자율적 환경관리를 위한 환경경영기술 (7)

서울시 수도기술연구소 기술개발부장 이규성 박사

7. SAR법에 의한 고도처리

① 개요

고도처리기술은 폐 · 하수, 분뇨, 오수 및 축산 폐수로부터 생물학적 처리에 의해서 미처리된 유기물질, 질소와 인을 제거하기 위한 3차 처리 공법이다. 이러한 고도처리기술 가운데 하나가 SBR(Sequencing Batch Reactor) 공법이다. 1914년 Arden과 Locket에 의해서 개발된 fill and draw 방식으로서 최초 생물학적 영양성분 제거 공정이 효시이었다.

이와 같은 활성오니법은 초기에는 회분식이었으나 점차 자동벨브 시스템, 전기적 타이머, 수위 조절장치 등 계장설비가 날로 발달해 연속 흐름식으로 변화하였다. 대표적인 하수처리 방법은 생물학적 처리이며, 주로 표준 활성오니법을 의미하지만 최근 들어 SBR 등 변형된 처리공정이 점차 개발되는 추세에 있다.

SBR공법은 하나의 반응조내에서 5단계 작업인 하수의 유입(fall), 반응(reaction), 침전(setting), 처리수의 배출(draw)과 휴지(idle)단계가 한 주기(cycle)로 연속적으로 이루어진 경제적인 공법이다. 하수의 고도처리공점 중 SBR공법은 저비용 · 고효율의 최적화 공법이며, 유지관리가 용이하고 유입하수 농도의 첨두율이 클지라도 쉽게 한 주기 내에서 5개 공정별 배분시간을 조절해 다양한 운전이 가능하다.

환경부는 "물 관리 종합대책과 상수 원수계 수질관리 특별대책"에서 총 인 2mg/L와 총 질소 20mg/L이하로 고도 처리시설에 의한 실계 방류수 수질 기준을 제시하였다.

고도처리 공정 도입시 기존 방법과 차별화된 연속 회분식 활성오니공법(SBR)으로 하수처리에 적합한 운전모드 개발을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 이유는 자동제어 시스템의 급격한 발달로 각종 우수한 센서가 개발되면서 연속회분식 흐름이 가능하여졌으며 24시간 인위적인 관리를 위한 기계와 전기의 컴퓨터를 이용한 자동화 운영이 가능하게 되었기 때문이다. 이제는 회분식도 연속흐름의 표준 활성오니법

과 동일한 처리 효율을 얻을 수 있도록 SBR반응조로 활성오니조(또는 포기조)와 침전조의 기능을 갖춘 시간적 공정개념으로 연계시켜, 질소, 인 제거를 위한 고도처리기술(advanced treatment technolgy)을 선택할 필요가 있으며, 이를 위해서는 사전에 모형장치(pilot plant)등의 예비실험을 통해 최적 처리공정을 위한 인자를 도출하고, 실제 고도처리 공정의 확대 응용이 중요하다 하겠다.

우리나라의 상수원은 하천을 막아서 만든 다목적 댐으로 조성된 인공호수로 주변에서 유입되는 생활하수, 축산폐수, 산업폐수 등에서 처리되지 않은 질소와 인의 영양분으로 인하여 일반적으로 부영양화가 진행중인 상태에 있다.

폐·하수중에 함유된 유기물을 생물학적으로 제거하는 활성오니법은 1914년에 세계 최초로 개발된 유입과 배출공정인 회분식이었다. 점차 회분식 처리시는 오염부하에 따른 조절과 제어 등이 어려워서 중단했다가 최근들어 벌킹(bulking)이 없고, 운전이 간단한 연속식으로 개조되어 500~2000m^3/day의 중·소규모 수처리에 적용되고 있다.

SBR은 초기에 하나의 반응조에서 유입, 반응, 침전과 배출과정이 반복되는 공정으로 회분식, 연속식(semi-continuous). 주기식(cyclic)등의 다양한 명칭을 붙였으나 1970년대 들어 Irvint에 의해서 최초로 불리워졌다. SBR은 하수속에 함유된 유기물질외에도 부영양화 물질인 무기물의 질소와 인을 모드의 저정만으로 운영할 수 있는 공정으로 유기물질 제거는 유입과정(fill process)에서 호기성 종속영양균, 탈질균, 질산하균과 인제거균 등에 의한 호기성 뿐만 아니라 혐기성 조건에서 탈질과 인방출이 동시에 일어나면서 제어된다.

왜냐하면 유기물질은 혐기의 탈질반응과 인 제거시 미생물의 인방출 과정에서 반드시 필요한 영양분으로 적당량이 제공되면서 제어되기 때문에 유기물질 농도는 한주기 동안 혐기성 조건에서 탈질과 인방출에 따른 유기물 섭취에 의한 제거율은 아주 적은 양이고, 호기성 조건에서 70%정도로 분해성이 높으나 다시 제2호기 조건에서는 유기물 제거율이 아주 낮아지게 된다. 특히 종속영양균(heterotropes)에 의해 유기물질 제거시 탈질균과 인제거균에 의해 유기물 제거효율이 저온에서 별 차이가 없이 일어난다.

② 생물학적 질소 제거

폐·하수속에 함유된 질소의 제거방법에는 물리적, 화학적, 생물학적, 공정 등 다양하지만 가장 경제적인 공정이 생물학적 처리이며, 주로 미생물의 세포합성에 필요한 질소를 제거되거나 산화 반응인 탈진화나 환원반응인 탈진 반응에 의해서 제어된다.

폐·하수에 유입된 질소는 암모니아(NH_3)와 같은 무기물 형태와 단백질(prtein), 요소[$(NH_2)_2CO$] 등과 같은 유기물질 형태로 존재한다. 생물학적 질소 미생물의 생물학적 동화작용(bacenal assimilation)과 질산화(nitnification)나 탈산화(denitrication)과정에서 유기질소가 질소가스(N_2)로 변화하는 생물학적 이화작용으로 이루어진다. 생물학적 동화작용은 암모니아가 박테리아($C_5H_2NO_2$)의 성장에 필요한 필수 영양소로 소모되며, 미생물에 의한 암모니아의 제거 속도는 미생물의 제거 속도에 비례한다.

$$\frac{dNH_3-N}{dt} = -\frac{0.125dx}{dt} \qquad (1)$$

여기서, dNH_3-N/dt는 질소 제거율이고, dx/dt는 활성오니의 생성물이다. 따라서 미생물의 증식 속도는 필수 영양소인 탄소원 양 즉, BOD 부하량에 의해서 결정되는 것이다.

$$\frac{dNH_3-N/dt}{dBOD/dt} = -\frac{0.125dx/dt}{dBOD/dt} \qquad (2)$$

따라서 정확히 활성오니로의 미생물(X:MLVSS)의 증식 계수(g-MLVSS/g-BOD)는 이론적으로 0.6으로 유입 하수속에 함유된 탄소원 양의 7.5%에 해당하는 암모니아성 질소(NH_3-N)가 활성오니에 의해서 제거된다. 만일 F/M비를 0.1Kg-BOD/day · Kg-MLVSS로 운전하면 NH_3-N/BOD는 0.018로서 활성오니와 동화작용에 의한 BOD 제거율은 2~2.5%가 된다. 한편 생물학적 이화작용은 질산화와 관련한 주세균속이 bacteria, nitrosomonas, nitrobcter인 자가영양균(autotrophic organism)으로 무기 질소 화합물을 산화하여 필요한 에너지를 얻고 하수속의 유기탄소인 BOD를 분해하여 CO_2를 이용해서 박테리아 성장에 필요한 비세포 성분을 얻어 합성하게 된다.

(가) 에너지 질산화 반응 1단계(nitrosomonas 세균)

$2NH_4^+ 3O_2 \rightarrow 2H_2O + 2NO_2^- + 4H^+ +$ 새로운 세포 ---- (3)

(나) 에너지 질산화 반응 2단계(nitrobacter 세균)

$2NO_2 + O_2 \rightarrow 2NO_2 +$ 새로운세포 ------------- (4)

(다)총괄 에너지질산화 반응단계

$NH_4^+ + 1.83O_2 + 1.98HCO_3 \rightarrow 0.98NO_3 + 1.04H_2O + 1.88H_2CO_3$ --(5)

상기 1단계 질산화 반응의 우점균 박테리아는 nitrosomonas이고 2단계 질산화 반응은 nitrosomonas가 lmole의 암모니아(NH_4)를 산화시 58~84Kcal이며, nitrobacter가 lmole의 아질산염(NO_2)산화시 15.4~20.9Kcal가 방출된다. 그리고 세포 합성증식 계수는 NH_3-Ng을 산화시 nitrosomonas 세균은 0.05~0.29g의 세포가 합성되며, nitrobacter세균은 0.02~0.08g을 합성한다.

질산화의 영양인자는 알칼리도, pH, DO, 온도, BOD/TKN비와 SRT이며, 억제인자는 중금속과 독성물질이다. 상기 총괄에너지 질산화 반응단계에서처럼 질산화 암모늄(NH_4)이 산화시 알칼리도가 소모해 H_2CO_3가 생성되어 pH가 감소되는데 이는 NH_3-N-1mg당 7.14mg의 알칼리도가 소모되는 바 NaOH 주입해서 알칼리도 150mg/L정도로 높이고 pH를 7.1~8.9 범위로 유지한다.

용존산소는 호기성 생물학적 활성오니법에서 질산화 세균 성장률과 질산화율 증가에 중요한 영향인자이며 MLDO(Mixed Liquor Dissolved Oxygcn)농도가 0.5mg/L 이상에서 질산화 세균에 의한 질산화가 일어나는데 반드시 DO농도가 2mg/L 이상이 되어야 한다. 폐 · 하수의 온도는 질산화 세균을 위해 40~45℃(최적온도는 10~33℃)범위 이어야 하며, 질산화율은 온도 변화에 아주 민감하다. 유입 하수속의 BOD/TKN비는 다시 말하면 탄소와 NH_4^+이며, 질산화 능력인 질산화균의 성장률을 지배하며 BOD/TKN비가 0.5일 때 질산화율은 35%, 1일 때 21%와 2일 때 12%정도로 낮아진다. 일본 하수도 사업단의 보고서에서는 BOD/N비가 낮은 경우에 질산화가 잘 이루어 진다고 했다.(그리고 Arora 등은 단일 활성오니반응조의 고형물 처리시간(SRT : Solid Residence Time)을 5~10일 이상이고, DO 2mg/L 이상일 때 질산화 억제 인자는 산업 폐수 속에 함유된 독성 중금속 유입이나 고농도의 암모늄(NH_4)의 유입이다. 특히 Zn, Cu, Hg, Cr, Ni, Pb 등 중금속은 pH 감소시 침전물이 다시 용해되면 질산화세균에 독성을 일으킨다. 탈질산화(denitrification)는 무산소 상태에서 micrococcus, pseudimimnas, achromobacter 등 생물학적 종속 영양 세균이 질산화 과정에서 생성된 질소 산화물을 전자 수용체로 기능을 발휘하여 질소가스로 판원시키는 반응이다.

(가) 에너지 탈진산화 반응 1단계

$NO_3^- + 0.33CH_3CH \rightarrow 0.07H_2O + NO_2^-$ ----------(6)

(나)에너지 탈진산화 반응 2단계

$NO_2^- + 0.5CH_3OH \rightarrow 0.5H_2O + 0.5N_2 + 0.5CO_2 + OH^-$ -------(7)

(다)총괄에너지 탈진산화 반응

$NO^-_3 + 0.833CH_3OH \rightarrow 1.167H_2O + 0.833CO_2 + 0.5N_2 + OH^-$ --(8)

상기 반응 메카니즘에서 탈진 세균에 의해 질산 과정 중 생성된 질산성 질소(NO_3-N)가 전자수용체로 되어 아질산성 질소(NO_2-N)로 환원되고, 다시 NO_2는 N_2로 방출되면서 미생물의 이화작용이 일어나면서 에너지 생성량은 570Kcal 이다. 탈질화 영영인자는 유기물질, 알칼리도, pH, DO, 온도이다. 탈질산화시 탄소원은 메탄올(CH_3OH)이며, 미생물이 세포 합성이 1mg 의 NH_4에 CH_3OH는 2.47mg 이 필요하다.

알칼리도는 1mg의 N_2 가스생성시 3.57mg-$CaCO_3$가 생성되며 pH의 상승으로 H_2SO_4를 주입하여야 한다. DO는 탈질산화시 0.3~1.5mg/L이하 범위이어서 유리 산소가 없는 무산소의 혐기 상태이어야 미생물이 NO_3-N의 산소이온을 활용하게 된다. 폐 · 하수의 온도는 20~30℃이며 유기물(COD)과 질산성질소(NO_3-N)의 값이 3일 때 탈질균 성장과 탈질산화율이 증가하게 된다.[20,23]

③ 생물학적 인 제거

유입 하수속의 생물학적 총 인(T-P)은 주로 농경지에서 유입된 비료잔류 성분이 강우에 씻겨 지표수에 함유된 ortho-phosphate와 가정의 세제가 생활 오수속에 섞여 나온 condensed phosphate 이며, 물에 용해되면 용해성 인(soluble phosphate), 용해되지 않으면 불용해성 인 (soluble phosphate)이라고 하고 어느 구조체에 인(I2)이 함유되있는가에 따라 유기인(organic phosphate) 및 무기인(inorganic phosphate)이라고 한다. 주로 폐 · 하수 속에는 30%가 유기인 형태이고 70%가 무기인 형태이며, 무기인은 PO_4^{3-}의 ortho-phosphate는 화학적 반응으로 침전 및 착화합물을 형성하거나 생물학적으로 생물과 미생물의 신진대사에 활용된 반응성인이다. 특히 인은 미생물의 성장에 필요한 영양소로 흡수해서 제기되거나 혐기성 조건에서 증가하다가 호기성 조건으로 변화시킬 때 미생물에 의한 균체 증식과 폴리인산 축적으로 인의 과잉섭취(luxury uptake)를 유도해서 제거할 수가 있다.(Fig. 1 참조)인의 제거에 관여하는 bacteria는 qeromonas, pseudomonas, aeinerobater 등이고, 이들 미생물은 균체내에 폴리인산을 축적해 인을 제거하며, 유기물질을 섭취해 (PHB
(Poly-β-Hydroxy Butyrate)등의 물질 축적시 필요하 에너지원으로 사용되어 폴리인산의 가수분해시 이용하게 된다.

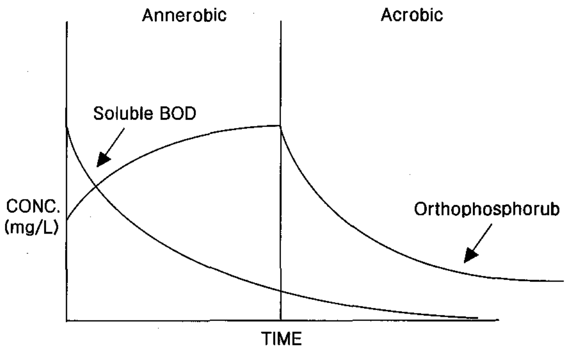

Fig 1. Relationship between soluble-BOD and soluble-phosphate

Fig. 1에서와 같이 DO가 존재 않은 혐기성 조건에서는 SBOD를 미생물체내에 저장하여 감소한다.

ortho-phosphate 는 외부로 방출해 인의 농도가 증가하다가 호기성 조건에서는 제거된다.

인제거에 영향을 주는 인자는 유입하수의 특성 중 DO, 온도, pH, SRT 등이다. 하수내 DO는 1.5~3mg/L이어야 하며, 온도는 10~30℃이고, pH는 7~8.5이고 초기 SBOD농도가 늘고 NO^{3-}N 농도가 낮으면 인 방출량이 많아지게 된다.

일반적으로 고도처리공법의 평가기준은 처리성능의

안전성, 유지관리의 용이성, 슬러지의 발생량, 경제성, 시설부지 등 여러 환경 영향에 따른 제반 여건을 고려하여 선정되어야 한다.

따라서 영양염류의 제거를 고려한 생물학적 질소, 인 동시제거를 위한 유사공법인 Phased Isolation Ditch Process(PID공법), Daewoo Nutrient Removal(DNR공법), B_3공법을 SBR공법과 기술적, 경제적인 면에서 비교하여 Table 2 와 Table 3에 수록하였다.

Table 2에서 SBR 공법은 운전 조건이 유사공법인 PID, DNR, B_3공법보다 중요한 특징으로 F/M비가 0.01～0.3kg-BOD/kg · MLSS로 낮으며, 활성오니(MLSS)가 DNR과는 동일하나 PID와 B_3 공법보다 낮아 BOD 농도가 낮은 하수에서만 제거율이 BOD와 SS는 85.0～95.0%T-N 75.0%이상, T-P 50.0～70.0% 정도이다.

Table 3에서 나타나듯이 유사공법에 비해 표준활성오니법 및 SBR공법이 공사비 및 유지 관리면에서 가장 저렴한 것으로 나타났으나,

표준활성오니 공법은 T-N, T-P 등의 고도처리에

Table 2. Comparision of SBR process with similar process

항 목		PID공법	DNR공법	B_3공법	SER공법
설계기준	F/M (kgBOD/kgMLSS)	0.04~0.06	0.1~0.3	0.05~0.45	0.01~0.3
	MLSS(mg/L)	3000~5000	2000~4000	2500~5000	2000~4000
	SRT(day)	12~18	5~12	20~30	20~30
	내부순환	-	100	100~300	-
	HRT(hr)	12~18	6~8	24~27	4~12
제거율	BOD(%)	90~95	90	95~98	85~95
	SS(%)	85~95	80~90	80~90	85~95
	T-N(%)	80내외	70~80	90~95	75이상
	T-P(%)	70내외	70~80	70~80	50~70
유지관리		-시간별 제어로 PLC 필요함 -회전부터 수입으로 보수의 어려움.	-보조기가 많아 점검수가 많음.	-바이러스균으로 무점 배양에 어려움	-시설이 간단해 운전이 쉽다. -기기가 적어 점검이 간단함.

Table 3. Cost evalution of sewage treatment process

구 분	표준활성오니법	PID 공법	DNR 공법	B_3	SBR 공법
① 처리장 공사비	13,252 (100%)	14,580 (110%)	15,900 (120%)	15,240 (115%)	12,865 (97%)
토목, 건축공사	8,350 (63%)	10,206 (70%)	9,540 (60%)	9,906 (65%)	6,090 (47%)
기계, 배관공사	4,902 (37%)	4,374 (30%)	6,360 (40%)	5,334 (35%)	6,775 (53%)
② 유지관리비 (年)	607 (100%)	668 (110%)	728 (120%)	698 (115%)	517 (85%)

[주] 1) 타 공법은 표준활성오니법 기준으로 산출하였음.
2) 처리용량은 : 5,000m^3/day 기준임

적합하지 않은 공법인 반면에 SBR 공법은 같은 공사비에서 고도처리가 가능한 경제적인 공법이라 할 수 있다. SBR 공법중에서도 선회와류식 SBR 공법은 핵심기술인 산소 공급장치가 월등하고 다목적 기능을 수행하는데 적합하나, 또한 유사공법의 경우 수중 믹서가 설치되어 있어 송풍시설 및 산기관장치가 있어 유지관리가 어려운 반면 본 공법은 설치가 간단하고 유지관리가 용하여 경제적이라 할수 있다. 따라서 폐 · 하수의 처리공정 중 저비용 · 고효율의 최적화 공법이라 사료된다.

다음호에 계속…