

미생물 실험을 이용한 생물학적 폐·하수처리



연재

이 문 호 | 이호환경컨설팅 대표이사

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

하수, 폐수, 활성슬러지 시험법

9. 폐수처리시설의 어느 공정에 문제가 있는가?

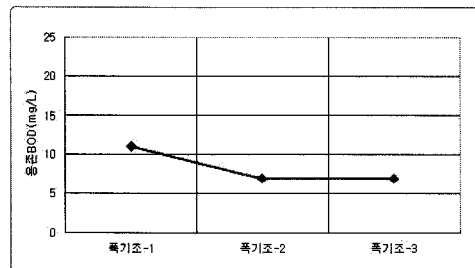
제거하고자하는 오염물질에 따라 폐수처리시설의 종류가 다르고, 어느 한계까지 처리하느냐에 따라서도 시설에 차이가 있다. 뿐만아니라 경제성, 부지면적 등 여러 가지 조건에 따라 시설의 종류가 달라진다. 그러나 대체로 산업폐수의 경우 전처리 공정, 생물학적처리공정, 후처리공정으로 이루어져 있다. 요즘은 보다 양질의 처리수질을 얻기 위해 후처리공정이 점점 추가되어 가고 있는 실정이다.

우리 사람도 마찬가지로이지만 몸의 어느 한 부위만 아프더라도 몸 전체가 편안하지 않듯이 폐수처리장에서도 어느 한 공정에 이상이 발생되면 처리시설 전체의 처리효율이 낮아지게 되고 때로는 트러블이 일어나 폐수처리가 원만하게 이루어지지 못하거나 처리수질이 엉망으로 되기도 한다. 물론 이런 이상현상이 갑자기 나타날 수 있지만 그것은 단지 우리가 눈으로 증상을 확인하는 것뿐이다, 이상현상이 일어나기 훨씬 이전에 이미 원인제공이 되는 문제가 주어지는데 우리가 이 문제를 미리 발견하고 제거한다면 이상현상을 사전에 예방할 수 있다. 마치 조기진단으로 암을 완치할 수 있는 것이나 같다. 현장에서선 문제가 발생되어도 공정별로 수질조사를 잘 하지 않는다. 어떤 트러블이 생겨도 그 트러블의 증상만 완화시킬려고 노력한다. 폐수처리공정별로 수질을

조사하므로써 우리가 얻을 수 있는 정보가 얼마나 많은지 현장의 예를 다음에 열거하고자 한다.

9-1. 폭기조별 유기물농도변화

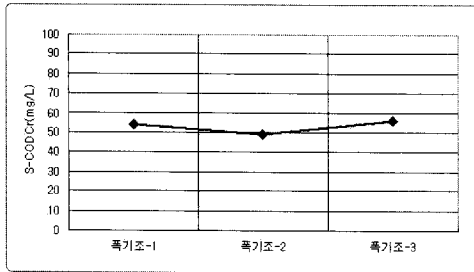
그림-1은 제당폐수처리장에서 폭기조별로 용존 BOD를 그래프로 그려본 것인데 폭기조 3개의 BOD차이가 거의 없다. 폭기조-1의 용량이 아주 커서 유입되는 BOD(370mg/L)가 완전히 희석되고 미생물에 흡수되어 폭기조-1에서 이미 매우 낮은 BOD를 보이고 있다. 이어지는 폭기조-2, 폭기조-3에서 더 이상 감소할 BOD가 없을 정도이다. 따지고 보면 폭기조-1, 2, 3이 BOD 농도만 본다면 1개의 완전혼합형 폭기조인 것이나 다를 바 없다. 그래서 이 처리장에선 벌킹이 자주 일어나 처리에 어려움을 겪고 있다.



〈그림-1〉 폭기조별 용존BOD농도(제당, 유입수 BOD=370mg/L)

이와 유사한 예는 많다. 라면스프와 과자스프 등을 생산하는 공장의 폐수처리장에서도 그림-2처럼 폭기조별 용존COD_{cr}의 차이가 거의 없다. 이 처리장은 폭기조 3개의 크기가 비슷하고 폭기조

위로 물이 월류되어 넘어가므로 폭기조 3개가 완전히 분리되어 있는데도 농도차이가 없다. 폭기조-1의 전단에서 시료를 채취하여도 마찬가지였다. 그러나 폭기조-1, 2, 3으로 나누어져 있어도 유기물의 농도구배가 전혀 없는 편이다. 따라서 폭기조가 하나이고 완전혼합형인 처리장이나 마찬가지다.

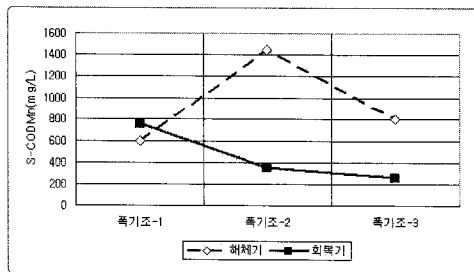


〈그림-2〉 폭기조별 용존COD_{cr}농도(라면스프), 유입수COD_{cr}=840mg/L

이 처리장 역시 별킹이 연중 지속된다고 봐도 과언이 아니다. 앞서 본 그림-1과 그림-2처럼 유기물의 농도를 나타내는 파라미터(BOD, COD_{Cr}, COD_{Mn}, TOC)를 그려보았을 때 폭기조별로 농도 차이가 거의 없을 때 폭기조의 구조상 또는 유입 폐수의 기질 특성상 별킹이 일어나기 쉽다.

9-2. 슬러지 자기산화 또는 슬러지해체 진단

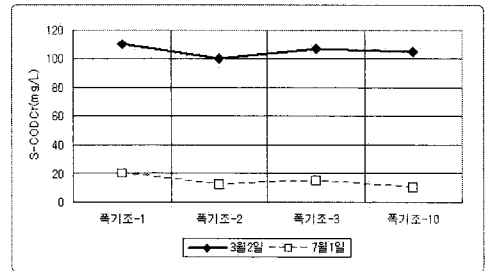
슬러지의 자기산화나 슬러지해체를 조기에 진단하는 방법으로는 공정별로 특히 폭기조별로 수질을 조사하는 것이 가장 중요한 진단법이다.



〈그림-3〉 슬러지해체기와 회복기의 폭기조별 COD_{Mn}(EG생산)

그림-3에서 해체기의 그래프를 보면 폭기조-1의 COD_{Mn}이 600mg/L인데 폭기조-2의 COD_{Mn}은 1,400mg/L를 넘고 있다. 따라서 폭기조-1이나

폭기조-2에서 슬러지해체가 일어나고 있다. 슬러지가 해체되면 용존COD가 크게 증가하고 BOD, N, P도 증가된다. 어느 폭기조에서 해체가 일어나는지를 알고자 하면 폭기조 유입과 유출의 수질을 조사해보면 된다. 폭기조에 유입되는 물보다 유출되는 물의 수질이 더 나쁘면 그 폭기조에서 슬러지해체가 일어나고 있다. 어느 한 폭기조에서 해체가 미약하게 일어났다면 방류수의 수질에 큰 영향을 주지 않고 저질로 회복되기도 하지만 해체의 조건이 지속되면 하나의 폭기조에서 다른 폭기조로 해체범위가 넓어지면서 결국 방류수의 수질이 크게 악화되고 저질로 회복되는 능력을 잃어버리게 된다. 폭기조 전체에서 해체가 일어나면 완전한 회복(방류수 수질이 정상으로 회복)에는 많은 노력에도 불구하고 수개월이 걸리기도 한다.



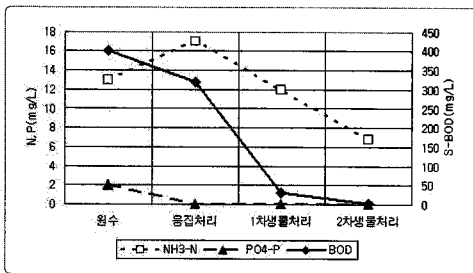
〈그림-4〉 폭기조별 용존COD_{cr}(음료)

그림-4에 음료폐수처리에서 폭기조별 용존COD_{cr}를 보면 폭기조-3에서 오히려 COD_{cr}이 증가하는 것을 볼 수 있다. 3월과 7월의 조사에서 같은 경향을 보이고 있다. 이 처리장은 폭기조가 10개로서 슬러지 자기산화가 잘 일어나고 있다. 물론 자기산화가 일어난다고 해서 방류수의 BOD나 COD가 법적기준을 초과하는 일은 많지 않다. 그러나 처리장에 트러블이 자주 일어나는 것이 문제다. 거품이나 스컴, 핀플러, 침전조 슬러지부상 등과 같은 트러블이 자주 일어난다.

슬러지 자기산화는 낮은 F/M에서 일어나는데 유입폐수의 BOD저하 또는 폐수유입량의 감소 등과 관계가 있고 또 지나치게 긴 SRT를(높은 MLSS) 유지하므로써 자기산화율이 높아지기도 한다.

9-3. N, P부족 진단

산업폐수처리에서는 N, P가 부족되어 N원(또는) P원을 공급해주어야 하는 처리장이 많다. N원(요소) 공급, P원(인산용액) 공급은 아주 간단한 일이다. 그러나 이 N, P공급이 제대로 이루어지지 않으면 결과로 나타나는 트러블은 의외로 심각하게 나타난다. 현장의 관리인들이 이 N, P공급을 중요하게 생각하지 않는 경우가 많은데 반드시 고쳐야 할 마음가짐이다.



〈그림-5〉 폭기조별 N, P농도(제지)

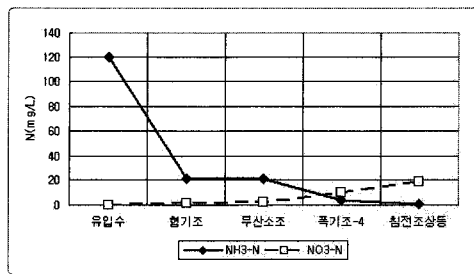
그림-5는 제지폐수처리에서 공정별로 NH₃-N, PO₄-P를 그려본 것이다. 우선 응집처리에서 NH₃-N은 영향이 없으나 PO₄-P는 응집처리에 의해 제거된다는 사실을 알아야 한다. 실제 1차 응집처리를 하는 처리장에서 이 사실을 모르고 원수에 P가 많다고 폭기조에 전혀 P를 넣어주지 않고 처리하여 트러블을 겪기도 한다.

그림-5에서 원수보다 응집처리에 NH₃-N이 더 높은 것은 농축조 월류수, 탈수여액, 기타 소량의 폐수가 집수조에 유입되기 때문이다. PO₄-P가 응집처리를 거치면서 거의 0에 가까운 농도이다. 그리하여 1차생물학적처리와 2차생물학적처리에서 PO₄-P는 0이다. 그럼에도 BOD는 제거되어 최종적으로 2.0mg/L이하로 떨어진다. P가 결핍되는 데도 어떻게 BOD가 제거되는지 신기할 정도이다. 그러나 장기적으로는 반드시 트러블이 일어나기 마련이다. N, P는 미생물의 균체합성에 이용된다. 따라서 N, P결핍시 가장 흔히 나타나는 이상현상은 슬러지 점성이고 다음으로는 별킹이다. 물론 처리효율의 저하 등 다른 증상도 나타날 수 있다. 처리장에 따라서는 슬러지 자기산화에서 용출되어 나오는 P가 이용되기도 하지만 이 양은

아주 적으므로 부족되면 꼭 외부에서 N, P를 공급해주어야 한다. 그러나 N, P공급에서 주의할 점은 NH₃-N을 너무 많이 공급해주면 환경조건에 따라서 질산화가 일어나 예상치 못한 침전조슬러지부상이 일어날 수도 있다. 그리고 한꺼번에 하루치 분량을 주입하는 것도 N, P첨가 효과를 감하는 잘못을 범한다.

9-4. 고도처리장에서의 진단

생물학적으로 N를 제거하려면 질산화와 탈질 둘 다 잘 일어나야 한다. 어느 하나만 아주 양호하다고 하여 질소제거가 되는 건 아니다. 그러면 질산화와 탈질 어느반응에 문제가 있는지를 공정별 수질조사로 알아 본다.

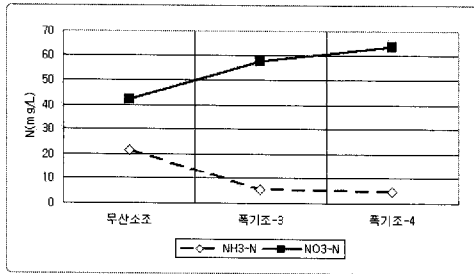


〈그림-6〉 처리공정별 NH3-N, NO3-N(도측)

도축폐수처리에서 질소의 제거를 그림-6에서 볼 수 있다. 먼저 유입수내 120mg/L의 NH₃-N이 침전조에서 20mg/L의 NO₃-N으로 유출되고 있으니 질산화와 탈질이 무난히 잘 일어나고 있다. 무산소조의 NO₃-N이 거의 0이므로 탈질이 잘 일어나고 있다. 한편 무산소조이후 폭기조에서 20mg/L의 NH₃-N이 NO₃-N으로 산화되므로 질산화도 잘 일어나고 있다. 만약 침전조에 남아 있는 20mg/L의 NO₃-N까지 제거하려면 후탈질조를 두면 완벽하게 N를 제거할 수 있다. 특히 유입N농도가 높을 때에는 전탈질조, 후탈질조를 두어 2단계 처리를 하는게 좋다.

그림-7에서 무산소조의 NO₃-N이 40mg/L를 넘고 있다. 무산소조 후에 있는 폭기조에서는 질산화가 일어나므로 NO₃-N은 더 증가하여 마지막 폭기조에서는 NO₃-N이 60mg/L이상이다.

그러나 방류수의 T-N이 높을 수밖에 없고 침전조에선 탈질에 의해 슬러지가 많이 부상하게 된다. 그러나 무산소내 20mg/L의 NH₃-N이 폭기조에서 5mg/L까지 감소하였으니 질산화는 잘 일어나고 있다.



〈그림-7〉 무산소조의 NO₃-N(도축)

그래서 그림-7의 경우 탈질조의 탈질효율이 낮아 방류수 T-N이 증가하는 것으로 나타났다. 이럴 경우 탈질조에서 시료를 채취하여 정치시켜 두고 관찰한다. 슬러부상이 일어나는지를 보고 슬러지에 탈질균이 존재하는지 여부를 판단한다. 사진-1에서처럼 슬러지가 부상되면 탈질균이 있다는 증거이고 또 현재 탈질조에 NO₃-N이 높다는 증거가 되기도 한다. 그러므로 탈질조 시료를 정치시켜 두었을 때 슬러지부상이 잘 일어나면 방류수의 T-N이 높을 수 있다.



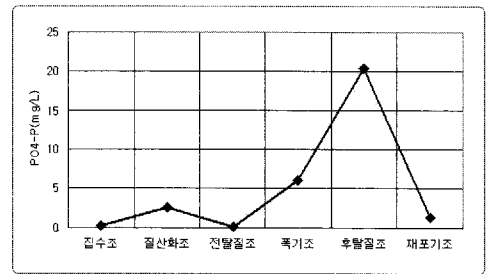
〈사진-1〉 탈질조 슬러지의 부상, 탈질균이 있고 NO₃-N이 높다는 증거

표-1. 처리공정별 수질(농수산물시장)

구분	유입수	무산소조	폭기조-1	폭기조-3	침전조
SS	600		1,480	1,500	193
S-COD _{Cr}	480	345	345	270	280
NH ₃ -N	94	91	102	99	95
PO ₄ -P	10.5	10.8	12.7	12.9	11.6

슬러지해체가 일어나고 1개월이 지난 농수산물시장의 수질을 표-1에서 살펴본다. 이 처리장은

고도처리장으로서 무산소조 앞에 혐기조가 있다. 먼저 폭기조의 MLSS가 높지 않다. MLSS를 높일려고 하여도 슬러지플러의 형성이 잘 되지 않아 많은 양의 SS가 방류수를 통해 유출되고 있다(침전조상등액의 SS가 190mg/L이상). 폭기조에 MLSS가 낮으니 COD_{Cr}의 제거율도 낮고 질산화를 기대하기도 어렵다. 따라서 유입 NH₃-N과 유출NH₃-N이 비슷하다. 그리고 슬러지가 생성되고 P함유량이 높은 슬러지를 인발해주므로서 PO₄-P가 감소할텐데 P과잉흡수(luxury uptake)가 일어나지 않으므로 유입P보다 유출P가 더 높게 나타나고 있다. 그리하여 슬러지 해체 후 아직 정상회복이 이루어지지 않아 COD제거뿐 아니라 고도처리장임에도 N, P제거가 거의 일어나지 않고 있다.

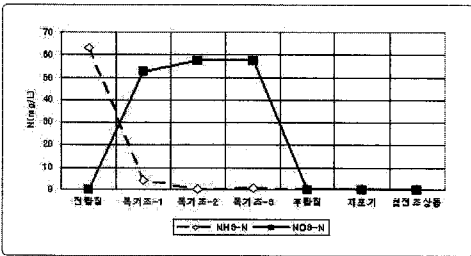


〈그림-8〉 후탈질조내 PO₄-P(화학폐수)

그림-8의 PO₄-P그래프를 보면 후탈질조에서 PO₄-P가 크게 상승하였다. 이 화학폐수 유입수에는 BOD도 거의 없고 NH₃-N도 거의 없다. 따라서 탈질이 가장 중요한 반응인데 탈질반응에 필요한 BOD원을 전적으로메탄올에 의존하고 있다. 따라서 전탈질조에서의 탈질율을 메탄올 주입량으로 조절이 가능하다. 후탈질조에서 PO₄-P가 그림-8에서처럼 크게 증가함은 혐기 조건에서 P용출이 일어났기 때문이다. 즉 후탈질조가 혐기조로 되었기 때문이다. 즉 후탈질조에 탈질반응에 사용될 NO₃-N이 전혀 없다는 이야기이다. 뿐만 아니라 전자수용체로 사용될 다른 결합형산소도 없다는 것이다. 후탈질조 다음의 재포기조에서 P는 재흡수되어 물에서 제거되었지만 혐기조건은 탈질균에도 바람직하지 못하다. 그러므로 전탈질조에서 80~90%정도의 NO₃-N을

제거시켜 주고 일부를 남겨 후탈질조에서 완전히 제거시키는 방법이 요구된다. 그리하여 유입 NO₃-N의 정확한 모니터링이 매우 중요하다.

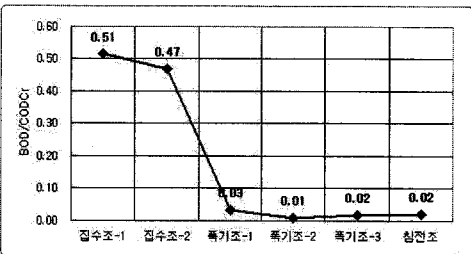
그림-9에 가장 이상적인 NO₃-N제거를 볼 수 있다. 유입 T-N이 900mg/L이상인 폐수가 전탈질조에서 NO₃-N은 0, NH₃-N이 60mg/L을 약간 상회하는 정도로 처리가 된다. 이어지는 폭기조에서 질산화가 이루어지고 생성된 60mg/L정도의 NO₃-N이 후탈질조에서 탈질되어 제거된다. 물론 전탈질조에서의 BOD원은 공장에서 배출되는 폐수이고 후탈질조에서의 BOD원은 전부 매탄올이다. 후탈질조에서의 완전한 탈질로 인하여 방류수의 T-N을 2~3mg/L 이하로 유지할 수 있다.



〈그림-9〉 전탈질, 후탈질이 있는 고도처리장에서의 NO₃-N제거(벽지)

9-5. 기타 진단

그림-10에서 보면 폐수의 BOD/COD_{Cr}가 처리 과정에서 크게 변화됨을 볼 수 있다. 집수조의 폐수는 BOD/COD_{Cr}이 0.5 안팎인데 폭기조-1에서 0.03으로 크게 감소된다. 즉 폭기조-1에서 BOD성분이 거의 제거됨을 볼 수 있다. 폭기조-2에서는 더 감소하여 0.01로 되었다가 폭기조-3에서 약간 상승하는 경향을 보이고 있다.



〈그림-10〉 처리과정에 따른 BOD/COD_{Cr} 변화(화확폐수)

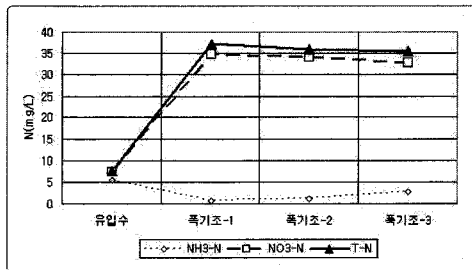
공장 중에는 토요일과 일요일에 생산이 없어 폐수가 발생되지 않는 곳도 있다. 그림-11에서 보면 유입수에는 T-N이 10mg/L미만인데 폭기조에는 T-N이 약 35mg/L정도 있다. 이것은 폐수를 통해 증가한 것이 아니고 N원으로서 요소를 외부에서 공급해준 때문이다.

이 공장은 토, 일요일에 폐수유입이 크게 감소하므로 BOD공급이 크게 감소하게 된다. 그러나 토, 일요일에도 폭기는 어느정도 유지되므로 폭기조에서 질산화가 일어난다.

물론 토, 일요일에 요소를 공급해주진 않지만 이미 넣어준 요소가 분해되어 NH₃-N로 되고 NH₃-N은 다시 NO₃-N으로 바뀐다. 그래서 월요일 아침 아직 폐수가 유입되기 전에 조사된 결과는 폭기조에 있는 T-N의 거의 전부가 NO₃-N형태로 존재함을 그림-11에서 볼 수 있다. 그리하여 폐수유입이 적은 토, 일요일에 침전조에서 탈질이 일어나 슬러지가 부상되는 이상 현상이 일어난다.

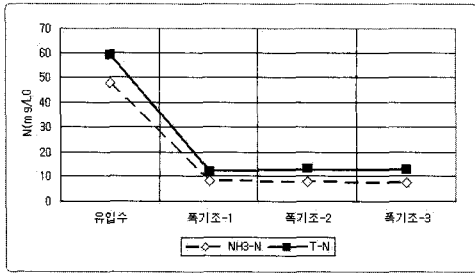
반면에 NH₃-N은 매우 낮음을 그림-11에서 역시 볼 수 있다. 그리하여 월요일에 폐수가 정상적인 유량으로 유입될 때에는 폭기조에 NH₃-N은 거의 없다.

결국 미생물 균체합성에 이용되는 NH₃-N이 부족되어 N결핍이 일어난다. 그리하여 짧은 기간이지만 N결핍이 별킹의 한 요인으로 작용될 수도 있다.



〈그림-11〉 폭기조의 N종류(음료, 월요일 아침)

그러나 폐수가 정상적으로 배출되는 월~금요일 기간에는 폭기조의 T-N은 거의 NH₃-N형태로 존재함을 그림-12에서 볼 수 있다.

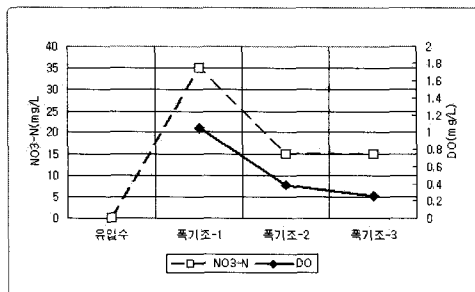


〈그림-12〉 폭기조 N종류(음료, 금요일)

그림-13에 폭기조별 DO를 그려보았다. 폐수 처리장에서 폭기를 아무리 하여도 폭기조DO가 올라가지 않는다고 말하는 곳이 종종 있었다. 그럴 때마다 제일 먼저 폭기조에서 질산화가 일어나는가를 조사한다.

그림-13에 폭기조 DO가 1mg/L이다. 그리고 폭기조 후단으로 갈수록 DO가 오히려 저하된다. BOD는 폭기조 후단으로 갈수록 제거되어 농도가 낮아지므로 폭기조 후단으로 갈수록 DO는 올라가기 쉽다. BOD 1mg보다도 NH₃-N 1mg 질산화에 산소소모가 3.6배 더 많이 소모된다. 그러므로 폭기조에서 질산화가 일어나면 산소 소모가 많아지게 되어 DO를 높게 유지하기가 어렵다. 특히 고도처리시설이 없는 처리장이 더 현저하게 나타난다.

그림-13에서 유입수에는 없던 NO₃-N이 폭기조-1에서 35mg/L나 나타나는 것으로 봐서 폭기조에서 질산화가 일어나고 있음을 알 수 있다. 이런 경우에는 폭기량을 줄여 질산화가 일어나지 않게 하면 오히려 DO가 올라가게 된다. F/M이 매우 낮고 SRT가 아주 긴 처리장에서 볼 수 있는 현상이다.



〈그림-13〉 폭기조별 DO(조마료)

9-6. 결론

폐수처리시설의 공정별로 또는 처리과정별로 수질을 조사하므로써 여러 가지 정보를 얻을 수 있고 그 정보를 바탕으로 진단도 가능하다. 조사가 그렇게 어려운 것은 아니고 단지 시료의 건수가 조금 많다는 것뿐이다. 그러나 이런 조사를 통해 우리가 처리장 진단을 할 수 있으므로 아주 요긴한 방법이다.

조사항목으로는 유기물질(BOD, COD_{Cr}, COD_{Mn}, TOC), N(NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N, T-N), P(PO₄-P, T-P), TDS 등, 그리고 환경조건(pH, DO 등)이 있다.

이렇게 처리시설 공정별로 수질을 조사하므로써 현재 문제가 되고 있는 공정이 어느 것인지, 현재 일어나고 있는 또는 앞으로 일어날 트러블이 어떤 것인지를 알 수 있어 처방과 예방이 가능하다.

현장에서 많은 이용과 응용이 이루어지기를 바라는 마음이다.

다음호에 계속 ...