

미생물 실험을 이용한 생물학적 폐·하수처리



연재

이 문 호 | 이호환경건설탕 대표이사

한국과학기술원 생물공학과 이학석사, 국립환경과학원 12년 근무
('95~현재) 이호환경건설탕 대표
tel.031-407-8001 | leehojamun@hanmail.net

12. SRT관리와 난분해성COD 제거

$$S_o = \frac{Q_i S_i + Q_R S_e}{Q_i + Q_R}$$

12-1. SRT란?

슬러지체류시간 또는 슬러지일령

SRT(Sludge Residence Time, Sludge Retention Time)

MCRT(Mean Cell Residence Time)

SA(Sludge Age)

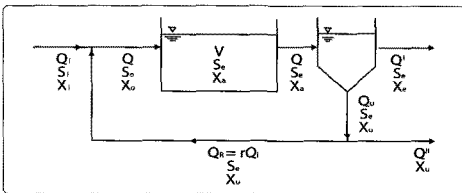
슬러지일령(Sludge Age)과 슬러지체류시간(Sludge Retention Time)을 구별하는 사람도 있지만 필자는 양쪽 용어가 비슷하다고 생각되어 혼돈을 막기 위해 같은 용어로 보고 설명하고자 한다. 그리고 현장에서 가장 많이 사용되고 있는 SRT를 필자도 주로 사용하기로 한다.

SRT는 폐수처리시스템내에 있는 모든 슬러지량을 폐수처리시스템에서 실제로 빠져나가는 슬러지량으로 나눈 값을 나타낸다.

$$SRT(\text{day}) = \frac{\text{폐수처리시스템내 총슬러지량}}{\text{시스템으로부터 빠져나가는 순슬러지량}}$$

$$= \frac{\text{폐수처리시스템내 총슬러지량}}{\text{슬러지 총유출량} - \text{유입폐수로부터 유입되는 슬러지량}}$$

$$= \frac{V X_a + (V_s + V_R) X_u}{(Q'' X_u + Q' X_e) - Q_i X_i}$$



< 그림-1 > 표준활성슬러지 공정

V : 폭기조의 용량(m³)

X_a : 폭기조의 MLSS농도(mg/l)

V_s : 최종침전조에서 침강슬러지가 차지하는 부피(m³)

V_R : 슬러지반송관의 총용적(m³)

X_u : 반송슬러지의 SS농도(mg/l)

Q'' : 슬러지 폐기량(m³/d)

Q' : 방류수 유량(m³/d)

X_e : 방류수의 SS농도(mg/l)

Q_i : 유입폐수의 유량(m³/d)

X_i : 유입폐수의 SS농도(mg/l)

Q_R : 슬러지 반송량(m³/d)

Q_R/Q_i = r(반송비율, 반송율, recycle ratio)

$$Q_R = r Q_i$$

$$Q = Q_i + Q_R = Q_i (1 + r)$$

$$Q_i = Q' + Q''$$

$$Q_u = Q'' + Q_R$$

여기에서 침전조에 침강되어 있는 슬러지의 양,

반송파이프라인에 있는 슬러지량은 그 양을 파악하기가 쉬운 일이 아니고 또 현실성도 없으며, 대체로 총슬러지량에 비해 이 부분이 차지하는 슬러지량이 비교적 적은 양이므로 폭기조내에 들어 있는 슬러지량만을 계산에 포함시키는 경우가 대부분이다. 그리고 폐수처리가 정상적이라면 방류수의 슬러지농도는 거의 무시해도 될 정도의 농도이고, 또한 유입폐수내의 활성슬러지농도 또한 거의 무시될 정도이므로 이 3가지 항을 계산에서 제외시킨다. 그러면 위 식에서 $(V_s + V_R)X_u$, $Q^i X_e$, $Q^i X_i$ 항은 삭제되고 다음과 같이 된다.

$$SRT = \frac{VX_a}{Q^i X_u} = \frac{VX_a}{\Delta X}$$

폭기조내 MLSS중 미생물이 차지하는 비율이 항상 일정하다고 가정하면(MLVSS/MLSS비가 일정) SRT를 MCRT나 SA로 볼 수 있다. 위 식에서 결국 방류수로 유출되는 SS농도를 무시한다면 폐수처리시스템에서의 순슬러지생산량은 슬러지폐기량과 일치하게 된다. 그러므로 SRT의 관리는 슬러지폐기량의 조절로 가능해지게 된다.

또한, $SRT = 1/\mu$ 로서 SRT가 짧으면(<0.5일) 활성슬러지의 증식속도가 빠르다. 표준활성슬러지법의 전처리로서 고속처리하는 경우가 이에 해당되고, SRT가 길면(>5일) 활성슬러지의 증식속도가 느린 것으로 장기포기법이 여기에 해당된다. 폐수처리방법별로 설계, 운전 파라미터를 보면 다음 표-1과 같다.

〈 표-1 〉 폐수처리방법별 SRT

처리 방법	HRT [hr]	BOD-용적부하 [kgBOD/m ³ /d]	BOD-SS부하 [kgBOD/kgMLSS/d]	SRT [day]	슬러지 생산량 [kg-dry sludge/kg-제거BOD]
활성슬러지법	5-14	0.4-1.2	0.2-0.5	3-4	0.5-0.8
고속처리법	1-2	>2.5	>1	0.2-0.5	0.8-1.0
장기포기법	24-72	<0.3	<0.1	>5-6	0.4

참고문헌 : Activated Sludge-Theory and Practice, N.F.Gray, Oxford University Press, 1990, 33쪽

12-2. SRT가 길거나 짧을 때

〈 SRT가 길 때 〉

- 폭기조에 나타나는 미생물종이 다양하게 되어 활성슬러지의 안정성이 높아진다.
- 증식속도가 느린 균도 증식이 가능해지므로 난분해성 COD의 제거효율이 높아진다.
- 증식속도가 느린 방선균등이 증식하여 폭기조에 거품과 스크림이 일어날 수 있다.
- 슬러지 자기산화가 많이 일어나고 먹이연쇄가 길어지므로 잉여슬러지 발생량이 감소한다.
- 슬러지가 과산화되어 자칫 부하변동에 취약해질 수 있다.

〈 SRT가 너무 짧을 때 〉

- 폭기조 미생물의 증식속도가 너무 빨라 방류수가 혼탁해질 수 있다.
- 증식속도가 느린 질산화균이 증식하지 못해 질소제거효율이 나타나지 않을 수 있다.

12-3. SRT를 길게 하여 난분해성COD 제거

난분해성물질을 측정할 수 있는 COD를 BOD 대신에 사용해야 된다는 제안이 환경부에서도 제기되고 있다. 사실 폐수처리장에서 현재 어려움을 겪는 것은 난분해성COD의 제거다. 그런데 여기서 난분해성물질의 제거를 위해서는 크게 2가지가 필요하다. 하나는 활성슬러지의馴養(acclimation)이고 다른 하나는 슬러지체류시간(SRT)을 길게 하는 것이다.

순양은 미생물의 집적배양(enrichment culture)인데 활성슬러지와 같은 미생물그룹에 난분해성물질을 함유하고 있는 폐수를 공급해 주어 배양하므로써 폭기조슬러지에 미생물변화가 일어나게 하는 조작이다. 보편적으로 활성슬러지중에는 난분해성물질을 분해할 수 있는 미생물이 이미 존재한다고 본다. 그러나 주어진 환경하에서 난분해성물질이 존재하고 또 이 난분해성물질에 의해 기질(substrate) 선택압

(選擇壓)이 걸려야만 분해균이 점차 우점화되고 분해능도 향상된다. 다시말해 맛있고 영양가 높은 기질이 많으면 이 기질을 분해하는 균이 우점화되지 비교적 소량으로 존재하는 난분해성 물질의 분해균은 우점화되기 어렵다는 이야기다. 난분해성물질을 분해하는 순양균은 난분해성 물질이 존재하고 항상 기질 선택압이 걸리는 장소에 많다. 예를 들면 수은내성균은 전기공장이나 병원 배출구에 많고, 석유분해균은 유전지대나 석유화학공장 배출구에 많고, PVA분해균은 紡績工場 폐수처리장 활성슬러지에 많다. 난분해성물질을 제거하는 또 하나의 방법은 슬러지체류시간(SRT)를 이용하는 방법이다.

$$SRT = \frac{\text{처리계내 전체 활성슬러지 미생물량}}{\text{하루동안 系外로 빠져나가는 활성슬러지 미생물량}}$$

여기서 系外로 빠져나가는 것은 방류수로 유출되는 것과 잉여슬러지로 폐기되는 슬러지량의 합으로서 정상상태(定常狀態, steady state)에서는 폭기조에서 증식된 미생물량에 해당된다. SRT의 역수는 비증식속도(μ , 12-1의 정의 참조)이므로 정상상태에서의 SRT는 활성슬러지 전체의 비증식속도(μ)라고 할 수 있다. 따라서 SRT의 제어에 의해 $1/SRT$ 이상의 μ 를 가진 세균을 폭기조에 증식시킬 수 있다. 그러므로 난분해성물질을 제거하기 위해서는 그 물질을 분해하는 미생물이 폭기조에 증식할 수 있도록 SRT를 길게 해주어야 한다. 보기를 들면 다음 표-2와 같다.

〈표-2〉 미생물의 최대비증식속도와 오염물질 제거에 필요한 최소 SRT

세균의 종류	$\mu_{max}(\text{day}^{-1})$	SRT(day)
유기물산화균	1.91	0.55
질화균	0.58	2.2
탈질균	1.37	0.83
PVA분해균	0.052	23.7

참고문헌: 바이오テクノロジー-活用の高機能型活性汚泥法, 橋本獎, 技報堂出版, 1991, 18쪽

그러면 SRT를 길게 할려면 어떻게 해야 하는가?

$$SRT = \frac{X}{Y(ds/dt) - bX}$$

X : 활성슬러지미생물농도(mg/l)

Y : 수율(yield)계수; 기질 섭취량에 비해 미생물체의 증가량

$$Y = X/(C_0 - C)$$

X : 미생물농도(mg/l)

C_0 : 최초의 기질농도(mg/l)

C : 배양후의 기질농도(mg/l)

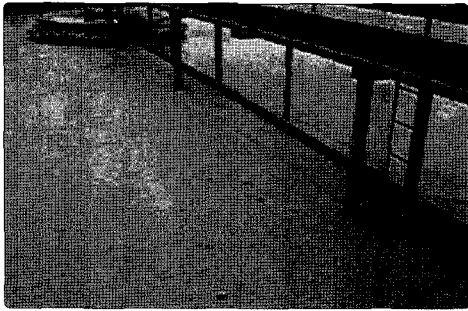
ds/dt : 기질제거속도(mg/l day)

b : 자기분해계수(day^{-1})

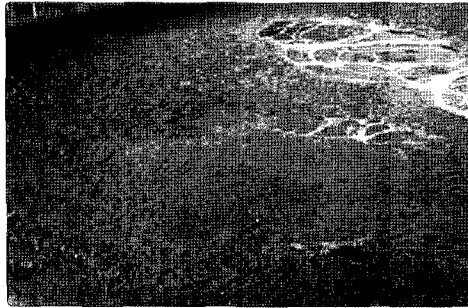
이 식에서 SRT값이 커지게 할려면 ds/dt를 작게 하거나 또는 X를 증대시켜야만 한다. 그런데 기질제거속도(ds/dt)는 기질의 농도에 대체로 비례하므로 기질제거속도를 작게 할려면 폭기조내 기질농도를 낮춰야 한다. 폭기조내 기질농도가 낮아질려면 폭기조 용량이 커져야 된다. 장기포기법이 여기에 해당되는데 수량이 많은 하수처리와 같은 경우에는 폭기조 부지면적이 많이 소요되는 문제점이 있다.

다음엔 X를 증대시키는 방법인데 이것은 활성슬러지의 고농도화를 말한다. 그러나 고농도화는 최종침전조에서의 고액분리가 잘 안되는 문제점도 발생하는 등 여러가지 어려운 점이 있다. 활성슬러지의 고농도화라고 하니 폐수처리장 폭기조에 하수처리장에서 가져온 슬러지를 주기적으로 보충하여 폭기조의 MLSS를 높은 수준으로 유지시키는 경우가 있다. 물론 하수처리장에서 가져온 슬러지는 SRT가 긴 슬러지가 아니다.

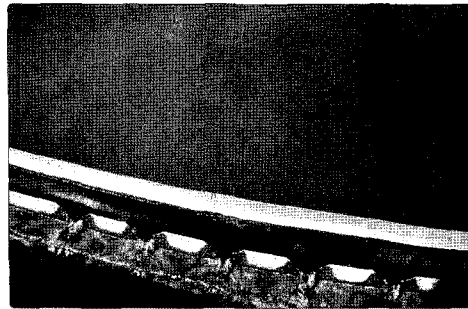
이렇게 외부에서 슬러지를 보충하여 폭기조 MLSS를 고농도로 유지시킬 경우 슬러지 이상현상(탈질에 의한 침전조 슬러지부상, 폭기조 거품 발생, 침전조 핀플러 유출, 방류수 COD상승 등, 사진-1, 2, 3참조)이 종종 일어날 수 있다.



〈 사진-1〉 탈질에 의한 침전조 슬러지부상



〈 사진-2〉 폭기조 거품 발생



〈 사진-3〉 침전조 핀플러

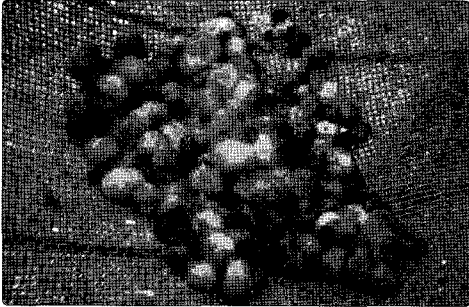
12-4. 폭기조 미디어 충전

미생물의 증식속도는 균의 종류에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 균 중에서 세균의 증식속도가 가장 빠른 데 증식속도가 빠른 세균의 경우 비증식속도(μ)가 $30\sim 60\text{day}^{-1}$ 정도인 반면 원생동물의 비증식속도는 대체로 $1\sim 5\text{day}^{-1}$ 범위이고, 후생동물의 비증식속도는 대개 $0.1\sim 0.3\text{day}^{-1}$ 범위이다. 따라서 SRT가 증가되면 세균뿐 아니라 원생동물, 후생동물의 증식도 가능해지게 된다. 대체로 부유미생물을 이용하는 활성슬러지법에서는 원생동물까지는 쉽게 증식이 가능하지만 후생동물은 슬러지체류시간이 아주 긴 처리장

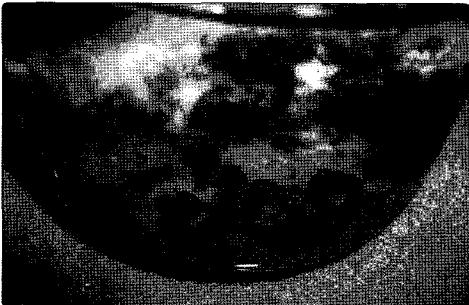
이거나 미디어가 충전된 생물막법과 같은 처리공법이 아니면 폭기조내에 증식되기 쉽지가 않다. 같은 세균이라 하더라도 종에 따라 비증식속도가 다르다. BOD산화세균은 비증식속도가 $30\sim 60\text{day}^{-1}$ 인데 비해 질산화세균의 비증식속도는 1day^{-1} 정도에 불과하다. 따라서 SRT가 달라지면 당연히 폭기조내 미생물구성도 달라지게 된다. SRT가 증가하면 비증식속도가 작은 세균까지도 폭기조내에 증식이 가능해지므로 자연히 활성슬러지의 미생물종이 다양해지게 되는데 SRT가 길 때 처리수의 수질이 안정화되는 것은 이러한 미생물종의 다양성에 기인한다고 볼 수도 있다. 수온이 낮은 겨울철에는 미생물의 증식속도가 낮아지므로 슬러지 체류시간을 증대시키지 않는 한 증식이 느린 미생물종은 폭기조에서 유실(流失)되고 만다.

일반적으로 활성슬러지법에 비해 생물막법에서 후생동물이 더 많이 출현되는데 이는 수리학적 체류시간이 짧더라도 미생물이 생물막에 부착하여 폭기조내에 체류할 수 있기 때문이다. 아울러 난분해성물질의 분해효율이 활성슬러지법에 비해 생물막법에서 대체로 더 높게 나타나는 것도 슬러지 체류시간 때문이다. SRT를 길게 하기 위해서 미디어를 폭기조에 충전할 때 난분해성물질에 대해 기질선택압이 주어져야 한다. 난분해성물질외에는 먹을거리가 없어야 한다. 그래야 난분해성물질을 선택하여 분해하게 된다. 많은 현장에서 보지만 폭기조에 슬러지만 가득하면 난분해성물질이 저절로 분해되는 것으로 생각하고 있다. 폭기조에 미디어를 충전시킬 때 F/M이 높으면 슬러지는 많이 붙지만 조금 지나면 섬모충류(Epistylis 등)나 후생동물(Dero, Aeosoloma 등)이 미디어에 자란 세균 슬러지를 먹고 증식하여 미디어를 차지해 버린다. 그러면 SRT가 긴 균을 미디어에 붙이려는 애초의 목적을 달성하지 못하는 경우가 많다. 그러므로 미디어에 SRT가 긴 슬러지를 붙이려면 F/M이 낮아야 한다. 비록 미디어에 붙는 슬러지량은 아주 적겠지만 SRT가 긴 균들이 붙게 된다.

따라서 SRT가 긴 미생물들이 증식하여 난분해성COD도 분해시킬 수 있다.



〈 사진-4〉 F/M이 높을 때의 부착슬러지

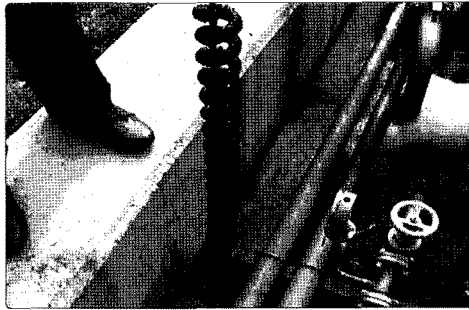


〈 사진-5〉 F/M이 낮을 때의 부착슬러지

폭기조에 미디어를 충전하는 방법은 폭기조내에서 난분해성물질을 분해하는 균이 증식되게끔 해주는 역할을 한다. 그러나 미디어가 충전되었을 때 처리장 운전이 여러 가지 제한요소가 있으므로 운전이 쉽지 않다. 따라서 많은 노력에도 불구하고 미디어가 충전된 처리장에서 이상 현상이 종종 일어나는 이유이다.



〈 사진-6〉 고정상 미디어(실을 꼬아 제조)



〈 사진-7〉 고정상 미디어(페비닐로 제조)



〈 사진-8〉 유동상 미디어(스폰지모양)



〈 사진-9〉 유동상 미디어(페타이어로 제조)

12-5. 종균제를 이용한 난분해성COD 제거

난분해성물질을 분해하는 종균을 미리 배양하여 폭기조에 투입하면 편리할 것이다. 특히 이 방법은 미디어가 충전되어 있지 않은 폭기조에도 활용이 가능하므로 운전이 용이하다. 그러나 종균제내 균의 조성과 균수가 종균제의 품질을 좌우한다. 얼마만큼의 양을 어떤 주기로 투입해야만 하는지가 관건이 될 것이다. 물론 이에 따라 종균제 투입비용도 크게 달라질 것이다. 종균제로서 현장에 이용되기 위해서는 충분한 균수를 가지고 있어야 된다. 적어도 1g당 또는 1mL당 109마리 이상은 되어야 한다.

이보다 균수가 낮으면 많은 무게와 부피가 필요하므로 운반비와 취급에 어려움이 따른다. 특히 난분해성물질을 제거하려면 난분해성물질분해균수가 높아야 할 것이다. 난분해성물질분해균은 공장에서도 배양하기가 쉽진 않을 것이다. 증식속도가 느릴 뿐 아니라 균체수율도 낮을 것이므로 배양이 매우 어려울 것이다.

이것은 종균제의 단가를 올리는 중요한 인자다. 물론 종균제의 보존성도 높아야 한다. 질산화세균처럼 실온의 환경에서 빠르게 사멸한다면 종균제로서 활용하기가 매우 어렵다. 종균제를 처리장마다 맞춤형으로 배양하면 더 유리할 것이다. 문제가 되는 난분해성물질이 무엇인지 밝혀 그 물질을 분해하는 균을 배양하여 폭기조에 투입하면 효과적일 것이다.

12-6. 결론

난분해성COD의 제거효율을 증가시키려면 SRT를 증가시켜 주어야 한다. 폭기조에 미디어를 충전시키므로써 SRT를 증가시켜 줄 수 있지만 반드시 F/M을 낮게 운전하여 난분해성물질의 기질선택압을 높여주어야 한다. 난분해성COD를 제거하기 위한 또 다른 방법은 종균제를 투입하는 방법이다. 특정 난분해성물질을 분해하는 종균을 얼마나 고농도로 배양하여 공급하느냐가 중요하다.

2가지 방법 모두 장단점을 가지고 있다. 어느 방법이든 앞으로 국내에서 많은 기술개발이 꼭 이루어져야 할 사항이다.

다음호에 계속 ...

