

# 생물학적 폐·하수처리



**이 문 호** 이호환경컨설팅 대표이사 ☎ 031-407-8001  
leehojamun@hanmail.net

<필자약력>

- 한국과학기술원 생물공학과 이학석사
- 국립환경과학원 12년 근무
- 1995년~현재 이호환경컨설팅 대표

연재

## 하수, 폐수, 활성슬러지 시험법

### 5. 활성슬러지에 원생동물이 잘 증식되지 않는다?

활성슬러지에 (세균---)원생동물--->후생동물)과 같은 먹이연쇄가 형성되어 있다는 것을 모두가 알고 있다. 또한 이 먹이연쇄가 잘 형성되어야만 폐수처리효율도 높고 처리수의 수질도 양호해진다는 것도 모두 알고 있다. 그러나 이 먹이연쇄가 저절로 항상 형성되는 건 아니다.

폐수처리장에 따라서는 이 먹이연쇄가 깨어져 원생동물이 전혀 증식되지 않는다는지 아니면 어떤 특정 원생동물종만 아주 적은 수로 증식되어 처리수를 맑게 해주지 못하기도 한다.

도대체 왜 원생동물이 잘 자라지 못하는걸까?

#### 5-1. 폐수처리에서 원생동물의 역할

활성슬러지에서 생물량(biomass)으로 봤을 때 원생동물이 차지하는 양은 대체로 5%내외다. 차지하는 양이 적다고 그 중요성마저 작다고 보서는 안된다. 사실 생물학적폐수처리에서 원생동물이 없다면 폐수처리는 불가능하다. 어쩌면 폐수처리장 관리란 '원생동물이 잘 증식하도록 하는 일'이라

볼 수도 있다.

-원생동물이 증식되면 플러이 형성된다

이것이야말로 원생동물의 가장 중요한 역할이다. 원폐수내에 부유세균이 아주 높은 농도로 이미 증식되어 있는 폐수라도 폭기조에 원생동물이 증식되면 물이 맑아지고 플러이 형성되어 가라앉는다. 만약 원생동물이 증식되지 않아 플러이 형성되지 않는다면 침전조에서 가라앉을 슬러지가 별로 없을 것이다. 그러면 침전조에서 폭기조로 슬러지반송을 해봤자 넘어갈 슬러지가 별로 없다. 따라서 폭기조에 MLSS를 유지시켜줄 수 없다. 그리하여 폭기조 MLSS가 500mg/L이하로 떨어지는 곳도 보았다. 그러면서 침전조상등액에는 부유세균이 많아 매우 혼탁해진다. 그러니 원수를 통해 들어온 BOD를 이용해 폭기조에서 세균을 키우고 그 모두가 침전조에서 가라앉는 것 없이 방류수로 내보내는 결과가 된다. 결국 원생동물 없이는 폐수처리의 의미가 없는 것이다.

-원생동물이 분산세균을 포식제거해주므로 맑은 처리수를 얻을 수 있다.뿐만아니라 폐수내에 포함되어 있는 대장균이나 병원균이 폐수처리과정에서 제거되는 것도 원생동물에 의한 포식작용의 역할이 크다.

-원생동물의 존재가 용존유기물(BOD)의 제거효율

증대에도 기여한다. 원생동물이 폭기조혼합액내의 세균을 포식제거하므로써 세균수가 감소하게 되면 다시 다른 세균이 증식할 수 있는 공간이 주어진다. 그러나 이미 이때의 환경은 유기물의 농도변화 등 초기의 환경과 달라지게 된다. 따라서 이미 변화된 환경에 가장 적응된 세균이 다시 증식하게 되므로 처리효율이 증대하게 된다.

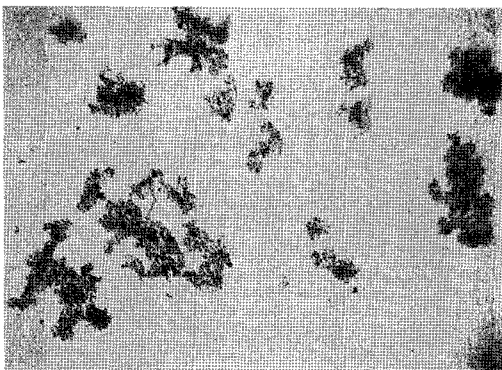
-원생동물은 운동성이 높아 활성슬러지 플러내부에 산소나 영양분을 공급해주는 역할을 해준다. 그리하여 폐수처리효율을 증대시켜준다.

## 5-2. 원생동물이 잘 증식되지 않는 이유는?

### 5-2-1. 먹이가 없다

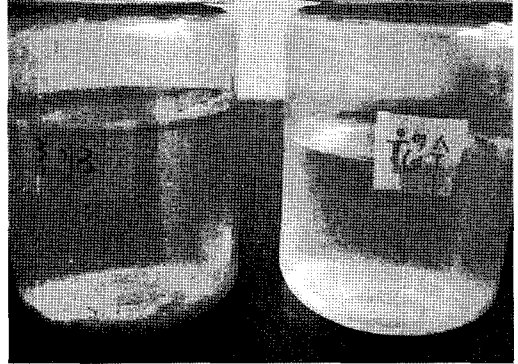
용존유기물(BOD)을 먹이로 하는 원생동물(편모충류)도 있지만 활성슬러지 원생동물의 대부분은 세균이나 소형 원생동물을 먹이로 살아가고 있다. 이 세상 어느 생물이나 마찬가지로 먹이가 없으면 살 수가 없다. 활성슬러지의 원생동물도 먹이인 세균이 너무 적으면(매우 드물지만) 살 수 없다.

[사진-1]에서 플러를 볼 수 있지만 플러 주위에 부유되어 있는 세균을 전혀 볼 수 없다. 이 처리장의 폐수에는 유기물(BOD)은 거의 없고 무기질소가 고농도로 함유되어 있다. 따라서 탈질을 위해 첨가해주는 메탄올이 유기물의 전부라고 볼 수 있다. 그러나 이 유기물도 탈질에 필요한 양만큼만 메탄올을 넣어주기 때문에 반응조내에서 활성슬러지의 증식은 거의 없고 오히려 MLSS가 점점 감소하게 된다.



[사진-1] 원생동물이 전혀 없는 슬러지 (부유세균이 없다)

최근에 이와 유사한 폐수의 대표적인 것이 바로 매립지침출수이다.



[사진-2] 매립지침출수와 폭기조시료 (폭기조에 슬러지가 매우 적다)

매립지침출수내의 BOD가 너무 낮아 폭기조에서의 미생물증식이 너무 적다. 그리하여 슬러지는 자기산화에 의해 점점 사멸하고 유실되어 식중할 때 넣어준 슬러지는 점점 감소하여 몇 개월이 지나면 MLSS가 500mg/L이하로 감소하게 된다. 그런데 원수중에 NH<sub>3</sub>-N이 고농도로 함유되어 있어서 질산화가 꼭 필요한 폐수이다. 먹이가 되는 세균이 죽어가는 판국에 원생동물 또한 증식할 수 있겠는가.

### 5-2-2. 입에 맞는 먹이가 없다

원생동물은 종에 따라 자기가 좋아하는 먹이와 그렇지 않은 먹이가 구별된다. 어떤 먹이는 전혀 먹을 수 없는 것도 있다.

[표-1] 섬모충류 Vorticella microstoma의 食性

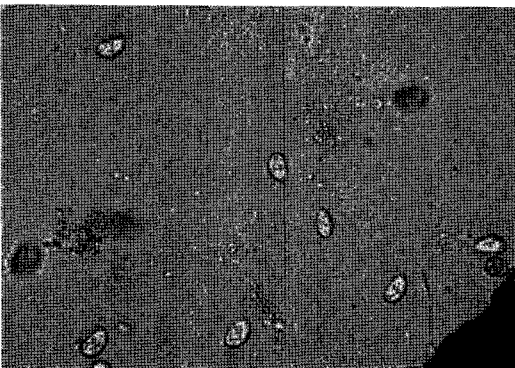
못 먹는 먹이	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pseudomonas ovalis</li> <li>• Flavobacterium aquatile</li> <li>• Achromobacter cycloclastes</li> <li>• Micrococcus luteus</li> <li>• Proteus vulgaris</li> </ul>
먹을 수 있는 먹이	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flavobacterium suaveolens</li> <li>• Aerobacter aerogenes</li> <li>• Escherichia coli</li> <li>• Azotobacter chroococcum</li> <li>• Vibrio cuneatus</li> <li>• Pseudomonas putrificiens</li> </ul>

<p>좋아하는 먹이</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alcaligenes faecalis</li> <li>• Bacillus subtilis</li> <li>• Bacillus cereus</li> <li>• Alcaligenes viscolactis</li> <li>• Pseudomonas fluorescens</li> <li>• Achromobacter liquidum</li> <li>• Micrococcus varians</li> <li>• Flavobacterium arborescens</li> </ul>
--------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

인용문헌 : 環境微生物圖鑑, 小島貞男, 須藤隆一, 千原光雄編, 講談社サイエンティフィック, 1995년

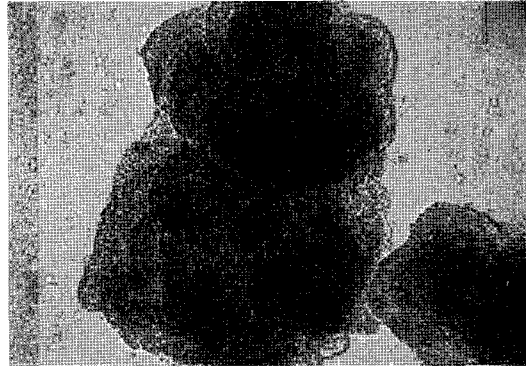
[표-1]에서 보면 같은 屬의 세균이라도 좋아하는 먹이로 되는 것도 있고 못 먹는 것도 있다. 이러한 차이는 먹이의 모양과 크기, 세포벽의 구성, 세포색소 등이 관계된다. 활성슬러지에서 가장 중요한 의미를 가지는 것은 원생동물이 먹지 못하는 효모, 곰팡이, 사상체, 방선균이 번창하여 방류수 혼탁, 점성, 별킹, 거품, 스컴과 같은 이상현상이 종종 일어난다는 것이다.

이처럼 원생동물이 전혀 먹을 수 없는 미생물이 번창하는 것이야 막을 수 없다. 그러나 세균이라도 특정세균만 우점으로 폭기조에 증식되면 증식가능한 원생동물이 극히 제한된다는 것이다. 그리하여 폭기조에 증식되는 원생동물종이 1~2종이고 이것마저 수가 너무 적어 슬러지 플럭의 형성이 잘 이루어지지 않는다.



[사진-3] 유영섬모충류 1~2종만 증식한 슬러지

[사진-3]는 유영형섬모충류 1~2종이 겨우 증식되는 활성슬러지로서 플럭의 형성도 잘 되지 않을 뿐만아니라 부유세균의 제거도 완전하지 않아 [사진-3]에서도 많은 부유세균을 볼 수 있다.



[사진-4] 특정세균의 증식(핀플럭)

폐수의 기질이 너무 단순하면 생성되는 슬러지가 단단해지지 않는다. 크기는 비록 큰 플럭이 생길 수 있지만 단단한 슬러지는 형성되지 않는다. 이것을 핀플럭이라고 한다. 즉 플럭 내부에 실처럼 생긴 사상체(絲狀體)가 전혀 증식되지 않고(시멘트에 철근이 들어가고 흙벽돌에 깊이 들어가야 단단하듯이) 특정의 세균만으로 플럭이 생성되어 플럭이 매우 약하고 플럭을 구성한 세균이 플럭에서 빠져나와 부유되기 쉽다. [사진-4]의 플럭이 이런 특성을 가지고 있어 증식되는 원생동물 또한 1~2종에 국한되고 만다.

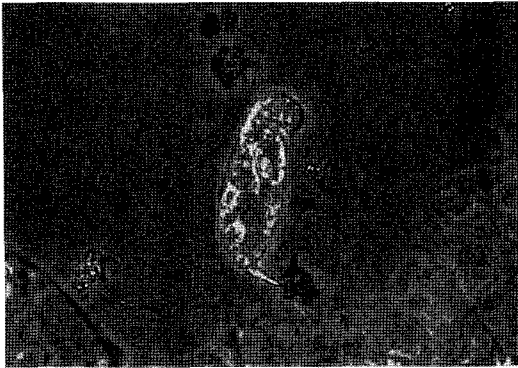
그러므로 활성슬러지에 다양한 세균종이 증식되어야 원생동물도 다양하게 증식되고 단단하고 큰 플럭이 형성되며 처리수도 맑게 된다. 그런데 다양한 세균이 증식하려면 원수의 기질 또한 다양해야 한다. 그래서 생물의 배설물인 하수, 축산폐수 등이 처리장 미생물에게 좋은 식사로 되어 폐수보다 더 다양한 미생물종이 나타나고 슬러지 형성도 잘 일어난다.

### 5-2-3. 먹이가 너무 많다

활성슬러지에서 먹이농도의 많고 적음에 따라 우점되는 원생동물의 종이 달라진다. 원생동물이 먹이를 섭취하는 방법에는 아메바처럼 먹이를 몸으로 둘러싸서 녹여먹는 방법, 흡관충류처럼 흡관을 먹이세포에 꽂아 빨아먹는 방법, 먹이를 포획(capture)하여 먹는 방법, 여과(filtration)를 통해 먹이를 걸러 먹는 방법 등이 있다.

포획은 사냥의 효율이 낮다. 마치 우리가 낚시로 고기를 잡는 것과 같다. 물고기가 많지 않으면 낚시로 잡기가 힘들게 된다. 그러므로 포획으로 살아가는 원생동물(Colpidium과 같은 소형섬모충류)은 먹이가 많지 않으면 증식하기 어렵다. 반면에 사냥효율이 높은 여과방식으로 먹이를 섭취하는 원생동물(Vorticella와 같은 연모목류)은 먹이가 많지 않아도 살아갈 수 있다. 우리가 낚시대신 그물로 물고기를 잡는 것과 같다.

입 주위의 섬모를 움직여 물살을 일으키고 물과 함께 입으로 들어온 먹이를 섭취하는 원생동물들은 이 섬모의 운동이 매우 중요하다. 만약 이 섬모를 제대로 움직일 수 없다면 당연히 굶어죽을 수밖에 없다. 비록 먹이가 지천이라도 바로 이런 현상이 폭기조MLSS가 너무 높은 처리장에서 실제로 일어난다.



[사진-5] 후생동물의 사체

[사진-5]에 후생동물의 死體를 볼 수 있다. 물론 죽었으니 활성이 없는 것은 당연지사고 죽은 시체에서 영양물질이 빠져나오고 시체가 분해되고 마지막으로 남은 비분해성 잔유물이 아주 작은 고형물로 남게 된다. 그러므로서 처리수가 혼탁해지게 된다. 이보다 더 중요한 사실은 원생동물, 후생동물이 죽었으니 폐수처리효율이 떨어질 것은 뻔한 이치다. 그럼에도 폭기조에 슬러지가 많으니 처리효율이 높을 것이라는 막연한 기대를 하는 분들도 있다.

이처럼 섬모활동을 할 수 없으면 Vorticella는 입

을 닫아버린다. 후생동물 Rotaria도 마찬가지다. 나아가 더 환경이 악화되면 Vorticella나 Rotaria나 시스트(cyst, 휴면세포)를 형성하여 환경이 좋아지기를 기다린다. 그러나 활성슬러지에는 이처럼 시스트로 가지도 못하고 죽는 세포도 많다.

#### 5-2-4. 원생동물 증식저해 환경

먹이외에도(결국은 먹이와도 관련됨) 원생동물의 증식을 저해하는 또는 억제하는 환경조건은 여러 가지 있을 수 있다.

##### 1) 염분

폐수내 염분농도가 너무 높거나(Cl<sup>-</sup>:6,000mg/l 이상), 용존고형물이 너무 높을 때(TDS:10,000mg/l 이상) 원생동물의 증식이 억제된다. 물론 이런 오염물질이 직접적으로 영향을 줄 수 있지만 염분농도가 높으면 폭기조의 DO가 낮아 절대호기성인 원생동물에 영향을 줄 수 있다.

수산물가공폐수, 농수산물시장폐수, 침출수 등이 이런 폐수인데 이런 폐수에서는 대체로 1~2종의 유영형섬모충류가 겨우 몇 마리(폭기조시료 1방울에) 증식할 정도이다.

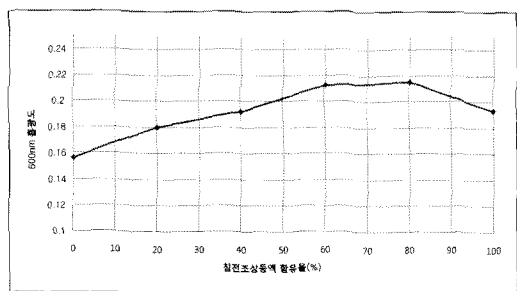
##### 2) 고온

원생동물은 38℃이상에선 증식이 억제된다고 한다. 폐수의 수온이 한여름에 35℃를 넘는 경우도 있다. 이럴 경우 원생동물의 증식이 원만하게 이루어지지 않아 처리수가 혼탁해지기 쉽다. 원생동물의 증식이 억제될 정도로 수온이 높지 않다 하더라도 수온이 높아지면 특정 고온균이 우점되어 증식가능한 원생동물의 종이 제한된다. 그리하여 처리수가 부유세균으로 혼탁되는 경우도 있다.

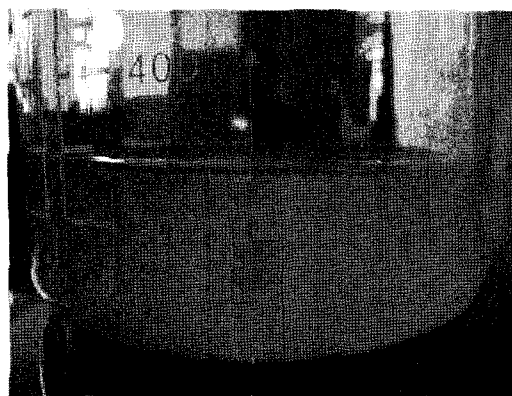
##### 3) 독성물질

원생동물은 세균보다 독성에 더 약하다. 그래서 폭기조에 세균은 증식이 가능하지만 원생동물은 증식이 저해되는 경우도 있다.

수탁폐수처리장(위탁폐수를 수거하여 처리)의 침전조상등액(0.2 $\mu$ m여과지로 여과하여 부유세균을 제거함)을 인산완충액으로 희석하고 여기에 유기 배지를 소량 첨가한다음 실온(28~30 $^{\circ}$ C)에 정치시켜 배양했다. 1일간 배양후 600nm에서 흡광도를 측정하여 세균증식량을 보았다. [그래프-1]에서 보면 침전조상등액의 함유율이 높을수록 세균증식량(흡광도)이 증가하였다. 그러므로 침전조상등액(즉 폭기조액)은 세균의 증식을 저해하지 않는 것으로 보인다.

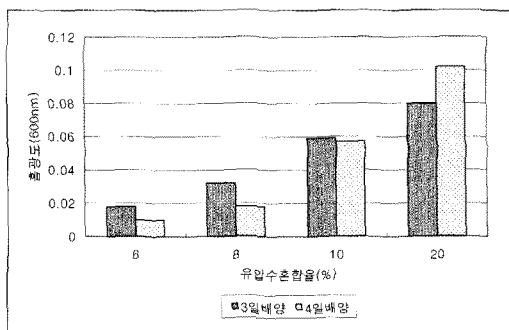


[그래프-1] 침전조상등액 함유율과 세균증식과의 관계



[사진-6] 수탁폐수처리장 폭기조상등액만 폭기 (원생동물이 증식되지 않아 더 혼탁해짐)

이 처리장의 폭기조혼합액을 1시간 정치시킨후 상등액만 취하여 다시 폭기를 계속하였더니 [사진-6]에서 보듯이 원생동물은 전혀 증식되지 않으면서 세균증식이 더 일어나 상등액이 점점 더 혼탁해지는 것을 볼 수 있었다.



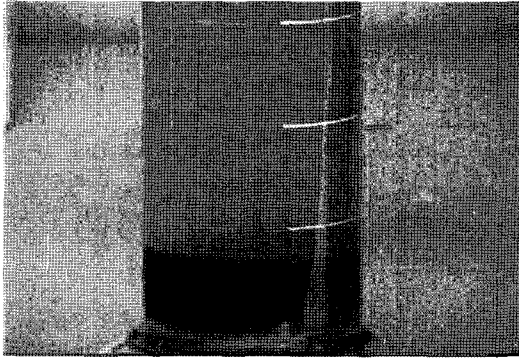
[그래프-2] 유입수혼합율에 따른 원생동물증식

수탁폐수처리장의 폭기조유입수를 인산완충액으로 희석하고 여기에 원생동물을 식종하여 정치 배양하면서 하루에 몇 번씩 흔들어주었다. 배양액을 검경했을 때 배양 3일후부터 원생동물이 나타나기 시작했다. 그래서 배양3일과 배양4일의 흡광도를 그려보면 [그래프-2]와 같다. 3일배양보다 4일배양에서 흡광도가 낮으면 원생동물이 증식하여 세균농도가 낮아진(혼탁도가 낮아진) 시험관이다. [그래프-2]에서 유입수혼합율이 10%를 넘으면 원생동물 증식이 저해되는 것으로 나타났다. 이 사실은 배양액의 검경을 통해서도 확인되었다.

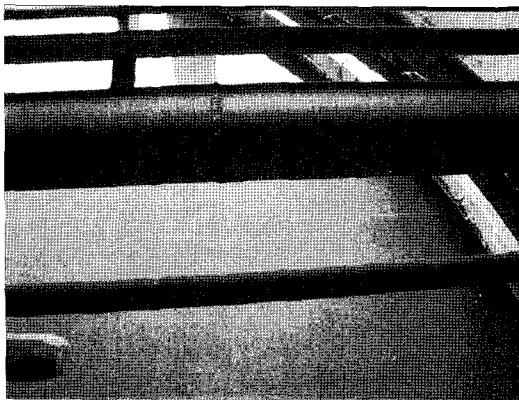
활성슬러지공법에서 가장 취약한 면이 바로 별킹이 자주 일어날 수 있다는 것이다. 별킹은 사상체가 많이 증식되어 슬러지침강이 잘 되지 않는 트러블이다. 그래서 사상체를 죽이기 위해 폭기조 또는 반송슬러지에 Cl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>와 같은 살균제를 투입하는 방법을 사용하기도 한다. 그러면 슬러지플럭 외부로 길게 뻗어나와 있는 사상체는 이 살균제에 쉽게 노출되므로 죽고 플럭을 형성하는 비사상체의 세균은 플럭 내부에 있으므로 살균제가 침투되지 않아 살아남는다는 이론이다. 플럭내부에서 살아가는 원생동물은 없고 플럭 외부를 자유로이 헤엄쳐 다니거나 플럭표면에 기어다니거나 붙어 살아가므로 이 이론으로 본다면 원생동물은 사상체만큼이나 살균제에 노출되어 있다. 그런데 원생동물은 사상체보다도 살균제에 훨씬 더 약하다. 더구나 사상체중에는 세포가 초(sheath)로 둘러

싸여 있는 종이 많으므로 살균제에 대해 일반 부유세균보다도 더 저항성이 높다고 볼 수 있다.

그래서 별킹의 억제를 위해 살균제를 살포할 때는 저농도로 자주 살포하는 것이 주의점이다. 만약 한꺼번에 많은 양의 살균제를 투입한다면 사상체는 물론이고 원생동물까지 모두 죽이게 될 것이다.



[사진-7] 폭기조에 염소 과다투입으로 상등액 혼탁 (SV<sub>30</sub>이 99%에서 7%로 떨어졌다)



[사진-8] 폭기조 염소 과다투입으로 혼탁해진 침전조

[사진-7]에서 보면 별킹이던 슬러지(SV<sub>30</sub>이 99%)가 염소 과다투입으로 슬러지가 해체되면서 SV<sub>30</sub>은 7%로 낮아지고 대신 해체된 슬러지가 흩어져 상등액이 매우 혼탁해졌다. 메스실린더에서는 이 정도이지만 실제 침전조에서는 트러블이 더 심각해진다.

[사진-8]에서 보듯이 해체된 슬러지로 인하여 침전

조가 아주 혼탁해졌다. 침전조 상등액이 SS로 혼탁해진 것 이상으로 문제되는 것은 염소살균제를 과다하게 투입하여 폭기조내 모든 미생물이 죽어 버린 사실이다. 그래서 폭기조내 MLSS는 단지 미생물시체에 불과하고 살아있는 미생물은 거의 없다. 그러므로 F/M비를 계산하면 실제로는(살아있는 미생물이 없으므로 M는 거의 0) 무한대로 커지게 된다. 그래서 F/M비와 가장 절대적인 상관관계가 있는 DO가 0로 된다. 그래서 폭기조에서 뿐 아니라 침전조에서 부패가 일어난다. F/M비가 너무 높으면 폭기조에서는 심한 거품이 일어나고, 이어 부패까지 일어나면 심한 부패취가 발생된다. 침전조에서 부패가 일어나면 검은색의 슬러지덩어리가 부상하고 부패가스가 침전조 수면에 보글보글 올라온다.

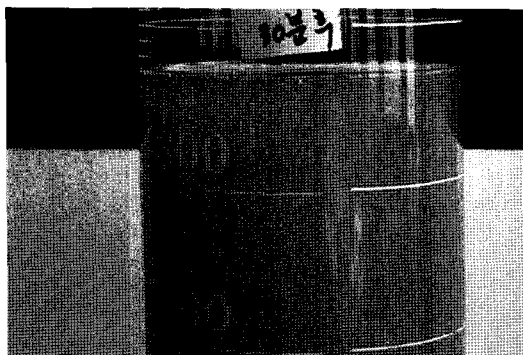
#### 4) DO가 없다

호흡에 산소를 이용하는 생물에겐 산소가 없는 환경이 가장 치명적이다. 가장 짧은 시간에 가장 많은 생물이 죽을 수 있는 것이 바로 이 산소가 없는 환경이다. 산소를 이용하는 미생물을 폐수처리에 이용하는 반응조가 바로 폭기조다. 그러나 산소농도(용존산소, DO, dissolved oxygen)는 매우 중요한 환경인자다.

만약 한여름이라면 폭기조 수온이 높을 것이다. 따라서 미생물의 활성도 높아 폭기조에 유입되는 BOD가 빨리 분해되고 산화될 것이다. 그러면 자연히 폭기조내 DO가 소비되어 사라지는 속도도 빨라질 것이다. 반면에 수온이 높으면 공기속(폭기를 통해 공급되는 공기) 산소가 물속에 녹아들 어갈 수 있는 포화농도는 낮아진다.

이 두가지를 합하면 한마디로 여름철에 폭기조의 DO가 크게 낮아질 기회는 더 많다. 여기에 더하여 부하변동이 심하여 폭기조의 MLSS를 높게 유지하면서 운전되고, 유입되는 BOD부하도 높아서 F/M비가 높다. 이럴 경우 어느날 갑자기 폭기조 DO가 0인 상태가 어느정도 지속되면서 폭기조의 모든 미생물이 특히 원생동물이 모두 한순간에 사

멸하게 된다. 이것이 바로 슬러지해체다. 이 슬러지해체는 한순간에 일어나며 처리수의 수질을 아주 엉망으로 만들어놓고 회복되는 데 적어도 1개월이상 필요로하는 이상현상으로서 활성슬러지에서 최대의 사고다.[사진-9]

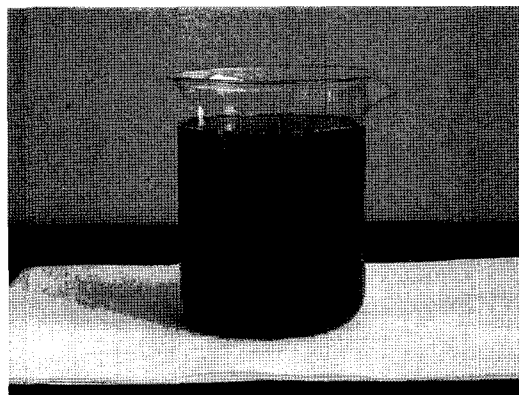


[사진-9] 슬러지해체가 일어난 폭기조혼합액

이 슬러지해체에서 가장 회복이 더딘 것이 바로 원생동물의 안정화이다. 우리가 폐수처리장 시운전에서 경험하듯이 처음부터 우리가 원하는 원생동물부터 증식시킬 수 없다. (편모충류--->소형섬모충류--->고착형섬모충류--->후생동물)의 과정을 거치는게 원생동물이다. 그러므로 원생동물이 적당한 조성을 이루기까지는 시간이 필요한 것이다. 따라서 슬러지해체는 완전한 회복에 시간이 많이 걸리게 된다.

이처럼 원생동물의 증식에 DO가 꼭 필요하므로 폭기조내라 하더라도 산소가 공급되지 않는다면 슬러지가 어디에 쌓여 부패가 일어나면 그곳에선 원생동물이 정상적으로 증식할 수 없다.

DO가 없어서 원생동물이 증식되지 않는 곳이 또 있는데 폭기조에 접촉재가 들어있을 때 바로 접촉재 속이다. 처음 접촉재를 폭기조에 넣을 때는 접촉재 내부에 공극이 넓어 산소가 충분히 들어갈 것으로 보이지만 접촉재에 부착미생물이 붙기 시작하여 부착슬러지가 두꺼워지면 산소가 들어가기 어렵게 된다. 이 현상이 점점 더 심해져서 결국엔 접촉재내부는 거의 혐기성에 가까울정도로 변해간다.



[사진-10] 폭기조접촉재에서 긁어낸 슬러지

[사진-10]은 고도처리장 폭기조에 들어있는 접촉재에서 긁어낸 부착슬러지이다. 슬러지가 완전히 검은색이고 부패취가 나는 것으로 봐서 산소의 공급이 부족했다는 것을 알 수 있다. 원생동물로는 DO가 매우 낮은 환경에서 나타나는 종(Caenomorpha)이 유일하였다. 물론 원생동물수도 많지 않았다. 따라서 원생동물의 증식에 산소가 매우 중요하다라는 사실을 알 수 있다. 폭기조에 접촉재를 넣으면 접촉재에 부착하여 미생물이 증식하므로 다양한 미생물종이 나타나고 먹이연쇄도 길어진다라는 말은 산소가 공급되는 접촉재 표면(접촉재 전체로 보면 극히 일부)에서만 가능한 사실이다.

### 5-3. 결론

별킹슬러지에 다양한 원생동물이 출현되듯이 활성슬러지에 원생동물이 다양하게 증식되어도 폐수처리에 트러블은 일어날 수 있다. 그러나 원생동물이 증식되지 않는 활성슬러지로 폐수처리가 정상적으로 운전되기를 기대할 수는 없다.

활성슬러지에서 원생동물이 증식되지 않는 요인은 위에 열거한 것외에도 있을 수 있다. 정확한 진단없이 병을 고치는 처방이 나올 수 없듯이 우리는 원생동물이 증식되지 않는 요인을 올바르게 진단해야만 한다.

다음호에 계속...