

# 국내 하수특성에 적합한 생물학적 질소·인 제거기술



박철휘, 이의신, 장운석, 박명균, 허용득  
(주)대우 건설기술연구소 환경연구실

## 1. 서 언

최근의 경제발전에 따른 공업화 및 도시화는 산업 폐수, 생활하수 등의 급속한 증가를 가져왔으며 이들 오폐수에 의해 국내 주요 상수원인 팔당호를 비롯한 전국의 주요 7개 호소 및 3급 상수원으로 분류되는 호소들이 오염되고 있으며, 그로 인해 물 이용면에서 여러 가지 장애가 나타나고 있으며 특히 해마다 반복되는 수돗물 파동으로 인하여 상수원의 수질보전이 사회문제화되고 있어 부영양화의 제어대책이 시급한 실정이다.

따라서, 정부에서는 89년 1월에 상수원보전을 위해 호소의 수질관리 목적으로 부영양화의 원인물질인 질소와 인의 항목이 추가된 호소 수질환경기준을 제정하여, 1999년까지 수질환경 기준목표치를 총 질소 0.3 mg/L, 총 인 0.02 mg/L로 설정하였다. 따라서 이들 호소들에 근접한 지역의 오·폐수처리장에서 배출되어 호소로 유입되는 오·폐수 중의 영양물질 함유량을 저감시키기 위해 이들 처리장의 배출허용기준도 호소의 수질상태에 따라 결정될 것으로 예상된다.

선진외국에서는 하수의 질소와 인을 제거하기 위하여 이미 십여년전부터 A/O, A<sup>2</sup>/O, UCT, MUCT, VIP 등의 각종 공법들을 개발하여 실운전중인 공정도 다수에 이르고 있으며, 국내에서도 이 공정을 도입하여 설계에 반영하려는 움직임도 보이고 있다. 그러나 선진 외국의 공법은 국내의 하수성상에 맞지 않아 우리의 실정에 맞는 공법의 개발이 절실하다 할 수 있다.

한편 국내의 질소, 인 제거 기술연구는 실험실규모에 국한되어 왔고, 기술수준 또한 현장에 적용 가능한 기술이 아닌 기초기술로서 많은 문제점을 안고 있다. 당 연구소에서는 국내 실정에 맞고 기존의 외국기술에 비해 처리효율이 우수하고 경제적인 생물학적 영양물질 제거시스템을 개발하는 것을 목표로 현재 기존 하수처리방식의 대부분을 구성하는 표준활성슬러지법을 크게 변형시키지 않고 생물학적으로 질소 및 인을 동시에 제거 가능한 공정의 개발을 위해 실제 하수처리장의 1차침전지 유출수를 대상으로 대우건설 기술연구소에서 개발한 DNR(Daewoo Nutrient Removal)system을 이용하여 습득한 질소 및 인의 제거특성 및 영향인자 등에 관한 지견을 소개하고자 한다.

표 2.1 국내하수처리장의 시설현황

구분	구분	개소	유량	유량%	하수배제방식	구분	개소	유량	
	규모별	100만 이상	2	206.0		41.0	하수배제방식	합류식	19
	100-50만	2	100.0	19.1	분류식				
	50-10만	9	167.5	33.3					
	10만 이하	9	29.1	5.8		3		17.6	
처리방식	구분		개소	유량	유량%				
	1차 처리만 적용한 경우		4	172.1	34.2				
	2차 처리	활성오니법	16	327.9	65.2				
		기타	2	2.6	0.52				

## 2. 기존 하수처리장의 현황 및 하수성상

우리나라의 하수처리장은 1979년 최초의 도시하수처리장인 청계 하수처리장이 건설된 이래 현재 전국에 30여개 하수처리장이 운전되고 있다. 이와 같은 국내 하수처리장의 시설현황을 표 2.1과 같이 나타내었는데 먼저 시설규모면에서 고려할 때 전체 하수처리장의 70% 이상이 75,000m<sup>3</sup>/d 이상의 대규모 처리시설로써 운전관리상에 문제가 발생할 경우 중, 소규모에 비해 해결방안이 용이치 않은 단점이 있다. 한편 하수배제방식의 경우 3 - 4 개 하수처리장을 제외하곤 대부분 합류식 하수배제방식에 의해 하수가 처리장으로 유입되므로 강우가 많이 발생하는 우기에는 유량증가로 인해 효율이 저하되며 비강우시 지하수 등에 의한 희석과 적정 유속의 미확보로 관내 침전이 이루어지는 문제점이 발생하고 있었다.

한편, 하수처리장의 수처리계통에서의 처리효율을 검토하기 위해 수도권 지역의 하수처리장을 대상으로 유기물질과 영양소의 처리효율을 알아보았다. 그림 2.1 과 그림 2.2는 처리단계별 농도변화로써, 유기물질의 경우 BOD 25mg/l, SS 30mg/l의 처리수가 방류되고 있으며 질소와 인의 경우는 거의 제거되지 않고 방류되는 것을 볼 수 있다.

이와 같이 수처리계통에서의 낮은 제거효율의 원인

은 먼저 유입하수의 농도가 외국에 비하여 매우 낮은 것이고 또한 처리공정내의 슬러지 반송수의 유기물 및 영양소 농도가 매우 높아 운전상의 문제점을

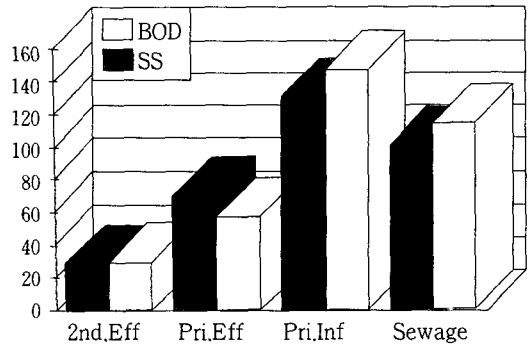


그림 2.1 국내 하수처리장의 처리단계별 유기물질의 농도변화

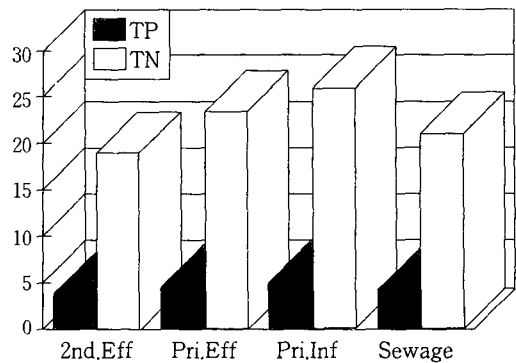


그림 2.2 국내 하수처리장의 처리단계별 영양물질의 농도변화

# 기획시리즈 - 1

유발하고 있어 실제 처리장에서 질산화가 잘 일어나지 않고 있으며, 기존의 2차처리 공정으로는 유기물질 뿐만 아니라 질소와 인과 같은 영양소의 제거가 어렵다는 점등이다. 따라서 우리나라의 경우 고도처리 공정의 선택시 특별한 주의가 요구될 것이다.

### 3. 영양물질 제거 기본 이론

#### 3.1 인 제거 이론

인은 생물학적 처리시 세포합성을 통해 유기물과 함께 제거가 가능하다. 미생물의 성장에 필요한 조건 (슬러지 구성성분) BOD:N:P = 100:5:1 에서 미생물내의 인 함량은 1~2%인데 일반 활성슬러지로 인을 제거하려는 경우 효율은 BOD/P비, SRT등에 따라 달라지나 일반적으로 20~30%정도인 것으로 알려져 있다.

인의 방출 및 섭취에 대한 반응역학적 해석은 여러 가지 나와 있으나 현재까지 밝혀진 바로는 혐기성상태에서 임의성미생물은 미생물에 의해 쉽게 분해되는 6 SCFA(short chain fatty acid)를 먹이로 acetate 및 기타 부산물을 생성한다. 인 제거 미생물은 이들을 세포내로 이동시켜 acetyl-CoA를 만들고 세포내의 enzyme-CoA 의 제한된 공급하에서 acetyl-CoA를 acetate로 만들고 이것을 PHB(Poly hydroxyle butyrate)로 전환시키며 이때 사용되는 에너지는 poly-p의 분해에 의해 공급된다. 호기성상태에서 PHB는 acetyl-CoA로 산화되어 미생물 성장을 위한 에너지원으로 사용되며 TCA cycle을 거치면서 bulk 상태의 인을 과잉 섭취하게 된다.(3) 그림 3.1에 인방출 및 인흡수 반응을 간단히 표현하였다.

한편, 생물학적 인 제거에 미치는 영향인자로는 유기물,고형물 체류시간,혐기조에서 nitrate,온도, pH, DO 등을 들 수 있는데 용존성 유기물의 경우 25mg/L 이상 이어야 되며 Maximum SRT는 8일, 온도는 5°C 이상, pH는 6.7~7.3 그리고 DO 농도는 20mg/L 이상 이어야 한다.

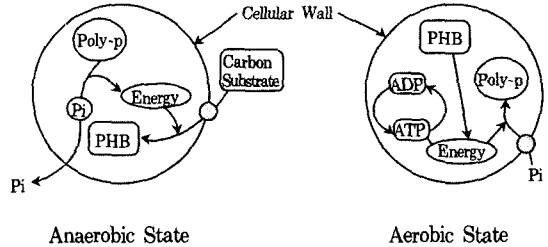
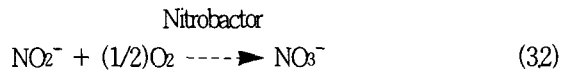
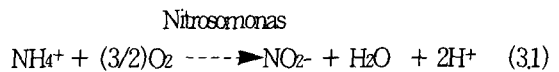


그림 3.1 인 방출 및 인 흡수과정의 모식도

#### 3.2 질소 제거 이론

자연계내에서 주목해야할 질소의 형태는 유기질소 무기질소 및 질소가스이다. 유기질소 화합물은 생물학적 분해에 의해 암모니아 형태로 전환되며 계속되는 호기성산화 과정에 의해 질산화가 일어나게 된다. 한편, 무산소나 혐기성환경에서는 heterotrophic metabolism에 의해 생화학적 탈질산화현상이 발생하게 된다. 질산화반응은 Nitrosomonas로 대표되는 암모니아 산화세균에 의한 아질산성 질소로의 산화단계와 연속되어 일어나는 Nitrobactor로 대표되는 아질산산화세균에 의한 질산성 질소로의 산화단계에 의해 완수되는데 이들 세균은 탄소원으로서는 이산화탄소를 이용하고, 수소공여체로서 암모니아성 질소 또는 아질산성 질소를 이용하는 호기성의 화학합성 무기산화 독립 영양성세균인 것이 특징이다. 이 질산화과정을 식으로 나타내면 다음과 같다.



이 식에 근거하면 1g의 암모니아성 질소가 아질산으로 산화될 때에 3.43g의 산소와 7.17g의 알카리도가 소비되며, 아질산이 질산으로 산화될 때에 1.14g의 산소

가 소비되거나 알카리도의 소비는 없다. 질산화 반응은 pH의 영향을 받으나 pH가 7~8의 범위에서는 질산화가 양호하게 진행된다. 질산화의 진행에 의해 알카리도가 소비되어 그 잔존량이 적게되면 pH가 저하하여 질산화가 저해된다. 따라서 하수의 암모니아성 질소를 생물학적 질산화로 처리하려는 경우에는 그 하수의 암모니아와 알카리도의 존재비에 유의하지 않으면 안된다. 하수의 암모니아성 질소가 30mg/L인 경우 암모니아성 질소 전부를 질산화해도 pH가 떨어지지 않기 위해서는 질산화 반응후 50mgCaCO<sub>3</sub>/L의 알카리도가 잔존하여야 하며 결국 하수중에 210mgCaCO<sub>3</sub>/L의 알카리도가 필요하게 되어 일반 하수의 경우 알카리도가 부족할 가능성이 농후하다.

한편, pH이외에 질산화반응에 크게 미치는 영향인자로는 암모니아성질소, 용존산소(DO) 와 온도를 들 수 있다(4). 질산화의 최적온도는 15°C 이하이며, 그 이상의 경우에는 방해작용을 받는다는 견해도 있다. 또한 용존산소는 질산화 미생물의 성장제한기질로서 작용하는데 이때 산소는 산화반응시에 사용되며 이론적인 NOD (Nitrogenous oxygen demand)는 4.57 mgO<sub>2</sub>/mgNH<sub>3</sub> 로 계산된다.(9) 한편, 질산화반응에 미치는 저해작용의 정도는 질산화미생물 이외에 경쟁 미생물의 존재, 저해물질의 농도, 저해기간, 저해작용에의 노출상황 및 다른 저해물질의 공존에 따라 영향을 받는 것으로 알려져 있다.(4) 용존산소는 탈질산화를 위해 필요한 전자전달체계의 절대적인 효소생산을 억제한다.

그러나 많은 연구자에 의하면 DO가 존재하는 상황에서도 탈질산화가 관찰되었음이 보고되었다. 이러한 호기성상태에서의 탈질산화의 발생은 bacteria floc의 중심부로 갈수록 DO 농도가 낮아져 거의 혐기성상태가 되는 oxygen gradient의 존재로 설명될 수 있다.(2) 이러한 현상은 질산화-탈질산화 공정에서 질소 제거의 효율을 촉진시키는 결과를 가져올 것이므로 가치있다고 볼 수 있다.

탈질산화반응은 알카리도가 생성되는 반응으로 질

산이 N<sub>2</sub> 가스로 탈질산화 될 때 탄산(carbonic acid)은 중탄산(bicarbonate)으로 전환된다. 알카리도의 생성량은 2.3~3.0mg as CaCO<sub>3</sub>/mgN reduced 범위에 있다.(8) 알카리도의 생성은 system의 pH를 높이거나 질산화와 복합된 system인 경우의 알카리도의 손실을 어느정도 상쇄시킬 수 있다. 탈질산화의 최적 pH는 존재하는 박테리아의 종류나 폐수내 성분에 따라 달라지지만 보통 pH 7~8사이에서 결정된다. 탈질산화는 여러 문헌에서 0~50 °C의 범위내에서 이루어진다고 보고 되었다. 온도는 미생물 성장속도와 질산성질소의 제거속도에 영향을 준다. 이 두 요소는 탈질산화 system의 설계시 반영되게 된다.

## 4. 실험 장치 및 방법

### 4.1 실험 장치

본 실험에 사용된 Pilot Plant 장치를 그림 4.1에 나타내었다.

다음의 그림에 나타난 것과 같이 본공정은 혐기성미생물을 보유하는 혐기조와 탈질미생물을 보유하는 무산소조 및 질산화 와 인흡수반응의 효율을 증진시키기 위한 Media를 충전한 호기조로 구성되어 있으며, Media내부에서의 탈질반응으로 내부반송시 무산소조로 이송되는 질산성 질소의 부하를 감소시켜 내부순환시설을 설치할 때 소요되는 펌프비용을 절감시킬 수 있는 효과가 있다.

반응조의 용량은 25m<sup>3</sup>(0.6m x 3.6m x 1.16m)로서 반응조의 수리학적 체류시간은 6hr, 일일 유입하수량은 10m<sup>3</sup>/d이고, F/M비는 0.1~0.25 kgBOD/m<sup>3</sup>·d가 되도록 하였다. 반응조는 하수와 미생물과의 혼합상태 및 반응조 상태를 육안으로 관찰하기 위하여 반응조 재질을 Acryl판으로 만들었다. 한편 질소와 인의 제거효율을 높이기 위해 고안된 media 충전부는 5cm x 5cm x 5cm 크기의 media를 반응조 420L 체적의 15%를 충전하였고, media는 polyurethane foam 형태로

# 기획시리즈 - 1

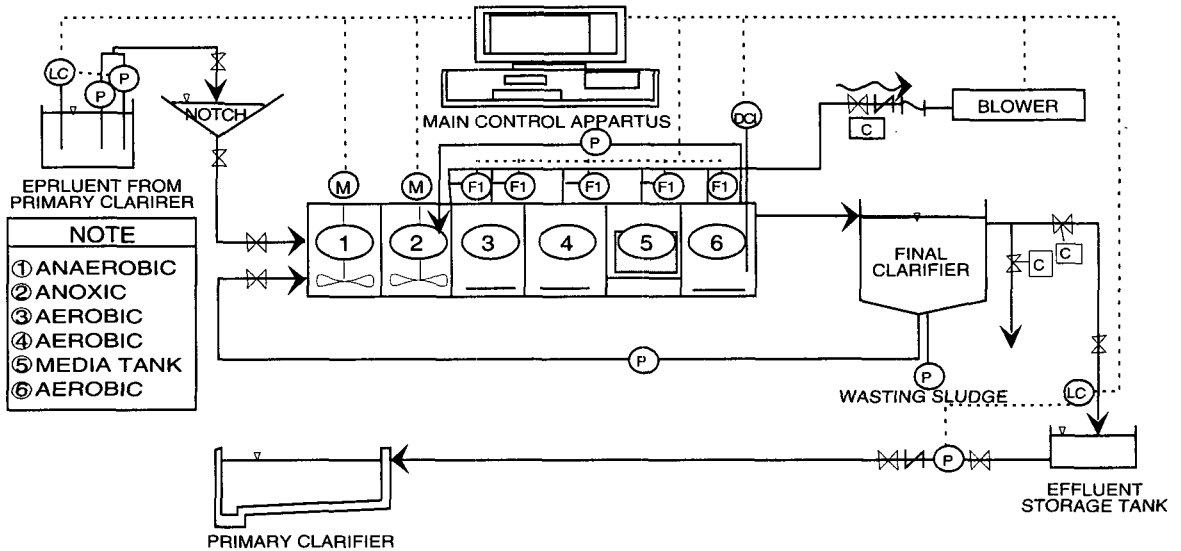


그림 4. 1DNR Pilot Plant의 처리흐름도

Porosity 98% 와 비표면적  $20\text{m}^2/\text{m}^3$ 의 제원을 갖는다. 또한 충전부에 들어있는 media가 좌우의 호기조로 유실되는 것을 막기 위해 screen을 유입부와 유출부에 각각 설치하였다.

## 4.2 운전방법

반응조(혐기조~호기조)에 실제 하수처리장의 반응수 및 폭기조의 sludge를 seeding한 후, 초기 start up 하기전 약 10일간의 적응기를 두고, HRT 20hr으로 운전을 시작하였고, BOD가 80%이상의 제거율을 보일 때 점차로 유입 하수량을 증가시켜 운전시작후 50일 이후부터 HRT 6hr으로 정상화 시켰다. 이용된 하수는 부천 소재 K 하수처리장의 1차침전지 유출수를 이용하여 pilot plant 실험을 수행하였는데 유입수의 성상분석 결과인 표 2를 근거로 유기물 부하를 운전조건에 따라 조절하였다. 혐기조와 무산소조에는 외부의 산소의 공급을 막고 미생물과 하수의 원활한 접촉을 위해 30rpm 이하의 Agitator를 설치하여 저속으로 교반을 시켜 주었다. 또한, 호기조에서 용존산소 DO를 실제 하수처리장의 폭기조 조건과 유사하게  $25\sim 35\text{mg/L}$  정도로 유지하였다.

Media 충전부에서 고농도의 미생물이 media내로 집

적시킬수 있고, media가 조바닥에 가라앉는 것을 막기 위하여 공기를 소량 공급하였다.

표 2. 유입수의 성상분석

항 목	농 도
pH	6.7 ~ 7.3
SS(mg/l)	90 ~ 120
BOD(mg/l)	80 ~ 110
TCOD(mg/l)	90 ~ 125
Ortho-P(mgP/l)	2.5 ~ 3.3
Total-P(mg/l)	4.0 ~ 5.1
Ammonia-N(maN/l)	20 ~ 25
TKN(mgN/l)	24 ~ 28
$\text{NO}_3^- \text{-N}$ (mgN/l)	ND

## 4.2 분석 방법

반응조 운전중의 분석항목은 pH, 부유물질농도(SS), 생물학적 산소요구량(BOD), 총 화학적 산소요구량(TCOD<sub>Cr</sub>), 용해성 화학적 산소요구량(S-COD<sub>Cr</sub>), 정인산(Ortho-P), 총인(T-P), 암모니아성 질소( $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ), TKN, 질산성 질소( $\text{NO}_3^- \text{-N}$ )등이다. 이상과 같은 분석 방법은 standard method를 기준하였다.<sup>(7)</sup> 시료의 수질 분석을 위하여 각 반응조 및 tank에 sampling port를 만들어 COD, SS는 매일 1회,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ , TKN,

PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P, T-P는 매주 2회씩 측정하였다.

## 5. 실험 결과 및 고찰

### 5.1 기존 영양물질 제거공정과의 비교 실험

#### 5.1.1 A/O 공정에 의한 고도처리

운전기간 동안의 유입수와 유출수의 BOD, COD<sub>Cr</sub>, SS에서 BOD는 75~115mg/L, COD 115~170mg/L SS 85~140mg/L로서 전형적인 국내 하수처리장의 1차처리수 농도분포를 나타내고 있으며, BOD 용적부하는 0.3~0.6 BOD/m<sup>3</sup>·d로 운전하였다.

유출수 수질은 BOD 10~20mg/L, COD<sub>Cr</sub> 17~35mg/L, SS 10~36mg/L로 처리효율은 75~90% 정도를 나타내었다. 한편, 유출수의 평균농도는 BOD 15mg/L, COD<sub>Cr</sub> 27mg/L, SS 17.7mg/L 등으로 1996년 이후의 방류수 수질기준농도는 만족시키고 있다.

유입수의 평균 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P는 2.6mg/L이고 처리수 평균 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P는 0.8~1.2mg/L를 나타내었다. 또한 실험결과, 유입수의 T-P는 40mg/L를 나타내었고 처리수의 T-P는 1.5~2.2mg/L 내외의 값을 보였다. 따라서 제거효율은 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P는 54~70% T-P는 45~63% 정도를 보이고 있다. 또한 질소의 평균농도에서 유입수 T-N은 22~28mg/L, TKN 20~26mg/L, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N은 15.5~22.0mg/L이었으며, 처리수내의 T-N은 17~21mg/L, TKN은 12~20mg/L, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N은 11.5~14.2mg/L를 보이고 있다.

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 제거율은 약 30% 정도이고, T-N 제거율은 약 20% 정도로 저조한 편이었다. 이는 일반적으로 A/O 공정자체가 질소제거를 위한 공정이 아닌 유기물과 인제거를 위한 공정으로 질소제거효율은 비교적 다른 고도처리 공정들에 비해 낮은 효율을 보이고 있는 것으로 나타났다.

표 3은 용해성 인(S-P)과 S-COD와의 관계를 보이고 있는것으로서 반응조내에서 용존성 인과 유기물과의 변화특성을 나타내고 있다.

혐기반응조에서 유입된 S-P의 2배가량의 인이 release

되고 있으며, S-COD 농도 또한 혐기반응시간중 유입수의 40%정도가 감소되는 것을 볼수 있었다. 또한 초기 반응조에서 인은 release된 인의 70~80% 정도가 uptake되고 있었고 이때 S-COD는 완만한 속도로 감소되는 것을 알 수 있었다. 유입수의 S-COD/S-P비에 따른 처리수의 S-P농도는 S-COD/S-P비가 20~30정도로 유지될 경우 처리수의 S-P농도는 1.0mg/L 정도였다.

Randall등에 의하면 생물학적 인 제거 공정에서는 COD/P비가 20이상에서 인 제거가 이루어 진다고 하였는데(15) 본 실험결과에 의하면 20~30 범위에서 처리수의 P농도가 1.5~2.3mg/L정도를 나타내고 있었다.

표 3. A/O 공에서 반응조별 SP와 SCOD관계

구분	SP	NP4-N	SCOD	SCOD <sub>rm</sub> /SP <sub>rl</sub> *	SCOD <sub>rm</sub> /SP <sub>rm</sub> **
유입수	2.6	20.9	유70		
AN1	3.8	18.4	57	16.3	
AN2	5.1	17.8	43	10.8	
OX1	4.2	17.1	34		10
OX2	2.8	16.2	27		5
OX3	2.1	15.2	18		12.9
OX4	1	14.3	16		1.8
유출수	1	14.3	15.8		

\*SP<sub>rl</sub> : SP released \*\*SP<sub>rm</sub> : SP removed

#### 5.1.2 A2/O 공정에 의한 고도처리

운전기간 동안의 유입수와 유출수의 BOD, COD<sub>Cr</sub>, SS에서 유입수는 BOD 80~110mg/L, COD 110~150mg/L, SS 90~125mg/L이고, 유출수의 BOD는 10~20mg/L, COD 14~35mg/L, SS 10~20mg/L 정도로 A/O 공정과 유사한 값을 보이고 있다. 전체 운전기간중 혐기조와 무산소조의 DO농도는 0.2mg/L 이하였고, 호기조의 경우 2.5~3.5mg/L로 실제 하수처리장의 조건과 유사하였다. 또한 ORP를 측정된 결과 혐기조에서 -60~-110mV의 전위차를 나타내었고, 무산소조에서 -40~-10mV, 호기조에서 20~80mV의 값을 나타

내었다. 운전기간 동안의 유입수와 처리수의 농도 변화를 그림 51에 나타내었다.

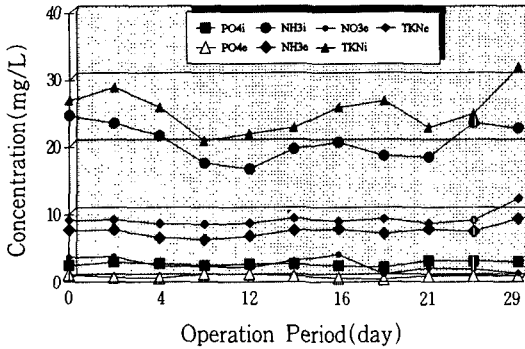


그림 51 A<sup>2</sup>/O 공정에서 영양물질 농도 변화

그림 51에서 보는 바와 같이 질산화와 탈질화반응에 의한 질소제거 거동 및 처리양상을 살펴보면, 유입수의 T-N농도는 21~32mg/L이고, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N는 17~25mg/L이었다.

한편 이에 대한 처리수의 T-N농도는 11~14mg/L로 제거율은 45~61% 정도였고, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N는 6~9mg/L로 제거율은 58~70% 정도를 나타냈다. 또한 처리수의 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도는 12~42mg/L를 나타내었다. 반응조내 평균온도가 20 °C, SRT 7.9일로 운전하여 질산화율이 65%이상을 나타내었다. 본 공정에서의 탈질화율을 증대시키기 위해 호기조 혼합액을 100% 정도 무산소조로 내부반송시켜 90% 정도의 탈질효과를 나타내고 있었으며 내부반송률을 200% 이상 증가시킬 시에 탈질율은 약간 증가하지만 경제성이 떨어지는 것으로 나타났다.

유입수의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P는 22~37mg/L이고 한편, 처리수의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P는 0.8~1.1mg/L 이었다 또한 실험결과, 유입수의 T-P농도는 25~54mg/L이고 처리수의 T-P농도는 1.3~2.2mg/L의 값을 보이고 있어 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P는 65~70%, T-P는 50~68%의 제거율을 보였다. 슬러지내의 인 함량에 있어 인 제거율이 우수하였던 경우 평균 40%의 인 함량을 나타낸 반면, 인 제거율이 떨어졌던

경우에는 2.7% 내외의 값을 보이고 있었다.

또한 질산화반응이 활발히 일어났던 시점에 반송슬러지내 질산성 질소의 혐기조 유입으로 인하여 낮은 제거효율을 볼 수 있었던 반면 비교적 질산성 질소의 영향이 작았던 시기에는 1.0mg/L이하의 처리수 농도를 나타내었다.

그림 52는 A<sup>2</sup>/O 공정에서 각 반응조별 S-COD와 S-P의 농도변화를 나타낸다.

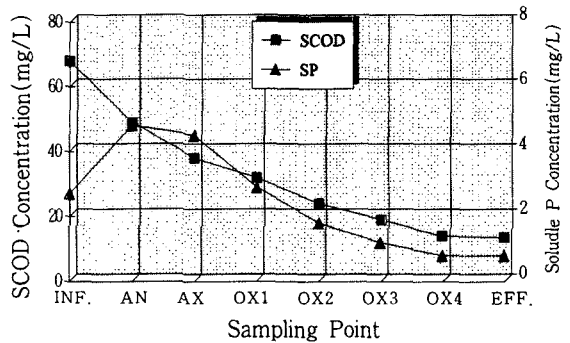


그림 52 A<sup>2</sup>/O공정에서 각 반응조별 S-COD와 S-P관계

그림 52에서 알수 있듯이 혐기조에서 유입된 S-P의 18배정도의 인이 release되고 있으며 S-COD는 이 기간 중 유입농도의 30%가 감소되는 것이 보인다. 또한, 호기조에서 인 uptake는 release된 인의 80% 이상이 일어난다. 유입수의 S-COD /S-P비에 따른 처리수의 S-P농도는 S-COD/S-P가 25정도일 때 1.0 mg/L까지 낮아졌다.

## 5.2 DNR공정에 의한 고도처리실험

본 실험기간 중반부부터 시작한 공정으로서 앞서 도출된 A/O와 A<sup>2</sup>/O공정의 경우 유기물 제거효율은 우수하나 질소와 인의 경우 그다지는 양호한 제거효율을 보이지 않고 있기 때문에 A<sup>2</sup>/O 공정에 비해 경제성에 있어 큰 차이가 없으며 호기조 일부에 Media를 충전한 공정을 개발 하여 실험하였다.

운전기간중 MLSS는 2500~4000mg/L로 운전되었으

며 SRT는 평균 8일을 유지하였다. 또한 호기조의 DO는 2~3mg/L 정도로 실제 하수처리장의 폭기조 운전 조건과 유사하게 유지하였으며, 온도는 22~27 °C로 운전되었다.

유입 하수의 BOD 농도는 85~140 mg/L이었고, COD는 130~170mg/L이었으며, SS는 95~175mg/L 정도 이었다. 처리수의 BOD 농도는 8~13mg/L로 제거율은 85~90% 이상이었다.

그림 6은 DNR 공정에서의 질소농도변화를 나타낸 것으로 운전기간 중 유입수의 질소농도는 T-N이 19~34mg/L이었고, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N는 14~28mg/L 정도 이었다. 처리수의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N농도는 3~6mg/L 이었으며, 이때의 제거율은 74~82%정도를 나타내었다. 처리수의 NO<sub>3</sub>-N 농도는 1~4 mg/L정도로 질산화반응이 거의 이루어지는 것을 알 수 있었다.

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 제거율을 A<sup>2</sup>/O 공정과 비교하면 A<sup>2</sup>/O 공정이 65% 정도가 제거되나 DNR 공정에서는 78% 정도의 높은 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 제거율을 보였으며, NO<sub>3</sub>-N 농도도 A<sup>2</sup>/O 공정보다 낮은 농도로 유출되고 있음을 알 수 있었다. 이는 DNR 공정이 질산화율이 높은 반면 Media 충전부에서 탈질반응의 효과적인 도움으로 NO<sub>3</sub>-N 농도가 낮아지고 또한, 침전지에서 혐기조로의 내부반송시 NO<sub>3</sub>-N 농도가 낮아져 인 release 현상시 방해작용을 최대한 막을 수 있었다.

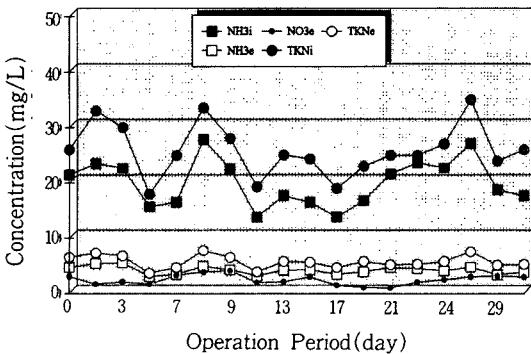


그림 53 DNR 공정에서 운전일수에 따른 질소농도 변화

본 공정기간 유입수의 T-P는 38~53mg/L 이었고, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P는 27~43mg/L정도이였으며 제거효율은 T-P는 75~85%이었고, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P는 80~90%를 나타내었다. 이 결과는 A<sup>2</sup>/O 공정과 비교하여 상당히 우수한 것으로 나타났는데, 이는 운전기간중 유입수의 유기물 부하가 약간 높았고 질소와 인의 부하가 안정되게 유입된 이유도 있었으나, media 충전부에 질소제거율의 향상으로 인한 질소와 인의 제거율 증가를 도운 것으로 판단된다.

그림 54에는 각 반응조별 S-COD 농도와 S-P 농도 변화를 나타내었는데, A<sup>2</sup>/O 공정에 비하여 호기조에서 인 uptake가 증가하여 처리수의 S-P농도가 낮은 것을 알 수 있다. 호기조에서 인 uptake율은 80% 정도를 나타내었다.

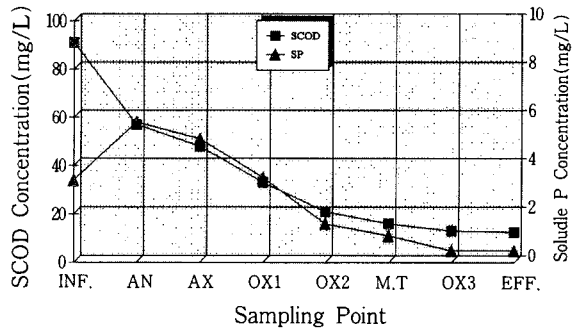


그림 54 DNR 공정에서 각 반응조별 S-COD와 S-P 변화

한편, media 충전부에서 media내의 혐기부로 인해 P-release를 우려하였으나, air를 소량 공급해준 것이 이를 막을 수 있었다.

본 공정에서 슬러지내의 NO<sub>3</sub> 제거를 위하여 호기조 혼합액을 무산소조로 내부반송시켰을 뿐 만 아니라 호기조 일부분에 media를 충전시켜 탈질을 향상시켰고, 이는 반송슬러지내의 NO<sub>3</sub>-N 농도를 저하시켜 혐기조에서 인 release 현상의 방해를 줄일 수 있었다.

특히, 질산화율이 높아지면 A<sup>2</sup>/O 공정에서의 인 방출 저해현상이 발생하였으나, DNR 공정에서는 media



# 기획시리즈 - 1

의 탈질효과 상승으로 이 현상을 상당부분 줄일 수 있었다.따라서 경제적인 면을 고려해 볼때 호기조에서 무산소조로의 내부반송률은 100% 미만에서 최적의 것으로 판단되어진다

이상과 같은 실험에서 각 공정별 BOD, SS, COD, TKN, PO<sub>4</sub>-P 및 T-P 등에 대한 제거율을 표 4에 나타낸다.

표 4. A/O, A<sup>2</sup>/O, DNR 처리특성 비교

항목 (제거율,%)	A/O	A <sup>2</sup> /O	DNR
BOD	83.0	84.0	89.9
COD	81.1	82.5	86.5
SS	84.1	82.4	89.0
TKN	32.0	63.1	77.5
PO <sub>4</sub> -P	61.0	68.7	86.2
TP	56.8	64.7	85.1

그림 8에서 볼 수 있듯이 BOD,SS 및 COD의 제거효율은 각 공정별로 큰 변화가 없으나 질소 및 인 제거율 면에서는 DNR 공정이 기존의 영양물질 제거공법인 A/O 나 A<sup>2</sup>/O 공정에 비해 우수한 것으로 나타나고 있다는 것을 알수 있었다.

한편 상기의 결과를 토대로 DNR공정을 개선하여 기존 남양주시 환경사업소의 포기조 4열(1열:4지)중 2열을 직렬로 연결하여 일처리용량 5,000m<sup>3</sup>급의 실증플랜트를 운전중이다. 혐기조 2지, 무산소조 2지, 호기조 4지의 순으로 설치하였으며, 각 지의 용량은 156m<sup>3</sup>이다. HRT 8시간, SRT 10~14일, MLSS 2,500~3,500, DO 2~4 mg/L의 조건으로 운전하고 있으며, 특히 혐기조 2지중 1지를 슬러지 저장조로 이용하여 운전한 결과 동절기(8°C)이하에서도 질산화가 충분히 일어났으며, 동절기의 문제점인 슬러지의 Wash-out을 방지하는 성과를 거두었다. 이들 처리시설의 전경을 사진 1과 2에

나타낸다.

사진 1 실증 Plant 전경

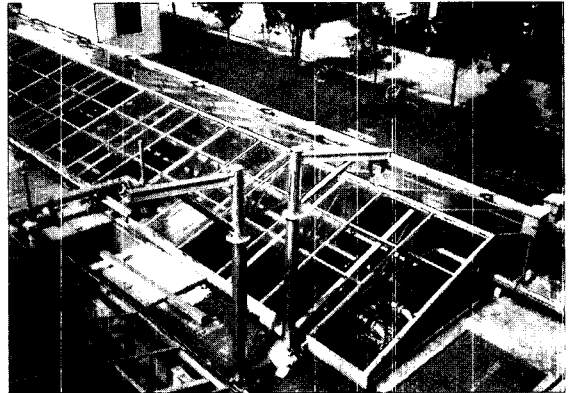
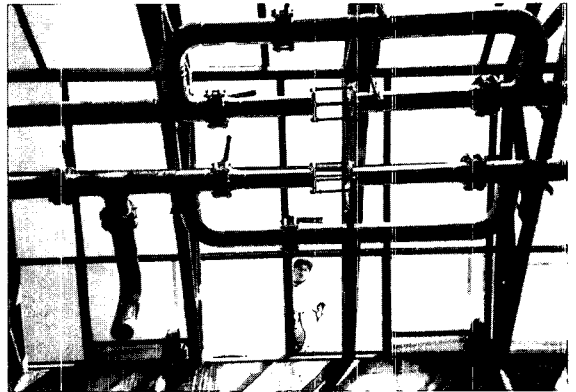


사진 2 Plant 내부배관 모습



## 6. 결 론

이상과 같은 plot plant 실험 및 실증 Plant의 현재까지의 연구결과에서 얻어진 내용을 정리하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 각 공정에서 사용된 유입 원수는 부천시 소재 K하수처리장의 1차 침전지 유출수로 BOD 80mg/L, COD 120mg/L, T-P 4.5mg(S-P 3.3mg/L.), TKN

26mg/L, (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N:20mg/L) 정도로 전형적인 국내 하수처리장의 1차 처리수 농도분포를 보이고 있었다.

2) 처리수내의 BOD는 A/O나 A<sup>2</sup>/O의 20mg/L 이하에 비해 DNR 공정은 10~15mg/L로 약간 낮게 나타났다. 또한 처리수의 S-P 또한 A/O나 A<sup>2</sup>/O가 1.1~1.3mg/L의 범위를 보인 반면 DNR 공정은 1.0mg/L이하로 인 처리효율도 우수하게 나타났다.

3) 혐기조로 유입되는 NO<sub>3</sub> 농도를 분석한 결과 NO<sub>3</sub>가 3mg/L까지는 인의 release 반응에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다.

4) DNR의 혐기조에서의 SPPR(Specific Phosphorus Release Rate)는 22~26mg sp/gvss/h로 분석되었다.

5) 호기조 유출수 슬러지의 인 함량은 A/O 35%, A<sup>2</sup>/O 30%, DNR 45%로 인 제거를 위한 최적의 공정으로 DNR이 추천된다. 특히 DNR 공정의 경우 처리수의 S-P 농도가 0.6mg/L 이하를 나타낼때 5%까지의 인 함량을 나타내었다.

6) 현재까지의 5000톤급 실증 Plant 운전에서는 얻어진 결과는 동절기에 생물학적인 유기물, 질소 및 인의 동시제거를 위해서는 DNR공법과 같이 혐기저장조를 앞단에 두어 반응조를 운영하는 형태가 바람직 하다는 것이다.

7) 이상과 같은 pilot plant 실험결과를 토대로 현재 및 향후에 각 하수처리장에서 필요로 하는 질소, 인 제거에 대한 공정설계 및 운전인자를 즉각적으로 지원할 수 있는 체계를 확립하였다.

8) Pilot plant 및 실증 Plant 운전으로부터 알 수 있는 사실은 기존의 외국 실용화 공법의 국내 직접적용은 불가능하며 따라서 국내 하수 특성에 적합한 공법의 개발 및 적용(예: DNR 공법)이 절실히 필요하다는 것이다.

### ■ 감사의 글 ■

본 연구는 환경부의 G-7과제로 수행중이며, 연구비를 지원하여 주신 환경부에 감사의 뜻을 표하는 바입니다.

### 참고 문헌

1.Randall, C. W., et al(1988).,"York River Sewage Treatment Plant Biological Nutrient Removal Demonstration Projects", Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg Virginia, USA.

2.Hang-Sik Shin & Hung-Suck Park.(1991), "Enhanced Nutrient Removal using Biomass Carrier Sequencing Batch (PBCSBR)", Wat. Sci.Tech., Vol.23 .pp.719.

3.Wentzel, M.C. et al.(1991), "Evaluation of Biochemical Models for Biological Excess Phosphorus Removal", Wat. Sci. Tech., Vol.23., pp.567-576.

4.Painter, H. A.(1970), "A Review of Literature on Inorganic Nitrogen Metabolism in Microorganism", Water Res., Vol.4 .pp. 393-450.

5.Randall, C.W.(1992). "Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal", Technomic Publishing Co. Inc.

6.WEF(1992). Design of Municipal Wastewater Treatment Plants, WEF manual of practice No.8.

7.Standard Method for the Examination of Water and Wastewater(1991), 18th ed., APHA, AWWA, WPCF.

8.Moore, S. F.and Schroeder, E.O.(1971),"The Effect of Nitrite Feed Rate on Denitrification", Water Res.,5,17, pp.445.

9.Metcalf and Eddy(1979). "Wastewater Treatment Dissal and Reuse" McGraw Hill Book Company, Newyork.

10.Comeau,Y.,Rabionwitz, B., Hall, K.J. and W.K. Oldham.(1987)."Phosphorus Release and Up-take in Enhanced Biological Phosphorus Removal from Wastewater", JWPCF, Vol. 59, pp. 707-715.