

하·폐수처리장의 미생물학적 트러블에 대한 진단기법

이 문 호 |

이호환경컨설팅 대표이사

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

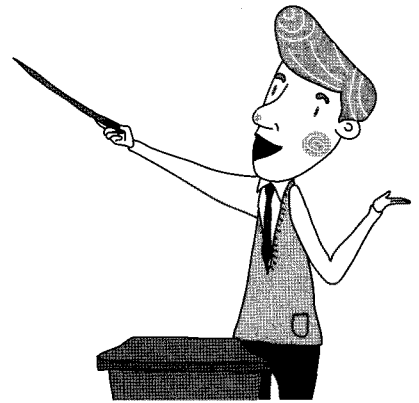
우리 나라에서 하수처리, 폐수처리에 주로 이용되고 있는 처리공법은 활성슬러지법이다. 물리적처리, 화학적처리를 전처리 및 (또는) 후처리에 활용하겠지만 그래도 처리에 가장 중요한 역할은 생물학적 처리공정이다. 그런데 생물학적 처리공정은 대부분 호기성 미생물을 이용하는 폭기조에서 이루어진다. 폭기조에서 BOD가 제거되고 질산화가 이루어진다. 폭기조라는 반응조에는 세균, 원생동물, 후생동물 등 여러 그룹의 미생물이 있으며 각 그룹별로 수십종의 미생물이 같이 어울려 활성을 나타내고 있다. 물론 미생물 상호간에 서로 경쟁도 하고 협력도 할 것이다. 잡아 먹고 먹히는 먹이연쇄도 당연히 형성된다.

이처럼 복잡한 미생물 집단이 평형을 이루고 있을 때는 처리효율도 높고 슬러지 침강성도 양호하여 맑고 수질이 좋은 처리수를 얻을 수 있다. 그러나 미생물 집단의 평형이 깨어지고 어느 한 그룹의 미생물이 크게 번창하거나 어느 종의 미생물이 창궐하게 되면 트러블이 생기게 된다. 하지만 어느 생태계이든 한 번 파괴되면 회복이 힘들듯이 활성슬러지의 미생물 구성을 다시 정상적으로 회복하는 데는 상당히 긴 시간이 요구된다. 그래서 회복 기간 동안 처리수의 수질을 배출기준 이하로 유지하기 어려운 경우가 대부분이다.

우리들은 아프면 의사에게 진찰부터 받는다. 배가 아파 병원에 갔는데 증상을 듣고 내린 진단이 궤양이라고 하였다. 그래서 약을 얼마 동안 먹으면 낫는다고 하여 1개월 동안 약을 복용했다. 그래도 차도가 없어 이번에는 다른 병원에 갔다. 위내시경을 찍어보고는 위암이라고 진단했다. 이럴수가. 진단 잘못으로 위암의 조기 치료 기회마저 놓치고 말았다. 이제 치료방법도 궤양과는 완전히 달라진다.

생물학적처리의 트러블도 마찬가지다. 진단이 가장 중요하다. 어쩌면 진단만 정확히 이루어지면 대책은 저절로 도출된다고 볼 수 있다. 그러나 수십 종의 미생물이 혼전하는 미생물 생태계를 분석한다는 것은 쉽지 않다. 더구나 하수처리, 폐수처리 현장에는 충분한 실험기구가 갖추어져 있지 못한 경우가 많다. 그래서 이미 한 번 겪었던 경험에 의존하거나 이것마저도 없으면 그저 추정만으로 진단하게 된다. 그래서 이런 저런 대책을 수행해보지만 트러블의

연재



회복은 좀처럼 이루어지지 않고 때로는 오히려 상태가 더 악화되는 곳도 흔히 본다. 이럴 경우 진단을 좀 더 정확히 할 수 있는 기술이 필요하다. 물론 고가의 장비나 많은 실험을 필요로 하지 않는 간단한 진단기법이면 현장에서 활용하기에 더욱 좋을 것이다.

다음에 하수처리, 폐수처리에서 일어날 수 있는 미생물학적 트러블의(기계적 트러블을 제외) 진단에 대해 실제 행해졌던 진단을 주로 예로 들어가며 설명하고자 한다.

1. 하수처리장의 질소제거 효율이 낮다

(1) A하수처리장

하수처리장 방류수의 T-N이 높게 나타나고 침전조가 혼탁해졌다. 먼저 활성슬러지를 검경했더니 원생동물 Aspidisca가 많았다. 그러나 다른 원생동물(Arcella, Vorticella, Lecane, Rotaria 등)은 개체수가 아주 적었다. 사상체는 거의 없었고 특별한 균이 번창한 것도 아니었다. 개체수는 적지만 Arcella와 후생동물이 나타나는 것으로 봐서 활성슬러지의 SRT가 길다는 것을 알 수 있었다. 그래서 SRT가 짧아서 T-N 제거율이 낮아졌다고 볼 수는 없었다.

이번에는 폭기조내의 NH₃-N과 NO₃-N을 측정해 보았다.(표-1)

폭기조-3의 NH₃-N이 29mg/L이고 NO₃-N은 검출되지 않았다. 하수가 유입되고 처리과정을 거치면서 질산화가 일어나면 pH가 내려갈텐데 오히려 약간 증가하고 있다. 따라서 폭기조에서 질산화가 일어나지 않고 있음을 볼 수 있었다.

〈 표-1. 반응조별 수질(A 하수처리장) 〉

구 분	유입수	무산소조	폭기조-3	방류수
pH	6.5	7.0	7.1	7.4
NH ₃ -N(mg/L)	47	43	29	27
NO ₃ -N(mg/L)	4.8	불검출	불검출	불검출

현장에서 질산화가 일어나지 않을 경우 가장 먼저 알아 봐야 할 것은 슬러지내에 질산화균이 있느냐 없느냐 하는 진단이다. 그래서 폭기조-3의 시료를 1L 메스실린더에 넣고 30℃에서 하루 동안 폭기를 했다. 그 결과 표-2에서 보는 바와 같이 NH₃-N은 감소하고 NO₂-N,

NO₃-N이 많이 생성되었다. 따라서 질산화가 잘 일어났음을 볼 수 있다. 그러므로 현장의 활성슬러지에는 질산화균이 약간 있기는 하나 실험실 폭기온도(30℃)보다 폭기조의 수온(20℃ 이하)이 낮고 기타의 요인(DO, 폭기시간 등)으로 질산화가 일어나지 않고 있음을 알 수 있었다.

〈 표-2. 폭기조-3 시료를 24시간 폭기시킨 후의 수질 〉

구 분	폭기 전	폭기 후
pH	7.1	6.7
NH ₃ -N(mg/L)	29	3.3
NO ₂ -N(mg/L)	불검출	9.7
NO ₃ -N(mg/L)	불검출	36

그래서 폭기조 활성슬러지에 질산화균이 얼마나 있는지 그 활성을 측정해보기로 했다. 1L 메스실린더에 NH₃-N(40mg/L) 기초염류용액(BOD원이나 유기질소는 없음) 800mL를 넣고 여기에 폭기조-3의 슬러지(하루 동안 정치시켜 침강된 슬러지를 사용함)를 첨가하여 30℃에서 강하게 폭기시켰다. 폭기시키면서 시간대별로 시료 25mL를 채취하여 GF/C여과액을 분석하였다.

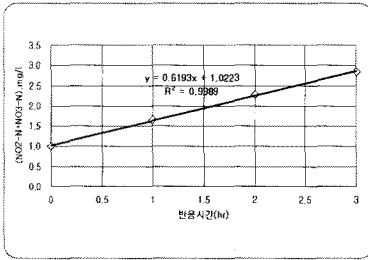
〈 표-3. 폭기조-3 슬러지의 질산화속도 측정(A하수처리장) 〉

반응시간(hr)	0	1	2	3	20
NH ₃ -N(mg/L)	42	42	42	42	34
NO ₂ -N(mg/L)	0.11	0.31	0.34	0.50	4.0
NO ₃ -N(mg/L)	0.89	1.4	2.0	2.4	11
(NO ₂ -N+NO ₃ -N)	1.0	1.7	2.3	2.9	15
pH	8.0	8.2	8.2	8.1	7.9

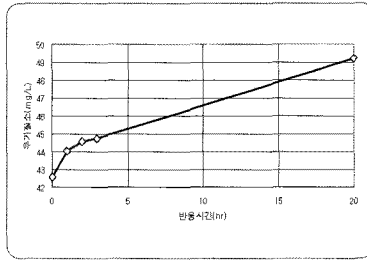
표-3에서 NH₃-N의 감소속도로는 질산화활성을 측정하기가 어려웠다. 생성되는 NO₂-N과 NO₃-N의 합을 시간대별로 그래프를 그려 질산화활성을 계산했다. 메스실린더내 반응액의 평균SS는 365mg/L였다.

그림-1에 반응시간 0~3시간의 데이터를 그렸다. 직선의 그래프가 나왔고 직선의 기울기는 0.62mg/L/hr이다. SS농도가 365mg/L이므로 직선의 기울기를 SS로 나눠 주면 1.7mg/gSS/hr가 나온다. 이 속도는 1g의 슬러지가 1시간 동안에 1.7mg의 NH₃-N을 NO₂-N 또는 NO₃-N으로 산화시킨다는 것이다. 그렇다면 이 1.7mg/gSS/hr라는 값이 충분한 질산화활성이냐? 현장의 수온 20℃, DO 2~3mg/L, 체류시간 5~6시간의 조건에서 질산화가 일어나겠는가?

〈 그림-1. 폭기조-3 슬러지의 질산화속도(A하수처리장) 〉



〈 그림-2. 질산화속도 측정시 무기태질소의 증가(A하수처리장) 〉



질산화속도 측정 시 반응액내의 무기태질소가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 무기태질소는 NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N의 합으로 보았다. 그림-2에서 무기태질소가 증가하는 그래프를 볼 수 있다. 20시간의 질산화반응에서 15mg/L의(NO₂-N+NO₃-N)이 생성되었음에도 불구하고 NH₃-N은 8mg/L 감소하는데 그쳤다(표-3). 따라서 20시간의 폭기시간으로 NH₃-N이 7mg/L 생성되었다는 결과다. NH₃-N는 단백질의 분해에서 생성되는 것으로 추정해 볼 수 있다. 대체로 미생물배양에서 NH₃-N의 생성은 pH를 상승 시킨다. 표-3에서 보면 20시간의 질산화반응후 pH는 반응초기와 거의 차이가 없다. 20시간 반응에서 질산화가 상당히 일어났음에도 pH가 크게 낮아 지지 않은 것은 pH 상승요인이 있었기 때문이다.

실제 이 하수처리장에서는 분뇨가 투입되고 있어서 처리과정에서 NH₃-N의 생성을 충분히 예상할 수 있을 것이다. 그러나 이것이 방류수 T-N을 높이는 데 절대적인 영향을 주는 것은 아니다. 전체적으로 이 하수처리장에선 질산화균은 있으나 그 활성이 낮아 현장에서 질산화가 충분히 일어나지 않음으로서 방류수의 T-N이 높게 나오는 것으로 판단된다. 그러면 슬러지의 질산화활성을 높이는 방법이 강구되어야 할 것이다.

폭기조-3의 시료를 하루 폭기시켰을 때 질산화가 잘 일어났음을 보면 폭기조내 용액의 기질적인 저해요인은 없다고 볼 수 있다. 질산화를 억제하는 독성물질이 존재한다거나 하는 저해요인은 없다고 본다. 그렇다면 이제 환경적인 조건을 살펴보아야 한다. 폭기조의 수온이 20℃이므로 질산화균증식의 최적 수온은 아니지만 그렇다고 질산화가 일어나기 어려울 정도의 수온도 아니다. 뿐만 아니라 하수처리장의 경우 유량이 많고 체류시간이 짧으므로 수온을 상승시켜주는 대책은 실행하기 어려운 대책이다. 이번에는 질산화에서 가장 중요한 환경요인인 DO를 보면 현재 2~3mg/L인데 특별한 경우(폭기조에 미디어가 충전되어 있을 때, BOD부하가 높을 때 등)를 제외하고는 DO가 2mg/L이상이면 DO로 인한 질산화 저해가 일어난다고 보기는 어렵다. 물론 DO가 높으면 질산화속도가 더 빨라지는 건 사실이다. 다음으로 BOD부하를 생각해 보면 이 하수처리장의 경우 유입 BOD가 150~200mg/L, F/M 2.0~2.5kgBOD/kgMLSS/d 정도로는 BOD부하가 질산화를 저해시킬 정도는 아니다. 그렇다면 결국 이 처리장에 들어 있는

슬러지의 질산화활성이 부족하다는 것이 가장 큰 이유일 것으로 생각된다. 따라서 대책으로는 질산화균의 증식을 증대시키는 방안이 실행되어야 한다.

(2) B하수처리장

완벽하지는 않지만 T-N제거가 이루어지고 있으며 단지 방류수의 BOD가 다소 높게 나오는 트러블이 일어나고 있고 폭기조에는 스킵이 일부 폭기조를 덮고 있는 상태이다. 이 하수처리장도 앞서 A하수처리장과 비슷한 시기(봄)에 조사되었다.

이 하수처리장의 활성슬러지에도 *Aspidisca*가 우점되었는데 개체수가 아주 많았다. 그리고 운동성이 아주 활발하였다. *Aspidisca* 외에도 *Vorticella*, *Epistylis*가 나타났다. 특히 *Aspidisca* 개체수가 많았는데 슬러지 침강성은 좋았으나 침강 초기에 상등액이 약간 혼탁하였다. A하수처리장에서 *Aspidisca*가 나타나고 상등액이 약간 혼탁하였는데 *Aspidisca*와 무슨 상관이 있는지는 알 수 없다. 일반적으로 *Aspidisca*의 지표성은 뚜렷하지 않다. 그러나 *Aspidisca*는 포복형 원생동물이므로 슬러지 플러이 어느 정도 형성되어 있어야 잘 나타나는 종이다. 슬러지 표면과 슬러지 사이를 활발하게 헤집고 다니며 생활하는 원생동물이라 *Aspidisca*의 우점은 결코 달갑지 않은 종인것 같다.

〈 표-4. 반응조별 수질(B하수처리장) 〉

구 분	유입수	폭기조	방류수
pH	7.1	6.9	7.0
SS(mg/L)	194	3,700	10
NH ₃ -N(mg/L)	33.7	6.24	9.10
NO ₂ -N(mg/L)	-	-	0.64
NO ₃ -N(mg/L)	-	-	2.63

B하수처리장의 반응조별 수질을 보면 방류수에 NH₃-N이 9mg/L이고 NO₃-N이 2.6mg/L이다. 의외인 것은 방류수의 NO₂-N이 0.64mg/L로 다소 높게 나타나고 있는데 원인을 알 수 없다. NH₃-N 33.7mg/L가 유입되어 9mg/L로까지 제거되는 것으로 봐서 질산화가 잘 일어나는 것으로 판단된다.

폭기조의 MLSS는 3,700mg/L였으며 방류수의 SS가 10mg/L로 맑았다. B하수처리장 슬러지에 대해서도 질산화 활성을 측정해보았다.

1L 메스실린더에 NH₃-N(40mg/L) 기초염류용액(BOD 원이나 유기질소는 없다) 800mL를 넣고 여기에 폭기조 슬러지(하루 동안 정치시켜 침강된 슬러지를 사용함)를 첨가하여 30℃에서 강하게 폭기시켰다. 폭기시키면서 시간대별로 시료 50mL를 채취하여 GF/C여과액을 분석하였다. 결과는 표-5와 같다.

〈 표-5. 슬러지의 질산화활성 측정(B하수처리장) 〉

반응시간(hr)	0	1	2	3	21
NH ₃ -N(mg/L)	38	37	38	35	24
NO ₂ -N(mg/L)	0.316	1.39	2.59	4.05	13.4
NO ₃ -N(mg/L)	1.2	3.2	5.3	8.9	32
[NO ₂ +NO ₃],mg/L	1.5	4.6	7.9	13	45
pH	7.7	7.9	8.0	7.9	6.4
무기테질소(mg/L)	39	42	46	48	69

초기 질산화반응속도를 그래프로 그려 보았다.

〈 그림-3. 폭기조 슬러지의 질산화속도(B하수처리장) 〉

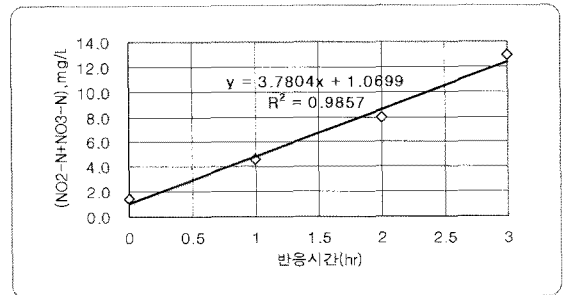
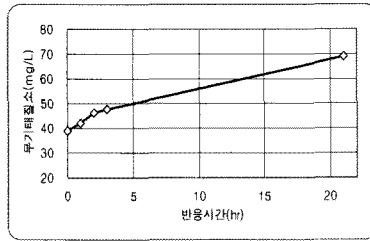


그림-3의 기울기가 3.78mg/L/hr이다. 메스실린더내 반응액의 평균SS가 620mg/L였다. 따라서 질산화속도는 6.1mg/gSS/hr이다. A하수처리장의 1.7mg/gSS/hr와 비교하면 3.6배나 높은 질산화활성을 나타내고 있다. 표-5에서 보면 21시간의 반응에서 NH₃-N이 크게 감소하였고 반면 (NO₂-N+NO₃-N)의 생성이 크게 증가하였다. 아울러 pH도 반응초기의 7.7에서 6.4까지 낮아졌다. 그래서 질산화가 잘 일어났음을 볼 수 있다. 그러나 반응시간 3시간 이후 21시간까지의 질산화속도를 보면 기울기가 1.79mg/L/hr로서 반응시간 0~3시간의 기울기 3.78보다 훨씬 낮다. 아마도 이것은 질산화반응이 진행되면서 기질의 감소, 반응생성물의 증가, pH의 저하 등의 저해요인으로 인하여 질산화속도가 감소된 것으로 보인다.

B하수처리장에서도 슬러지의 질산화 활성 측정도중 무기태질소의($\text{NH}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$) 증가를 볼 수 있었다(표-5, 그림-4). B하수처리장 역시 분뇨처리수가 투입되고 음식물 쓰레기 탈리액도 투입되고 있다.

〈 그림-4. 질산화속도 측정시 무기태질소의 증가(B하수처리장) 〉

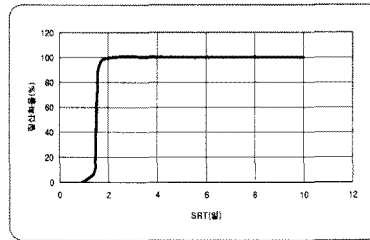


(3) 고도처리장 운전에 알아두어야 할 사항

1) SRT

질산화균은 증식속도가 느리기 때문에 슬러지의 SRT를 길게 해주어야만 질산화가 일어난다고 알고 있다. 이 내용만 막연하게 기억하고는 슬러지의 SRT를 길게 해주면 해출수쪽 질소제거가 잘 되는 것으로 믿고 SRT를 아주 길게 운전하는 처리장이 많다. 그러다가 어느 시기가 되면 방류수가 혼탁해지거나 슬러지 해체까지 일어나는 경우도 있다.

〈 그림-5. SRT와 질산화율과의 관계 〉



* [자료] 'Biological Wastewater Treatment' C.P.Leslie Grady, JR.et al.,p209, 1999

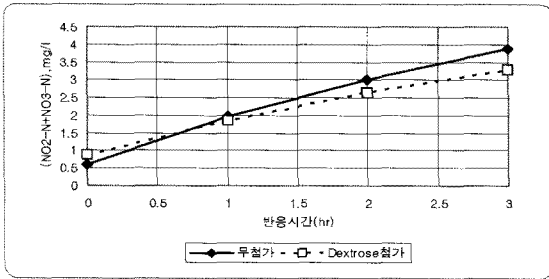
그림-5에서 보면 어느 SRT이상이면 질산화율이 같게 나온다. 이 이야기는 질산화균이 증식할 수 있는 SRT이상이면 SRT가 더 증가하여도 질산화에 영향을 주지 않는다는 것이다. 그러나 어느 SRT이하이면 전혀 질산화율이 나타나지 않는 특성(질산화율이 폭포처럼 급격하게 떨어짐)을 그림-5에서 볼 수 있다. 대략 질산화에 필요한 SRT는 여름에는 6~12일, 겨울에는 8~15일 정도라고 한다.

2) BOD

BOD가 질산화에 얼마나 영향을 줄까?

하수처리장 슬러지로 실험을 해 보았다. $\text{NH}_3\text{-N}$ 기초염류용액(40mgN/L)에 하수처리장슬러지를 첨가하고 30℃에서 강하게 폭기시켰다. 한쪽은 그대로 다른 한쪽에는 BOD원으로 포도당(Bacto-Dextrose)을 400mg/L 첨가해 주었다. 그림-6에서 보면 포도당 첨가 시 초기질산화속도가 포도당 무첨가보다 약간 낮은 것으로 나타났다. 그러나 초기 포도당 농도가 400mg/L로 BOD가 400mg/L 이상이다. BOD가 이 정도로 높은 폭기조도 없겠지만 이렇게 높은 BOD에서도 질산화속도가 거의 비슷하게 나타나고 있다. 따라서 BOD 그 자체로 질산화에 영향을 주지는 않는 것으로 보인다.

〈 그림-6. BOD가 질산화에 미치는 영향 〉



BOD 산화균과 질산화균의 먹이를 비교해보면 표-6과 같다. 질산화균의 에너지원, 탄소원 모두 BOD 산화균과 다르다. 따라서 BOD(=유기물)이 있든 없든 질산화균에게는 자신의 먹이가 아니기 때문에 관심이 없을 것이다. 다만 O₂에 대해서는 BOD 산화균과 질산화균 양자에 필요한 먹이다. 따라서 당연히 경쟁을 할 것인데 높은 에너지(유기물)를 먹이로 하는 균이 대체로 경쟁력이 높다. 따라서 DO가 높을 때는 질산화균도 O₂를 이용할 수 있겠지만 만약 DO가 낮다면 O₂를 BOD 산화균이 이용하고 질산화균이 이용할 O₂의 잔여가 없어지게 될 것이다.

〈 표-6. 폭기조내 BOD 산화균과 질산화균의 먹이 〉

구 분	에너지원	탄소원	산소요구
BOD 산화균	유기물	유기물	O ₂ 필요
질산화균	NH ₃	CO ₂	O ₂ 필요

따라서 폭기조의 DO가 낮으면 질산화율이 낮게 나타날 것이다. BOD 산화균이 DO를 소비하는 양은 BOD 부하에 좌우된다. 그러므로 BOD 부하가 높으면 BOD 그 자체가 질산화에 영향을 주지는 않지만 BOD가 산화되면서 DO를 소비해 버리므로 결과적으로 DO 부족이 질산화에 영향을 주게 되는 것으로 생각한다. 질산화를 위해 BOD 부하를 0.32kg/m³/d로 제한하기도 하지만 이 수치의 2배의 부하에서도 질산화가 가능하다고 한다.

3) DO

고도처리에서 가장 중요한 운전인자가 바로 DO이다. 일반적으로 폭기조의 DO를 2.0mg/L 이상 유지시키면 질산화에 무리가 없다고 이야기한다. 그러나 때로는 폭기조의 DO를 4.0mg/L 이상 유지시켜야만 질산화가 일어나는 곳도 있고 또 어떤 처리장은 DO 0.5mg/L로도 질산화가 이루어진다는 곳도 있다. 질산화에 필요한 최소

DO 농도는 여러 가지 환경요인과 밀접한 관계가 있다.

- HRT가 짧으면 DO를 더 높여야 하고
- BOD 부하가 높으면 DO를 더 높여야 하고
- F/M이 높으면 DO를 더 높여야 한다

한편 수온이 높은 여름에는 미생물의 활성이 증대되어 DO 소비속도가 빠른 반면 산소포화 농도는 낮고, 수온이 낮은 겨울에는 미생물의 활성이 낮아져 DO 소비속도가 느린 반면 산소포화 농도는 높다는 점도 운전에 고려하여야 한다.

뿐만 아니라 폭기조의 물흐름이 Plug Flow에 가깝다면 폭기조 맨 앞단에서는 DO가 너무 낮아 질산화가 일어나지 않을 수도 있다. 일반적으로 HRT가 짧은 처리장(하수처리장)에서는 폭기조의 물흐름이 완전혼합형보다 Plug Flow인 것이 질산화에 더 유리하다. 일반적으로 HRT가 4~6시간이면 질산화가 가능하다고 본다.

질산화에 필요한 O₂ 양은 1g의 NH₃-N을 NO₃-N으로 산화시키는데 4.6g이 소비된다. 그래서 BOD 1g을 산화시키는데 필요한 O₂의 4.6배나 필요로 한다. 따라서 BOD 처리장을 고도처리장으로 개조할 때 충분한 산소 공급을 위해 미세기포를 발생하는 산기장치로 교환하기도 한다.

4) 탈질

탈질반응은 무산소 조건이어야만 일어난다. 산소가 존재하면 탈질균이 전자를 산소로 보내고 NO₃-N으로 보내지 않는다. 따라서 산소가 존재하는 한 탈질은 일어나지 않는다. 그러므로 탈질조(무산소조)에 산소(공기로부터 용해)나 DO가 유입되지 않도록 운전하여야 한다. 내부반송액의 DO가 너무 높을 때 탈질효율이 저하되는데 내부반송을 하는 마지막 폭기조의 폭기량을 최대로 하여 DO를 아주 높게 운전하는 것이 가장 흔히 하는 실수이다.

그리고 탈질반응에는 유기물이 필요하다. 그래서 탈질조에 원수를 공급하거나 아니면 메탄올을 공급해주어야 한다. 이론적으로는 1g의 NO₃-N을 탈질시키는데 1.9g의 메탄올이 필요하다. 그러나 현장 경험적으로는 2.5~3.0g의 메탄올이 요구된다.

다음호에 계속 ...