작은 생물이므로 미생물에 포함시켜 분류한다.

또한 미생물은 핵의 형태에 따라서 진정핵균(Eucaryotes : 핵의 구

성물질이 핵막으로 싸여 분리된 세포핵을 가진 생물)과 원시핵균(Prokaryotes : 핵의 구성물질이 핵막으로 싸여 있지 않고 세포질 내에 존재하여 핵이 분리되어 있지 않은 생물)으로 분류하기도 하는데 세균류와 남조류 등이 후자인 원시핵균에 속하며 원생동물, 균류(Fungi), 조류, 후생동물 등이 후자인 진정핵균에 속한다.

생물을 분류하는데 기본적인 단위는 종(species)이며, 종은 형태학적, 생태학적, 생물학적으로 타종과 구별되는 특징이 있다. 생물의 종을 기록하는 데는 이명법이 사용되는데 이는 속명(Genus name)과 종명(species name)을 라틴어로 기록하는 방법이며, 이것을 학명(Scientific Name)이라고 부르며 세계 공통으로 사용한다. 학명을 기록 시에는 속명은 대문자로 시작하고, 종명은 소문자로 시작하며 이태릭체로 쓰든지, 그렇지 않으면 밑줄을 긋는 것이 학명 표기법의 원칙이다.

또한, 종명의 뒤에 명명자의 이름을 적으며 다음의 예에서 보는 바와 같이 속명, 종명, 명명자의 순으로 적는다.

(예)

*Vorticella microstoma* Ehrenberg  
Vorticella microstoma Ehrenberg  
(속명) (종명) (명명자)

생물을 분류하는 데는 계(Kingdom), 문(Phylum), 강(Class), 목(Order), 과(Family), 속(Genus), 종(species)으로 생물의 상호간의 관련성에 따라서 대분류에서 소분류로 나누게 되며 이들을 좀더 상세하게 분류하기 위하여는 문과 강 사이에 아문, 강과 목 사이에 아강목과 과 사이에 아목, 과와 속 사이에 아과 등을 설정하기도 하며 다음의 표 1는 생물학적 폐수처리에 관계하여 양호한 활성 슬러지 처리시 나타나는 *Carachesium polypinum* 과, *Arcella vulgaris*, *Pristina longiseta* 를 분류 방식에 따라서 나타낸 것이다.

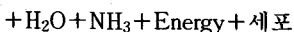
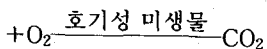
## 2. 미생물의 슬러지 형성

### 가. 폐하수 정화 기전

미생물에 의한 정화기전은 슬러지 미생물의 이화작용(Catabolism)과 동화작용에 의하여 이루어진다. 이화작용이란 오염물질인 유기물질을 슬러지 미생물이 분해하면서 에너지를 얻어 생존하는 것을 말하며, 동화작용은 슬러지 미생물이 유기물질을 흡수하여 자기 세포로 증식하는 작용을 말한다. 그러므로 이화작용에 의하여 오염물질은 호기성 분해 시에는 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> 등이 생성되며, 혐기성 분해 시에는 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, 유기산, 알코올 등이 생성된다. 동화작용에 의하여 슬러지 미생물의량은 증가하므로 생물학적 처리시 잉여 슬러지는 제거하여야 한다.

#### ○호기성 처리 시

분뇨(유기물질)



#### ○혐기성 처리 시

환경관리인. 1990. 11

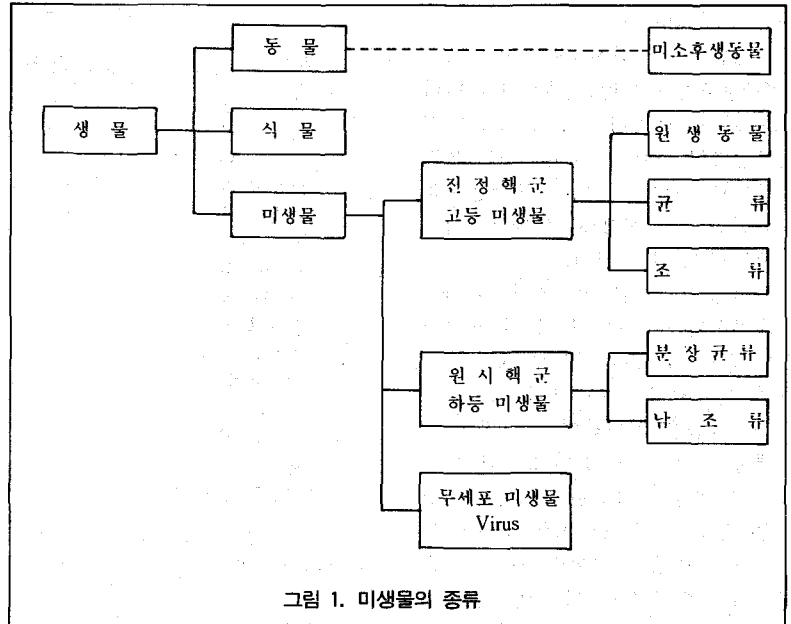


그림 1. 미생물의 종류

표 1. 생물의 분류 방법

屬種 (Genus species)	<i>Carachesium polypinum</i>	<i>Arcella vulgaris</i>	<i>Pristina longiseta</i>
科 (Family)	보티셀라과 (Vorticellidae)	아르셀라과 (Arcellidae)	내디다과 (Naididae)
目 (Order)	녹모목 (Peritricha)	유각아메바목 (Testacida)	원시번모목 (Archilongochaeta)
亞綱 (Subclass)	전모아강 (Holotricha)	근족충아강 (Rhyzopodea)	
綱 (Class)	섬모충강 (Ciliata)	육질충강 (Sarcodina)	번모강 (Oligochaeta)
門 (Phylum)	원생동물문 (Protozoa)	원생동물문 (Protozoa)	환형동물문 (Annelida)

분뇨-혐기성 미생물 CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub>  
+유기산+알코올+에너지+세포

생물학적 폐수처리에는 순수 배양된 미생물을 이용하지 않고 자연 발생적으로 증식된 미생물군을 이용하는 것이 보통이다. 그러므로, 활성 슬러지법의 폭기조나 생물막법의 반응조에서 증식하는 미생물의 종류는 20-30종 이상으로 혼합 배양계를 이루고 있으며 하나의 작

은 미생물 생태계를 구성하며 안정된 미생물 군집으로 생태계를 이룬 처리조에서는 양호한 처리효율을 나타내며, 불안정한 생태계를 이룬 미생물로 구성된 처리조에서는 처리효율이 불량한 것이 보통이다.

#### 나. 생물학적 폐하수 처리에 나타나는 미생물의 비교

표 2는 각종 생물학적 폐수처리에 출현하는 미생물을 비교하여 나

타낸 것이다.

일반적으로 활성슬러지의 미생물이 생물막보다 많은 종류가 나타나며 활성슬러지에는 주로 세균과 섬모충류(녹모류, 하모류 등)가 우점종으로 출현하며 미소 후생동물의 출현빈도는 적으나 생물막에서는 이들의 출현이 많다.

활성 슬러지법의 폭기조에서는 폐하수와 슬러지 미생물이 혼합되어 폭기(Aeration)하므로 폐하수 중에 함유되어 있는 오염물질 주로 유기물질을 산화하여 처리되고 미생물은 폐하수와 같이 흐르게 되므로 미생물 현탁법이라고 한다. 활성 슬러지법은 200-1,000micron 부정형의 미생물 덩어리(Floc)가 슬러지를 형성하며 이들 Floc은 주로 세균이 응집되어 있으며 이 주위에 작고 미세한 원생동물이 고착되어 있다. 활성 슬러지법에서는 미생물과 폐하수가 같이 유동하므로 증식속도가 느린 미생물 즉 세대 시간(Generation Time : 미생물의 개체수가 2배로 증식하는데 걸리는 시간( $t_d$ ))이 2-5일 이상 소요되는 미생물은 폭기조에 체류하지 못하므로 씻겨 흘러나가게 되므로 증식하지 못하나 이와 반대로 생물막법에서는 미생물이 접촉재의 표면에 고착되어 증식하므로 미생물의 체류시간에 관계 없으므로 증식속도가 느린 미생물도 생물막법에서는 증식할 수 있으므로 일명 미생물 고정법이라고 한다.

다. 폐하수 처리 미생물의 종류별 개요

1). 세균(Bacteria)

폐수의 BOD를 제거하는데 직접적인 영향을 미치는 미생물의 대표적인 것이 세균이다. 세균은 박테리아(Bacterium, 복수형 Bacteria)라고 불려지고 가장 작은 미생물이다. 형태학적으로는 비교적 단순하

표 2 각종 생물학적 분뇨 처리에 출현하는 미생물의 비교

미생물의 종류	활성슬러지	생물막	산화지	염기성소화
세균	+++++	+++++	++++	+++++
균류	++	++++	+	-
조류	+	+++	+++++	-
편모충류	+++	+++++	+++	+
육질충류	+++	+++++	++	-
섬모충류				
녹모류	+++++	+++++	+	-
하모류	+++++	+++	++	-
홀관충류	++	++	+	-
그밖의섬모충류	+++	+++++	++	-
미소 후생동물				
수충류	++	+++++	+	-
선충류	++	+++	+	-
빈모류	+	+++	+	-
그밖의 후생동물	+	++	++	-

+++++: 매우 많이 출현 ++++: 많이 출현 +++: 보통 출현 ++: 드물게 출현 +: 매우 드물게 출현 -: 출현하지 않음

다. 광학 현미경으로 그 존재를 확인하는 것은 가능하나 일반적으로는 생리학적 시험을 이행하지 않고는 세균을 동정(Identification)할 수 없다.

세균은 그 형태에 따라 구균, 간균, 콤마상 균, 나선균으로 크게 분류된다. 구균은 공 모양의 세균이고, 구의 배열 형태에 따라 쌍구균, 연쇄상구균, 사연구균, 팔연구균, 포도상구균으로 나눌 수 있다. 활성 슬러지에는 일반적으로 구균이 나타나지 않는다. 간균은 원통상의 세균이고 끝부분이 둥근 것, 둥글고 짧은것(단간균), 뾰족한 것등이 있다. 나선균은 가늘고 긴 균체가 나선상태로 운동한다.

생물학적 폐수처리에 나타나는 세균은 보통 간균이나 단간균에 속하고 대부분의 구균은 직경 0.5-1.0 μm, 간균은 0.5-1.0×1.0-2.0 μm 정도의 그람 음성 균이 많다. 세균은 가장 하등의 단세포 생물이며, 세포는 통상 핵과 세포질로 이루어졌다. 핵은 주로 유전에 관계되는 역할을 하고 세포질은 대사에 관계하고 있다. 세균 세포도 예외가 아니고 고등식물의 세포와 그다지 큰

차이는 없다. 그러나, 핵막으로 분리된 핵이나 미토콘드리아 등은 존재하지 않으며, 핵이 세포질과 같이 존재하며, 핵 구성물질만 있다. 그러므로, 원시핵균(Procaryotes)라고 하며, 세균과 남조류 등이 이에 속한다.

○호기성 처리시 나타나는 세균 *Pseudomonas, Acinetobacter, Achromobacter, Zoogloea, Bacillus, Aerobacter, Flavobacterium, Alcaligenes, Lophomonas, Norcardia, Micrococcus, etc*

○슬러지 팽화현상시 나타나는 세균

*Sphaerotilus natans, Beggiatoa alba, Thiobrix, Norcardia,*

○염기성 처리시 나타나는 세균 -유기물질 분해

*Desulfovibrio, Clostridium, Bacteroides, Corynebacterium, Actinomycetes, Lactobacillus, Bifidobacterium, Bacillus,*

-메탄가스 생성

*Methanobacterium, Methanosarcina, Methanococcus, Methanospirillum,*

2) 균류(Fungi)

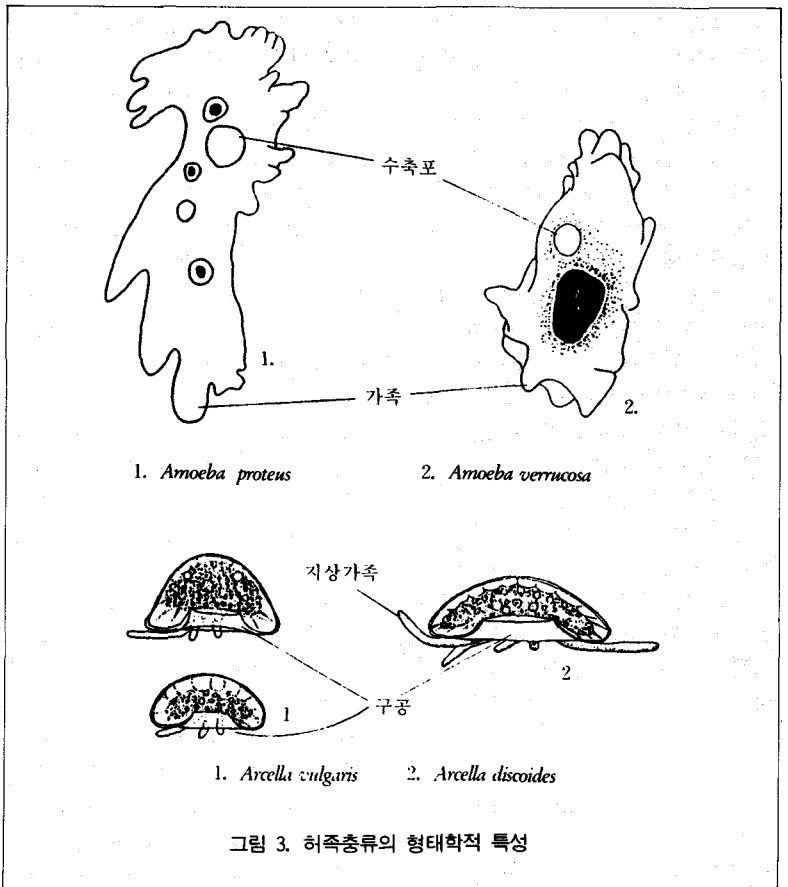
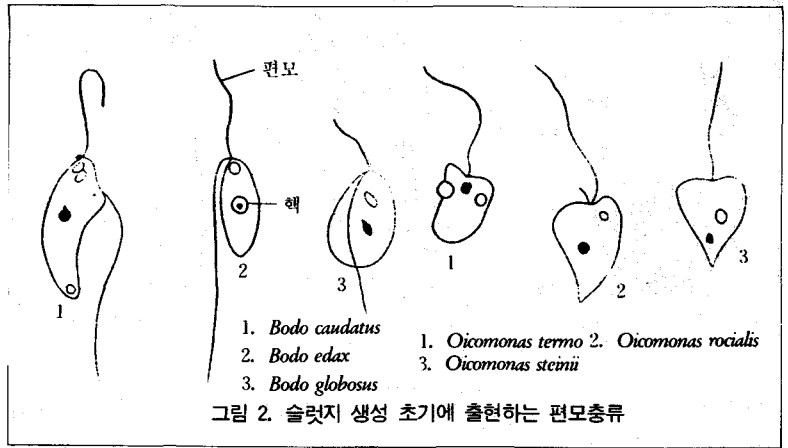
균류는 Fungi라고도 부르며, 사상의 균사(Hyphae)를 번성하게 분기시켜 집합체(균사체, Mycelium)를 이룬다. 사상체의 폭은 세균보다 비교적 크고 5-20 $\mu$ m의 것이 많다. 통상의 생물학적 폐하수처리에는 균류가 먼저 나타나지 않으며, 세균의 증식을 저해하는 환경에는 세균에 영향을 주어 대신균류의 증식이 이루어진다. 따라서 공장폐수 또는 공장폐수가 다량으로 들어있는 도시하수의 생물학적 처리 시에는 균류의 증식이 이루어지는 경우가 많다. 사상균이 현저하게 증식하면 활성 슬러지의 침강성이 나빠져서 슬러지 팽화현상이 일어난다.

3) 조류(Algae)

조류는 광합성작용을 하므로 햇빛을 받는 부분에서 성장하게 된다. 조류는 산화지(Oxidation Pond)에서는 산소를 공급하고, 일부 유기물질을 분해하므로 매우 중요한 역할을 담당한다. 그러나, 활성 슬러지법에서는 거의 발생하지 않으며, 살수여송, 회전원판법과 같은 생물막법(Biofilm Process)에서는 슬러지의 체류시간이 길기 때문에 햇빛을 받으면 조류가 출현한다. 조류는 영양염류를 섭취하고, 산소를 공급하지만 오염물질을 처리하는 측면에서는 별 효과가 없는 것으로 알려져 있다. 생물막법에 출현하는 조류는 여재나 원판에 붙어서 성장하는데 특히 회전원판법에서는 햇빛을 받게 되면 많은 양의 착생 조류가 성장하여 원판이나 회전축에 과부하를 주어 처리장 운전 전에 피해를 준다.

4) 원생동물(Protozoa)

원생동물은 세균과 함께 폐하수 및 폐수 처리에 중요한 역할을 담당하는 미생물로서, 그 역할을 요약하면 다음과 같다.



첫째, 세균의 Floc 형성을 추진하여 침전성을 높여 주어 처리수의 부유물질의 농도를 감소시킨다.  
 둘째, 원생동물은 세균을 잡아먹어 슬러지 양을 감소시키고, 분산된 세균을 제거한다.  
 세째, 원생동물은 주변의 세균을 분비물로 부착시켜 침강성을 높여

침전속도를 높여준다.  
 네째, 원생동물은 포식작용에 의하여 세균의 수를 감소시키므로 새로운 세균이 증식하도록 영역을 넓혀주고 세균의 활성을 증진시킨다.  
 다섯째, 원생동물은 스스로 오염물질을 흡수하여 처리한다.  
 여섯째, 원생동물은 운동성을 가

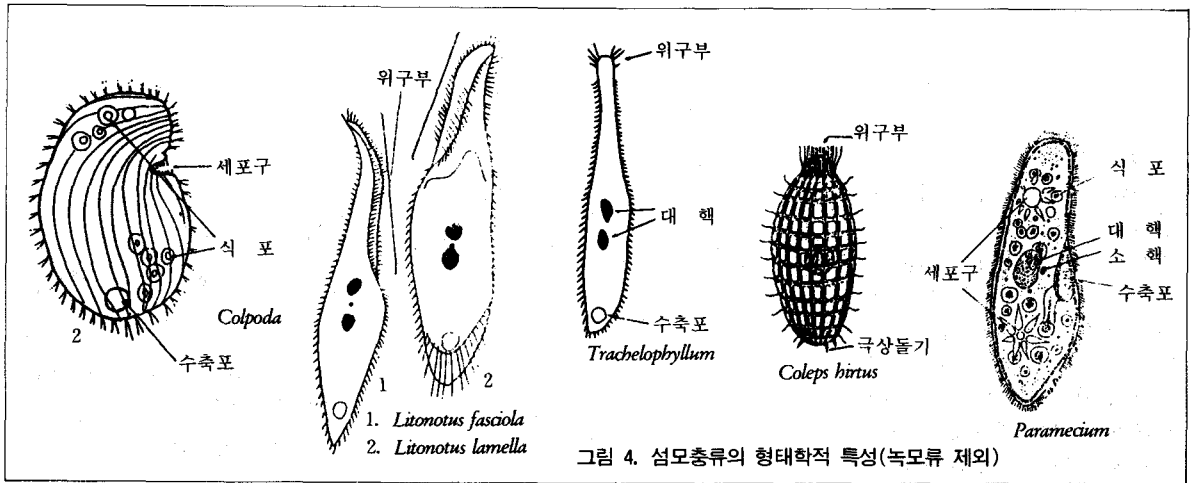


그림 4. 섬모충류의 형태학적 특성(녹모류 제외)

지고 있으므로 Floc의 사이로 오염 물질이 쉽게 이동하도록 하여 처리되도록 한다.

일곱째, 원생동물은 세균보다 커서 현미경으로 쉽게 분류할 수 있으며, 처리 상태에 따라 나타나는 우점종이 각기 다르므로 처리장의 운전관리에 주요 지표가 된다.

원생동물은 편모충류, 육질충류, 섬모충류로 나누며, 폐수나 폐하수의 생물학적 처리 시 주로 나타나는 원생동물은 섬모충류이다. 섬모충류는 다시 녹모류, 하모류, 흡관충류 등으로 구분한다.

○편모충류(Mastigophora)

편모충류는 슬러지 생성 초기나 폭기조에 용존산소가 부족할 때 출현하는데, *Oikomonas*, *Monas*, *Bodo*, *Pleouromonas*, 등이 있으며, 현미경 관찰시 편모를 이용하여 매우 빠르게 움직이며, 그 형태는 그림 2에서 보는 바와 같다.

○육질충류(Sarcodina)

육질충류는 폭기조에서 우점종으로 나타나는 경우는 거의 없으며 슬러지 생성 단계 중간이나 해체 단계에서 나타나는데 *Ameoba*, *Ac-hanthameoba*, *Actinophrys*, *Arcella*, *Diffugia* 등이 있으며 허족으로 운동하므로 허족충류라고도 한다.

○섬모충류(Ciliata)

섬모충류는 원생동물 중 가장 진화한 생물로서, 폐수의 생물학적 처리에 중요한 역할을 담당하며,

슬러지의 상태를 진단하는 지표가 되며, 다음의 7가지 목으로 구분한다.

-나구목(Gymnostomatida)

나구목에는 *Coleps*, *Trachelophyllum*, *Amphiletus*, *Litonotus*, *Chilodonna* 속이 있으며, 중간 정도의 슬러지 생성 시기에 출현하기도 하며, 또한 처리효율이 양호하여 방류수의 BOD가 10mg/l 이하일 때에도 출현하지만 우점종으로 나타나지는 않는다.

-모구목(Trichostomatida)

모구목에는 *Colpoda*, *Paramecium* 속이 있으며, *Colpoda*는 암모니아성 질소의 농도가 높은 폐하수처리에 자주 출현하며, *Paramecium*은 슬러지 중간정도에서나 또는 슬러지 상태가 나쁠 때에 출현하지만 우점종으로 나타나지는 않는다.

-흡관충목(Suctorida)

흡관충목에는 *Acineta*, *Tokophrya*, *Podophrya* 속이 있으며, 양호한 슬러지 상태에서 출현하지만 우점종으로 나타나는 경우는 드물다.

-막구목(Hymenostomatida)

막구목에는 *Uronema*, *Colpidium*, *Cinetochilum*, *Galucorna*, *Tetrahymena*, *Cydidium*, 속이 있으며, 슬러지 상태가 불량하거나, 초기에 자주 출현한다.

-녹모목(Peritrichida)

녹모목은 유병 고착형의 섬모충류로써, 자루모양의 가지를 치면서 증식하는데 *Vorticella*, *Carchesium*,

*Opericularia*, *Epistylis*, *Pyxidiella*, *Rhabdostyla*, *Opisthostyla*, *Zoothamnium* 속이 있으며, 폐수처리 효율이 높고, 양호한 슬러지 상태일 때 우점종으로 출현한다.

-이모목(Heterotrichida)

이모목에는 *Stentor*, *Spirostomum*, *Metopus* 등의 속이 있으며, 중간 정도의 슬러지 생성 시에 우점종으로 출현한다.

-하모목(Hypotrichida)

하모목에는 *Aspidisca*와 같이 양호한 슬러지에 나타나는 것과 *Oxytricha* 속과 같이 중간 슬러지에 나타나는 종류가 있으며, 또한 슬러지 일령이 많을 때에도 출현하며, 생물막법에서는 더욱 자주 출현한다.

5) 후생동물(Metazoa)

후생동물에는 수충류(Rotifer), 선충류, 등은 활성 슬러지의 일령이 많을 때에 출현하며, 생물막법에서는 수충류, 선충류 이외에도 곤충류, 복족류 등이 출현하며, 활성 슬러지 보다 훨씬 많이 출현한다.

3. 폐하수의 생물학적 처리와 슬러지 생성

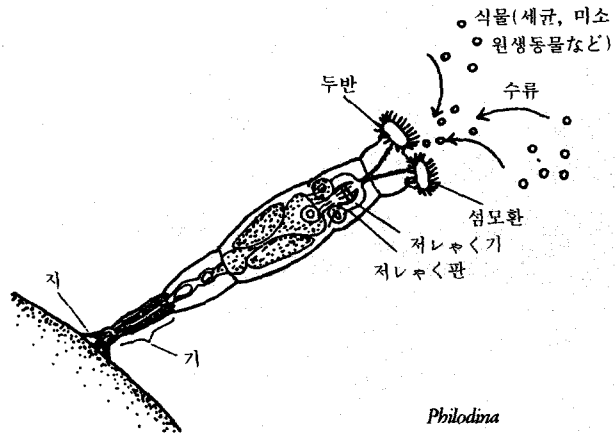
그림 6은 유기성 폐수를 생물학적 처리시 증식되는 슬러지 미생물의 성장곡선(Growth Curve)를 요약하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 폐수 중의 유기물

질을 분해하며 성장하는 세균이 증식하게 된다. 이와 같은 세균의 대수증식기(1-2일)에서는 세균의 개체가 분산되어 있고 Floc을 형성하지 않고 있으므로 운동성이 강한 편모충류(*Bodo*, *Oikomonas*, *Monas*)와 육질충류가 증식(3-4일)하게 된다. 이때를 슬러지 생성 초기라 한다.

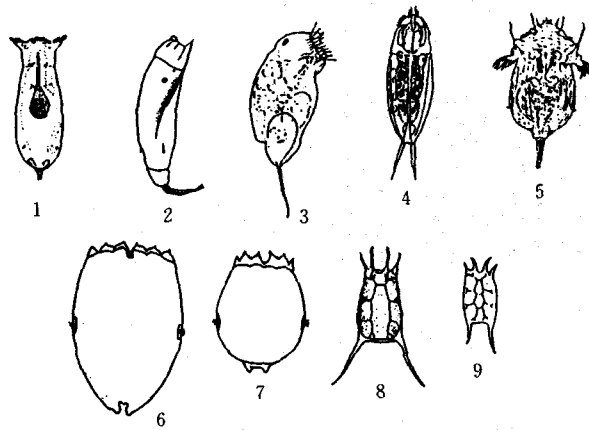
그후 세균의 증식 속도는 감소되고 증식이 정지됨에 따라 작은 세균의 Floc이 생기고, 단독으로 움직이는 섬모충류(*Colpodium*, *Paramecium*, *Litonotus*)가 증식하게 되어 슬러지 생성 중기(5-8일)에 이르게 된다.

그후 세균은 사멸기에 들어오면서 좀더 단단하고 커다란 Floc이 생기게 되고 이 Floc에 붙어서 증식하는 유병고착성 섬모충류인 *Vorticella*, *Carachesium*, *Opercularia*, *Epistylis* 등이 증식하여 슬러지 생성이 끝나게 된다. 이때에 맞추어 슬러지 일령을 조절하여야 하며, 슬러지 체류시간이 길게 되면 후생동물인 Rotifer, Nematoda 등이 자라게 된다. 그러므로 슬러지 체류시간이 훨씬 길은 생물막에서는 후생동물을 쉽게 발견할 수 있다.

(다음호에 계속)



*Philodina*



1. *Notommata saccigera* 330~350  $\mu$ m
2. *Trichocerca tigris* 180~230  $\mu$ m
3. *Trichocerca stylata* 140~180  $\mu$ m
4. *Cephalodella ventripes* 130~140  $\mu$ m
5. *Synchaeta longipes* 160~200  $\mu$ m
- 6, 7. *Brachionus plicatilis* 130~320  $\mu$ m
- 8, 9. *Keratella quadrata* 70~100  $\mu$ m

그림 6. 슬러지 후기에 출현하는 수충류의 형태학적 특성

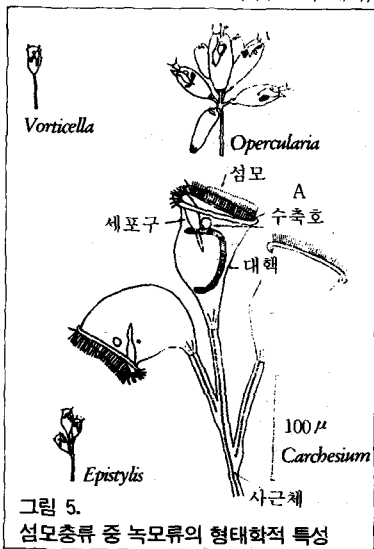


그림 5. 섬모충류 중 녹모류의 형태학적 특성

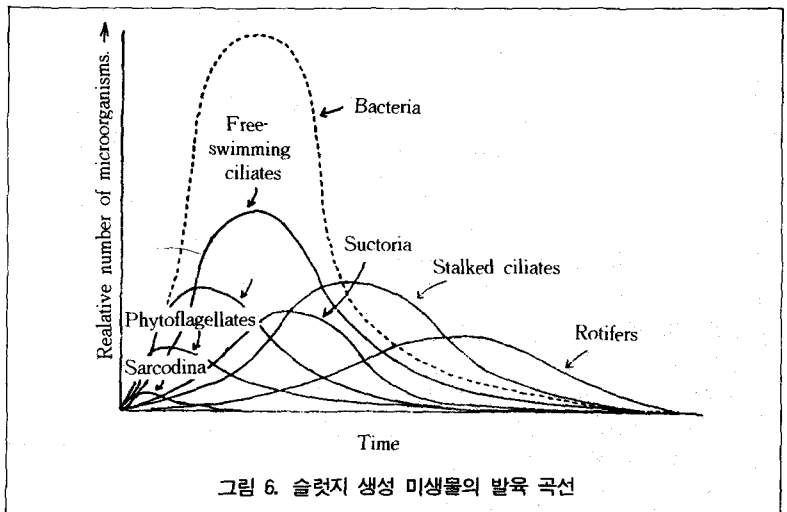


그림 6. 슬러지 생성 미생물의 발육 곡선