

# 하 · 폐수의 생물학적 고도처리 프로세스의 기술평가

(Technology Assessment for BNR Processes in Sewage  
and Wastewater Treatment)



한국건설기술연구원 수자원환경부 선임연구원 김 광 수

## 1. 개론

우리나라는 수자원이 부족하여 다목적댐 등 각종 댐에 의해 조성되는 저수지가 중요한 용수원으로 이용되고 있으나 급속한 개발정책 및 산업화에 기인하여 생활하수와 공장폐수에 오염된 많은 하천이 상수원으로 이용되고 있는 호소로 유입됨으로서 국내 댐의 대부분이 부영양화 상태에 있다.

이에 대한 방안으로 정부에서는 1996년 1월 1일부터 하 · 폐수종말처리장의 방류수 수질기준에 질소 및 인의 항목을 추가하여 부영양화 원인물질인 영양염류 방류수질기준(T-N : 60, T-P : 8mg/l)을 정하였다. 그러나 '96년부터 시행되어왔던 방류수 수질기준은 하수배제방식이 대부분 합류식인 우리나라에서는 유입수의 수질보다 더 높아 법적인 구속력이 매우 약하여 2001년부터는 T-N 20mg/l, T-P 2mg/l 이하로 강화시킬 계획으로 있다.

본고에서는 이에 즈음하여 최근 기존하수처리장 또는 향후 건설될 대부분의 하수처리장이 질소, 인 제거 기능을 갖는 생물학적 처리시설로 개조하거나 신설할 계획으로 있어서 지금까지 국내 및 국외에서 개발된 공정의 기술적 특성 및 평가와 아울러 실험 자료를 제공함으로써 설계업무를 담당하고 있는 기술자들에게 보다 나은 이해를 촉진시키고자 한다.

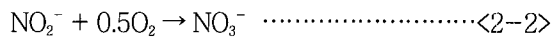
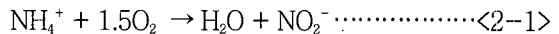
## 2. 질소 · 인 제거 개념

### 2.1 질산화

질산화에 관련하는 미생물은 독립영양균에 속하

는 *Nitrosomonas*와 *Nitrobacter* 등이다. 이들 질산화균은 유기물을 산화시켜 증식을 위한 에너지를 얻는 종속영양균과는 달리 무기 질소 화합물을 질산화시킴으로써 증식에 필요한 에너지를 얻고 무기성 탄소(CO<sub>2</sub>)를 세포합성에 이용한다.

*Nitrosomonas*에 의한 암모니아성 질소의 산화에 대한 양론식은 식<2-1>과 같고, *Nitrobacter*에 의한 아질산성 질소의 산화식은 식<2-2>와 같다.



위 두 반응식의 깁스자유에너지(Gibb's free energy)를 산정하면 각각 54~84 kcal/mole NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 및 15.4~20.9 kcal/mole NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N이다. 질산화과정에서 *Nitrosomonas*가 *Nitrobacter*보다 더 많은 에너지를 획득하므로 세포생산량은 *Nitrosomonas*가 더 많다. 각 박테리아의 이론적인 성장율(yield coefficient) Y는 암모니아성 질소의 경우에는 0.29 g VSS/g NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N이고, 아질산성 질소의 경우에는 0.084 g VSS/g NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N이다.

생물학적 폐수처리시설에서는 통상 유기물이 풍부하여 종속영양 박테리아의 성장속도가 질산화 박테리아의 성장속도보다 크므로 MLSS 농도를 적절히 유지하기 위하여 잉여슬러지를 폐기시킬 때 질산화 박테리아가 washout되기 쉽다. 그러므로 포기조에서 질산화 박테리아를 충분히 유지하기 위해서는 종속영양 박테리아의 성장속도보다 긴 SRT에서 운

전해야한다. Fig. 2.1은 활성슬러지공법에서 질산화를 위한 적정 SRT와 유기물 제거효율간의 관계를 나타낸 것이다.

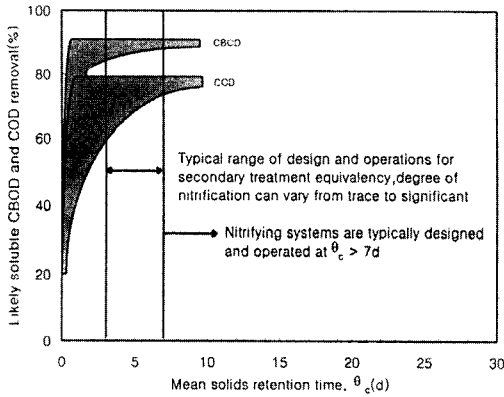


Fig. 2.1 Soluble CBOD and COD removals as a function of mean solids retention time in a biological reactor

일반적으로 도시하수는 질산화 미생물에 의해 완전 질산화가 거의 가능하나, 공장폐수에 함유된 합성유기물질은 경우에 따라 질산화 박테리아의 성장에 방해물질로 작용하며, 각 물질별 방해농도를 Table 2.1에 나타내었다.

Table 2.1 Industrially significant organic compounds inhibiting nitrification

Compound	Estimated concentration giving 50% inhibition(mg/ℓ)
Acetone	2,000
Carbon disulfide	38
Chloroform	18
Ethanol	2,400
Phenol	17
Ethylene diamine	5.3
Hexamethylene diamine	85
Aniline	< 1
Monoethanolamine	< 200

(Source : Hockenbury and Grady, 1977)

2.2 탈질

탈질미생물의 성장속도는 호기성 박테리아와 유

사하고 질산성 질소의 제거가 유기물 농도와 직접적으로 관련이 있기 때문에 동역학적 계수에 관한 연구는 유기물 제거와 관련하여 많이 수행되어 왔다. 종래에는 탄소원으로 메탄올을 많이 사용하였으나, 메탄올을 사용하면 유지관리비가 많이 소요되므로 최근에는 메탄올 대신 유입하수내의 용해성 BOD성분을 이용한다.

현재 유입하수내의 유기탄소를 이용하여 질소를 제거하는 실용화된 공정으로는 A<sup>2</sup>/O, Bardenpho 공정 등이 있으며, 이들 공정에서는 포기조에서 유기물 제거 및 질산화과정을 거친 혼합액을 탈질조로 내부반송시키고 탈질조에서는 유입하수내의 유기물질을 탄소원으로하여 질산성 질소를 제거한다.

A<sup>2</sup>/O공정과 같이 탈질조가 하나인 경우는 유출수의 총질소 농도를 10 mg/ℓ 이하로 배출시킬 때 사용되며, Bardenpho공정은 유입하수내의 유기물질을 탄소원으로 하는 1차탈질조 외에 내생탈질을 이용하는 2차탈질조를 추가로 가지므로, 유출수의 총질소 농도를 5 mg/ℓ 이하로 배출시키는데 사용한다. A<sup>2</sup>/O공정 및 Bardenpho 공정의 1차 탈질조에서 T-N 제거효율(R)은 식 <2-3>을 사용한다.

$$R = \frac{N_{T_s} - N_{T_2}}{N_{T_s}} = \frac{I_R}{I + I_R} \dots \dots \dots <2-3>$$

식 <2-3>에서 탈질조에서의 질소 제거효율은 내부반송비와 관계가 있으며, Fig. 2.2는 식 <2-3>을 이용하여 내부반송비에 따른 질소 제거효율을 나타낸 것이다. 내부반송비가 증가할수록 질산성 질소 제거효율은 증가하지만 어느 정도 이상에서는 크게 증가하지 않음을 알 수 있다. 포기조에서 탈질조로의 내부반송비 뿐만 아니라 2차 침전지에서 탈질조로의 슬러지 반송비(r)을 고려하여 질소 제거효율을 계산할 경우에는 식<2-4>을 이용하며, 2차 침전지에서 탈질된 질소를 고려하여 산출할 때는 식<2-5>을 이용한다.

$$R = \frac{I_R + r}{1 + I_R + r} \dots \dots \dots <2-4>$$

$$R = \frac{I_r}{1 + I_r + r} \dots\dots\dots \langle 2-5 \rangle$$

이와 같이 이론적인 내부반송비를 결정한 후 비탈질율(SDNR: specific denitrification rate)을 적용하여 탈질조의 용량을 구한다.

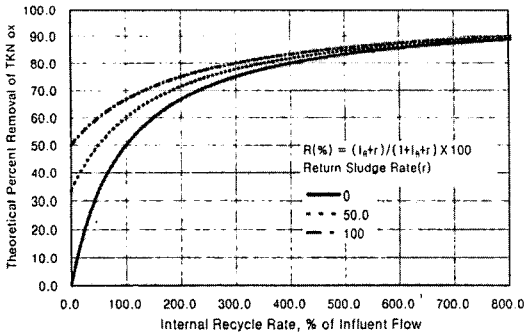


Fig. 2.2 Theoretical oxidized TKN removal performance for a single anoxic zone process as a function of total recycle rate

Burdick 등은 수정 Bardenpho공정을 적용한 현장실험에서 1차탈질조에 탄소원으로 유입하수를 주입하여 Fig. 2.3에서와 같이 탈질조에서의 F/M비에 따른 비탈질율을 구하여 식 <2-6>과 같은 상관관계를 도출하였다.

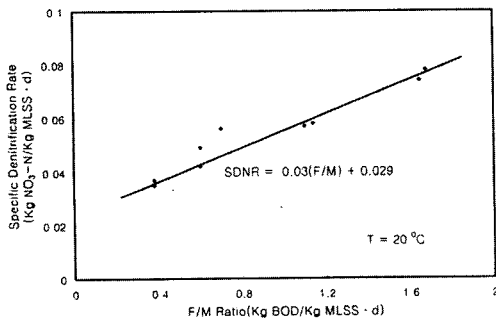


Fig. 2.3 Specific denitrification rate as a function of anoxic zone F/M ratio

$$SDNR_1 = 0.03(F/M_1) + 0.029 \dots\dots\dots \langle 2-6 \rangle$$

위의 식에서; SDNR<sub>1</sub> = 1차 탈질조에서의 탈질속도 (g NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/g VSS · d)  
 F/M<sub>1</sub> = 1차 탈질조의 유기물 부하 (g BOD/g VSS · d)

이와 같은 유입수내의 유기물을 이용하여 질산성 질소를 제거하는 탈질조의 용량 및 체류시간 결정 방법은 탈질조에서의 비탈질율과 F/M비간의 상관관계식인 식 <2-6>에 각각 식 <2-7> 및 식 <2-8>에 주어진 비탈질율과 탈질조에서의 F/M비를 적용하여 식 <2-9>로 계산한다.

$$SDNR = \frac{NO_3 - N \times Q}{VOL_{anoxic} \times MLVSS} \dots\dots\dots \langle 2-7 \rangle$$

$$F/M = \frac{Q \times BOD}{VOL_{anoxic} \times MLVSS} \dots\dots\dots \langle 2-8 \rangle$$

$$VOL_{anoxic} = \frac{Q \times [(NO_3 - N) - 0.03 \times BOD]}{MLVSS \times 0.029} \dots\dots\dots \langle 2-9 \rangle$$

위의 식들에서 ;

- SDNR = 비탈질율 (kg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/kg MLVSS · d)
- NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N = 탈질조에서 제거된 질산성 질소 (mg/ℓ)
- VOL<sub>anoxic</sub> = 탈질조의 용량 (m<sup>3</sup>)
- MLVSS = 탈질조에서의 미생물 농도 (mg/ℓ)
- Q = 유입유량 (m<sup>3</sup>/d)
- F/M = 탈질조에서의 F/M비 (kg BOD/kg MLVSS · d)

식 <2-8>의 탈질조에서 제거되는 질산성 질소의 산정방법은 식 <2-3>과 같은 물리적인 식을 이용하며, 탈질조에서의 질소 제거량을 높이기 위해서는 포기조에서 탈질조의 내부반송비를 증가시켜야 한다.

그러나 식<2-9>에서 유입수의 BOD 농도는 일정하기 때문에 내부반송비를 높이더라도 질소 제거효율을 계속 증가시킬 수는 없으므로, BOD값이 고정된 상태에서 질소 제거효율을 높이기 위해서는 탈질조의 용량을 증가시켜야 한다. 그러나 탈질조의 용량을 증가시키면 탈질조에서의 유기물 부하가 점차 감소되어 내생 탈질조건에 가까워지므로 탈질조에서의 질소 제거효율은 식 <2-3>의 이론적인 제거효율을 만족시키지 못한다. 또한 표준활성슬러지공법을 적용하는 기존 하수처리장의 포기조를 수정하여 질소를 제거할 경우에는 탈질조 용량의 증가로 포기조 용량이 작아져 유입수 TKN의 질산화가 일어나지 않을 우려가 있다.

생물학적 질소제거 방법에는 유입수의 유기물을 탄소원으로 이용하는 방법외에 미생물의 내생분해(endogenous decay)시 발생하는 유기물을 탄소원으로 이용하는 방법이 있으며, Bardenpho공정의 2차탈질조 설계에서는 Fig. 2.4에서와 같이 식 <2-10> 및 식 <2-11>로 표현된 탈질조에서의 SRT와 비탈질율 간의 상관관계를 이용한다.

$$SDNR_2 = 0.12 \times \theta_c^{-0.706} \dots\dots\dots <2-10>$$

$$SDNR_2 = \frac{0.175An}{Y \theta_c} \dots\dots\dots <2-11>$$

위의 식들에서 ;

SDNR<sub>2</sub> = 두번째 탈질조에서의 탈질속도  
(g NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/g VSS · d)

θ<sub>c</sub> = 슬러지 체류시간(day)

Y = 순 TSS 생산량(g TSS/g BOD)

An = 소모산소량(g O<sub>2</sub>/g 제거된 BOD)

첫번째 탈질조에서의 탈질속도는 0.04~0.15 g NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/g VSS · d범위였으며 내생탈질을 이용하는 두번째 탈질조에서의 탈질속도는 첫번째 탈질조의 20~50%였다고 한다. Table 2.2는 Stensel에 의하여 제안된 식 이외에 여러 연구자들에 의해 유기탄소가 풍부한 조건하의 탈질조에서 얻어진 비탈질율을 나타낸 것이다.

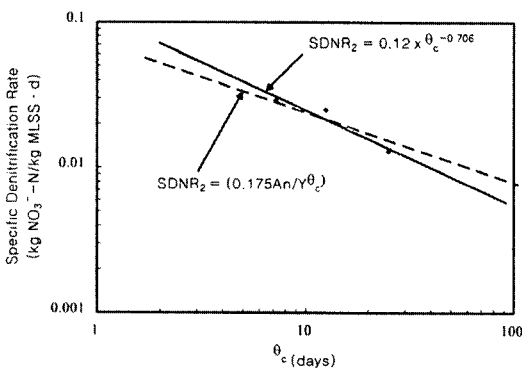


Fig. 2.4 Specific denitrification rates without external carbon source

Table 2.2 Examples of denitrification kinetic coefficients (non-carbon limited)

SDNR	Temp. correction	Reference <sup>29)</sup>
0.024(1b/1b VSS · d)	10°C	EPA Nitrogen Manual
0.033(1b/1b VSS · d)	15°C	
0.061(1b/1b VSS · d)	20°C	
3.6mg/g · h	1.094 <sup>T-20</sup>	Barnard
0.03(F/M) + 0.029 (1b/1b vss · day)	-	Eimco(Stensel)
0.07(mg/mg vss · h)	1.06 <sup>T-20</sup>	Benfield & Randall
0.10 g/g · d, 1st Part UCT	θ <sup>T-15</sup> θ = 1.12(7~20°C) θ = 1.06(7~25°C)	Oris Albertson
0.05 g/g · d, 2nd Part UCT		

### 2.3 인제거 원리

표준활성슬러지공법에서 미생물은 BOD의 소비와 더불어 폐수로부터 인을 양론적으로 섭취한다. 미생물 세포내의 인 함량은 보통 건조중량으로 1.5~2%이지만 혐기성 조건에 이어 호기성 조건이 따를 경우 미생물은 세포성장을 위한 양론적 요구량을 초과하여 인을 섭취하며, 이런 경우 세포내의 인 함량은 건조중량으로 4~12%에 이른다.

혐기성에 이어 호기성 상태가 뒤따르는 조건에서는 산소 또는 질산성 질소와 같은 전자 수용체가 없는 혐기성 조건에서도 SBOD 농도는 감소하고, SBOD가 감소되는 동안 용해성 인의 농도는 증가하며, 호기성 조건에서 용해성 인의 농도는 급격히 감소한다. 이와같은 현상에 대하여 Nichols와 Osborn, 그리고 Buchan이 설명한 생물학적 인 제거 메카니즘은 Fig. 2.5과 같다. 혐기성 조건에서 인 제거 미생물은 세포내에 축적되어 있는 ATP를 가수분해할 때 발생하는 에너지를 이용하여 초산과 같은 유기산을 섭취한 후 PHB(poly-β-hydroxybutyrate)로 전환하여 저장하고, 이때 유리된 인산(ortho-P)을 세포밖으로 방출시킨다. 그러나 혐기성 조건에서 호기성으로 전환되면 인 제거 미생물은 세포내에 저장하였던 PHB를 분해할 때 발생하는 에너지로

ATP를 합성하며, 이때 혐기성 조건에서 방출된 양보다 더 많은 양의 인을 섭취하는데 이를 인의 과잉 섭취(luxury uptake)라고 한다.

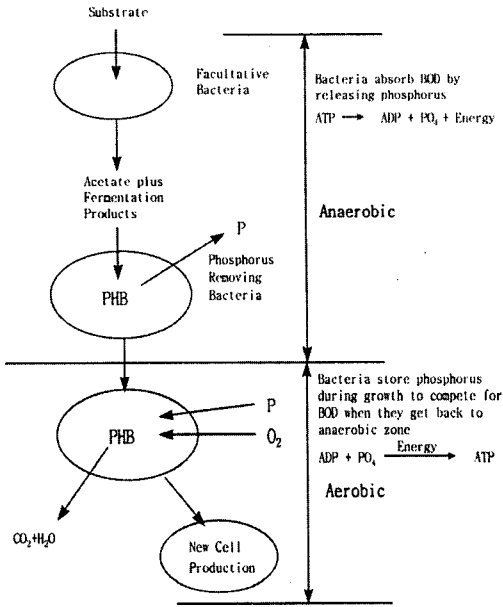


Fig. 2.5 Schematic diagram of biological phosphorus removal mechanism

A/O, A<sup>2</sup>/O, UCT공정 등에서는 혐기조에서의 인 방출에 소요되는 탄소원으로 유입수내의 유기물질을 사용하기 때문에 유입수의 COD/T-P비가 매우 중요하고, 포기조에서 발생하는 질산성 질소는 혐기조에서 인 방출에 영향을 미치기 때문에 유입수의 COD/TKN비 또한 질소 및 인 제거공정의 처리 효율에 큰 영향을 미친다. Tetreault등이 A/O공정을 적용하고 있는 실규모 처리장을 대상으로 조사한 결과에 따르면 유출수의 용해성 인 농도를 1mg/l 이하로 유지하기 위해서는 유입수의 TBOD/T-P비가 20~25이상이어야 하며, Hong 등은 SBOD/T-P비는 15이상이어야 한다고 하였다. Seibritz 등은 Phoredox공정의 2차 침전지에서 탈인조로 반송되는 슬러지에 포함된 질산성 질소에 의해 인 방출이 영향을 받지 않기 위해서 유입수의 COD/TKN비는 12.5이상이어야 하고, UCT공정에서는 2차 침전지

슬러지가 탈질조를 거친후 혐기성조에 유입되기 때문에 유입수의 COD/TKN비는 7.5이상이면 된다고 하였다.

생물학적 인 제거 시설에서 2차침전지로부터의 반송슬러지에 함유된 질산성 질소가 혐기성 조에 유입되면 인 제거 능력이 감소한다는 것이 Barnard에 의하여 최초로 제시되었는데 이는 질산성 질소가 혐기성 조에 유입되면 산화-환원전위차가 증가하고 혐기성 상태가 저하되기 때문인 것으로 설명되었다. 그러나 인 제거 기구에 대한 원리가 점차 밝혀지면서 탈인균의 인 방출에 요구되는 유기물질이 탈질균에 의해 소모되기 때문인 것으로 판명되었으며, 그 결과 유입수의 BOD/P비, 시스템의 SRT, 반송슬러지 또는 내부 반송슬러지에 함유된 질산성 질소 농도 등이 인 제거에 중요한 요소로 제기되었다.

Simpkins와 McLaren은 pilot규모의 수정 Bardenpho공정 실험에서 2차침전지 유출수의 질산성 질소 농도가 4.0 mg/l에서 6.7 mg/l로 증가되었을 때 인 제거효율은 90%에서 55%로 감소되었다고 한다. Palmetto하수처리장에서는 내부 반송펌프의 가동을 중단하였을 때 유출수의 질산성 질소 농도가 10 mg/l 증가하였으며 동시에 유출수의 인 농도는 2.3 mg/l에서 7.1 mg/l로 증가하였다고 한다. Vinconneau 등은 A/O공정 실험에서 유입수의 BOD/P비와 포기조의 F/M비는 고정시키고 유입수의 TKN 농도를 변화시켜 유출수의 질산성 질소 농도를 3.4 mg/l에서 0.6 mg/l로 감소시켰을 때 유출수의 인 농도는 2.0 mg/l에서 0.9 mg/l로 감소하였다고 한다.

A/O공정을 적용하고 있는 미국의 Pontiac 하수처리장에서는 유출수의 질산성 질소 농도가 6.7 mg/l에서 11.6 mg/l로 증가되어도 유출수의 인 농도는 1 mg/l 이하로 배출되었다. 이는 유입수의 BOD/P비가 대단히 높아 혐기성 조건에서 질산성 질소가 충분히 제거되어 인의 방출 및 흡수에 영향을 미치지 않았기 때문이라고 하였다. Reedy Creek와 Depere 하수처리장에서도 마찬가지로 유입수의 BOD/P 비가 대단히 높아 포기조에서 완전질산화가 진행되어 반송슬러지와 내부반송슬러지에 질산성

질소가 함유되어 혐기조에 유입되어도 유출수의 인 농도는 1 mg/ℓ 이하로 배출가능하였다고 한다.

Rabinowitz는 UCT공정에서 탄소원으로 초산나트륨을 사용하여 혐기성 과정에서의 인 방출에 대한 질산성 질소의 영향을 연구한 결과, 인 방출 속도는 질산성 질소의 농도에 반비례하고 유기물 농도에 비례하며, 탈질과정에서 질산성 질소 1 mg이 감소되는데 3.6 mg의 COD가 소요된다고 하였다. 탈질을 위한 외부탄소원으로 아세테이트를 사용하여 실험한 McCarty 등의 실험결과에서도 3.53 mg COD/mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N의 비를 나타내었다.

탈인과정에서 소모되는 유기물은 휘발성 지방산으로 전환되어 소모되나 탈질과정에서는 지방산으로 전환되기 전에 소모되므로 탈인과정에서는 유기물 부족으로 질산성 질소가 인 방출에 방해작용을 한다. 그러나 Osborn과 Nicholls에 의하면 인 제거 박테리아는 인 제거 능력뿐만 아니라 탈질능력도 있어서 탈질조에서는 질소 제거뿐만 아니라 인 흡수도 동시에 일어난다고 하였다.

생물학적 질소 및 인 제거 공정은 BOD제거뿐만 아니라 질산화와 탈질도 고려하여 SRT를 길게하여 운전한다.

Fig. 2.6은 SRT와 인을 제거하기 위해서 소요되는 BOD량간의 관계를 나타낸 것으로, 슬러지내의 인 함량이 4.5%이고 SRT가 25일 일때 인 1mg을 제거하는데 요구되는 BOD량, 즉 유입수의 BOD/P비는 33 : 1 이고, SRT가 8일 일때의 비는 25 : 1 이나, 슬러지내의 인 함량이 6%일 때는 4.5%일 때보다 BOD/P비가 낮아 처리수의 인 농도를 낮추고 긴 SRT를 유지하기 위해서는 인을 제거하기 위해 BOD가 더 많이 필요함을 알 수 있다.

Fukase 등은 A/O공정 실험에서 시스템의 SRT를 4.3일에서 8일로 증가시켰을 때 BOD/P비는 19에서 26으로 증가되고, 슬러지내의 인 함량은 5.4%에서 3.7%로 감소하였다고 한다. 이러한 결과는 시스템 설계시 SRT를 길게 하고 유출수의 인 농도를 낮게 하기 위해서는 유입되는 BOD량이 높아야 된다는 것을 의미한다.



Fig. 2.6 Calculated BOD mass required for the removal of unit phosphorus mass

### 3. 생물학적 질소 및 인 제거 공정의 기술 평가

표준활성슬러지공법을 개량한 질소 또는 인 제거 공정으로 Wuhrmann이 Fig. 3.1과 같은 질소제거공정을 최초로 개발하였으며, 뒤이어 Ludzack와 Ettinger는 Fig. 3.2와 같은 공정을 개발하였다. 두 공정간의 차이점은 탈질을 위한 탄소원의 종류와 탈질조의 위치에 있다. Wuhrmann공정에서는 포기조 다음에 탈질조를 위치시켜 포기조에서 유기물 제거 및 질산화를 거친 혼합액을 탈질조에서 장기간 체류시켜 탈질시키며, 탈질 탄소원으로 세포분해에 의해 생성된 유기물을 이용한다. 그러나 Ludzack - Ettinger공정에서는 탈질을 위한 탄소원으로 유입하수를 이용하기 위하여 포기조 앞에 탈질조를 설치하고 포기조에서 질산화를 거친 혼합액을 반송슬러지 형태로 탈질조로 이송한다.

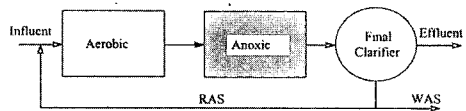


Fig. 3.1 Wuhrmann process

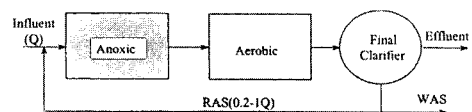


Fig. 3.2 Ludzack-Ettinger process

Wuhrmann공정에서는 원활한 질소제거를 위하여 탈질조에서 8시간 이상의 체류시간이 요구되는데, 탈질조에서의 장시간 체류에 따른 암모니아성 질소의 발생과 유출수의 탁도증가로 말미암아 실용화에 실패하였으며, Ludzack-Ettinger공정에서는 2차침전지에서 탈질조로 반송되는 슬러지만으로는 질소 제거효율이 매우 낮았다.

Barnard는 Ludzack-Ettinger공정의 단점을 보완하기 위하여 Fig. 3.3에서와 같이 포기조 혼합액을 유입유량의 1~4배가량 탈질조로 반송시켜 총 질소 제거효율을 88%까지 향상시켰다. 그 후 수정 Ludzack-Ettinger공정의 질소제거 개념을 기본으로 A<sup>2</sup>/O, 수정 Bardenpho, UCT, VIP공정 등이 개발되어 현재 실용화되어 있다.

A<sup>2</sup>/O공정은 미국의 Air Product사가 개발하였으며, 인의 제거만을 목적으로 하는 A/O공정을 개량하여 Fig. 3.4에서와 같이 인 뿐만 아니라 질소제거도 가능하도록 혐기조와 포기조사이에 탈질조를 설치하였다. 혐기조에서는 유입하수내의 유기물을 이용하여 인을 방출하고 탈질조에서는 포기조로부터 내부반송되는 혼합액내의 질산성 질소를 혐기조를 거친 유입하수를 탄소원으로하여 질소가스로 환원시켜 질소를 제거한다. 포기조에서는 암모니아성 질소를 질산성 질소로 산화시킴과 동시에 유기물 제거와 인의 과잉섭취가 일어나며, 인의 제거는 잉여슬러지의 폐기에 의한다.

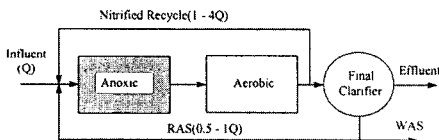


Fig. 3.3 Modified Ludzack-Ettinger process

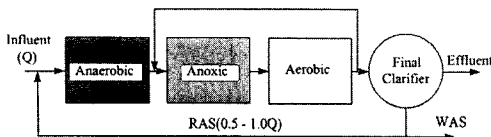


Fig. 3.4 A<sup>2</sup>/O process

수정 Bardenpho공정은 1970년대 초에 남아프리카 공화국의 Banard에 의해 개발되어 미국의 Eimco

사에 의해 상업화되었다. Fig. 3.5에서와 같이 기존의 생물학적 질소 제거 공정인 4단계 Bardenpho공정 앞에 혐기성조를 추가시켜서 질소 및 인을 동시에 제거하는 공정으로서, 기존의 A<sup>2</sup>/O공법에 추가로 무산소조와 포기조를 설치하였다. 1차탈질조에서는 A<sup>2</sup>/O공법과 마찬가지로 유입하수를 탄소원으로하여 질소를 제거하고, 2차탈질조에서는 세포분해에 의해 생성되는 유기물을 탄소원으로 하는 내생탈질을 이용함으로써 질소 제거효율을 더 한층 높이며, 재포기조에서는 내생탈질에 의해 발생하는 암모니아성 질소의 산화와 최종침전지에서의 탈질에 의한 슬러지 부상 및 인의 재방출을 막는다. 수정 Bardenpho공정에서도 A<sup>2</sup>/O공정과 마찬가지로 질소는 포기조의 질산성 질소를 탈질조로 반송시켜 제거하며, 인의 제거는 잉여슬러지의 폐기에 의해 이루어진다.

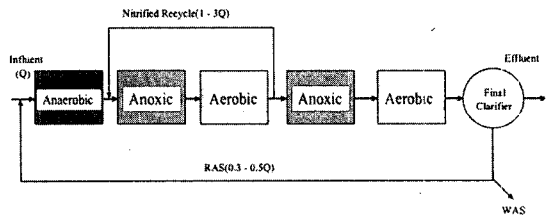


Fig. 3.5 Modified Bardenpho process

혐기조에서의 인 방출과 탈질조에서의 질소 제거에 소요되는 탄소원은 유입하수내의 유기물을 이용하기 때문에 인 및 질소의 제거는 유입하수의 유기물 농도에 의하여 영향을 받는다. 특히 유입하수의 TKN/COD비가 0.07~0.08 mg N/mg COD보다 높을 경우 탈질조에서 미처리된 질산성 질소가 2차침전지에서 혐기조로 반송되는 슬러지에 함유되어 혐기성조에서의 인 방출이 저하되기 때문에 처리수의 인 농도를 1 mg/l 이하로 배출하기 어렵다고 한다.

UCT공정에서는 앞에서 설명된 A<sup>2</sup>/O 및 수정 Bardenpho공정들의 문제점을 해결하기 위해서 Fig. 3.6에서 보는 바와 같이 슬러지를 혐기조로 반송시키지 않고 탈질조로 반송시키며, 질산성 질소가 제거된 무산소조의 혼합액을 혐기조로 반송시켜 혐기조에서의 질산성 질소에 의한 영향을 최소화시킴

로써 유입수의 TKN/COD비가 0.14 mg N/mg COD에서도 처리수의 인 농도를 1 mg/l 이하로 유지할 수 있다고 한다.

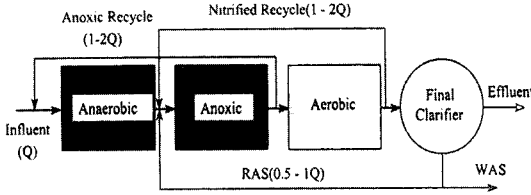


Fig. 3.6 University of Capetown(UCT) process

Fig 3.7은 대우기술연구소에서 개발한 DNR (DaeWoo Nutrient Removal Process) 공정으로서 종래 A<sup>2</sup>/O공정 2차침전지에서 혐기조로의 슬러지 반송시 반송슬러지에 함유된 질산성 질소에 의해 혐기조에서 인 방출의 영향을 최소화 하기 위하여 질산성 질소제거를 위한 슬러지 탈질조(내생탈질)를 설치한것도 전술된 내용과 같은 이유에서이다.

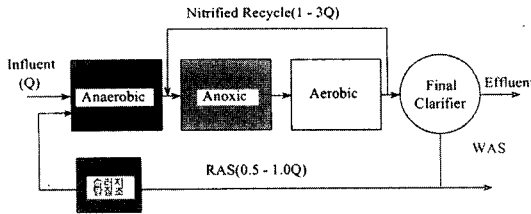


Fig. 3.7 DNR process

생물학적 질소 및 인 제거 공정에는 A<sup>2</sup>/O, 수정 Bardenpho, UCT공정 등과 같이 혐기조, 무산소조, 폭기조를 연속으로 접속시켜 운전하는 주류공정과 인 방출을 위한 혐기성 조건을 형성시키기 위하여 반송슬러지의 일부를 중력식 농축조에 장기간 체류시키는 측류공정이 있다. 측류공정의 대표적인 공법으로는 Fig. 3.8에 도시된 1964년에 Levin에 의해 개발된 Phostrip공정이 있다. Phostrip공정은 인의 제거만을 목적으로 개발되었으며, 세포분해에 의해 생성되는 유기물을 탈인조에서의 인 방출시 요구되는 유기물질로 사용함으로써 인의 제거가 유입수의 수질에 의하여 영향을 받지 않는다. 그러나 폭기조의 운전을 완전 질산화조건에서 운전하는 경우에는

포기조에서 형성되는 질산성 질소에 의해 탈인조에서의 인 방출이 악영향을 받기 때문에 Phostrip공정에서 인 뿐만 아니라 질소까지 제거하기 위해서는 2차침전지 다음에 질산화조 및 탈질조를 추가로 설치해야 한다.

풍림산업에서는 종래 Phostrip공정에 질소제거를 위한 장치 추가시 상기와 같은 별도의 시설이 추가되어 건설비가 많이 소요되기 때문에 상기의 문제 해결책으로 2차침전지와 탈인조 사이에 탈질조를 설치하여 종래의 Phostrip공정에서 인 뿐만 아니라 질소제거도 할 수 있는 공정을 개발(P/L프로세스)하였다.

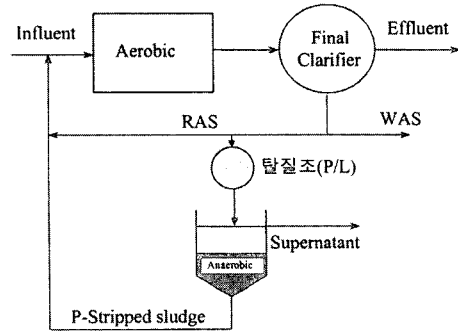


Fig. 3.8 Phostrip and P/L process

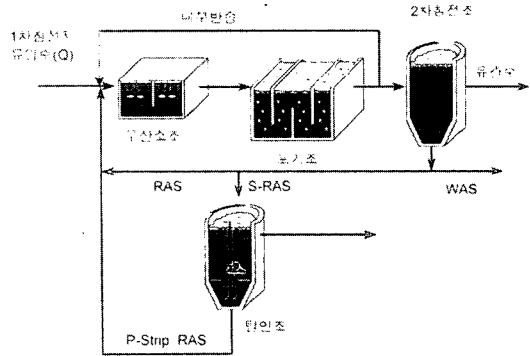


Fig. 3.9 M-Phostrip process (P/L-II 프로세스)

한편 P/L 프로세스는 인의 제거는 우수하지만 질소의 제거율이 낮아 Fig. 3.9에서와 같이 P/L프로세스를 개조하여 인 뿐만 아니라 질소제거도 가능한 질소·인 동시제거 공정을 개발하였다. P/L-II프로세스의 특징은 A<sup>2</sup>/O 및 M-Bardenpho프로세스의 경우 유입수의 유기물을 혐기조에서의 인 방출과 탈



질조에서 질소제거에 소요되어 유입수의 수질에 매우 민감하나 P/L-II프로세스의 경우는 인의 방출에 소모되는 유기물은 탈인조에서 cell분해에 의해 생성된 유기물을 이용하고 탈질에 소모되는 유기물은 유입하수에 함유된 유기물을 이용하므로 주류공정보다 유입수의 수질에 영향을 덜 받는다.

4. 질소·인 제거공정 운전사례

Fig. 4.1 및 Fig. 4.2는 A/O 및 A<sup>2</sup>/O공정의 단위공정별 유입수의 유기물 농도변화를 나타낸 것으로 유입수의 유기물농도 80%는 혐기조에서 인방출에 소모되었거나 미생물 floc에 의하여 흡수되었기 때문이다.

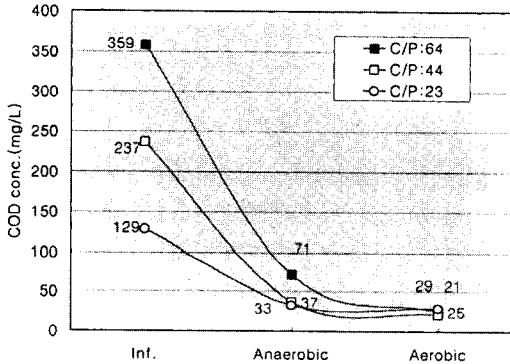


Fig. 4.1 A/O공정의 단위공정별 유기물농도변화

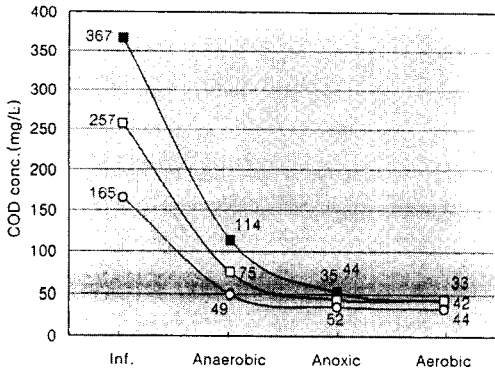


Fig. 4.2 A<sup>2</sup>/O공정의 단위공정별 유기물농도변화

Fig. 4.3 및 Fig. 4.4는 A/O 및 A<sup>2</sup>/O공정의 단위공정별로 유입수의 COD/T-P비, COD/TKN비에 따른 각 단위공정별 인 농도변화를 나타낸것으로서 A/O공정의 경우 유입수의 COD/T-P비가 44일 때까지

는 혐기조에서 인방출과 폭기조의 인 흡수가 원활히 이루어지나 유입수의 COD/T-P비가 23일 경우는 인의 제거가 이루어지지 않는다. A<sup>2</sup>/O공정의 경우는 유입수의 COD/T-P비가 56이상 그리고 COD/TKN의 비는 10이상일때만 생물학적 인의 제거가 가능하여 유입수 수질에 영향을 받음을 알 수 있다.

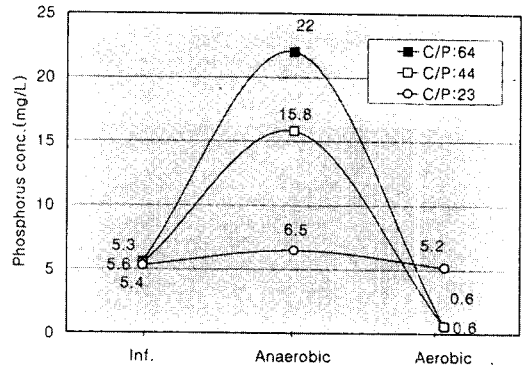


Fig. 4.3 A/O공정에서 유입수의 COD/T-P비에 따른 혐기조 및 폭기조에서의 인농도변화

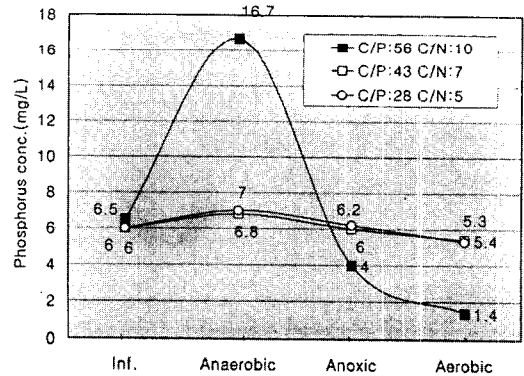


Fig. 4.4 A<sup>2</sup>/O공정에서 유입수의 COD/T-P비 및 COD/TKN비에 따른 혐기조 및 폭기조에서의 인농도변화

Fig. 4.5는 동일한 크기 반응기 및 유입농도를 일정하게 유지하고 BNR공정과 활성슬러지 공정에서의 미생물 성장속도(Y:Yield)를 비교한 것으로서 BNR공정이나 활성슬러지 공정은 동일한 미생물 성장속도를 나타내어 활성슬러지 공정에 질소 및 인 제거시설 추가시 시스템 전체의 F/M비가 낮아져 SRT가 길게 운전된다는 것을 알 수 있다. Fig. 4.6은

폭기조의 용적은 그대로 두고 혐기조 및 무산소조 추가에 따라 SRT를 비교한 것으로서 동일한 유입수 질에서 A/O공정보다 A<sup>2</sup>/O공정이 슬러지 발생량이 적음을 알 수 있다.

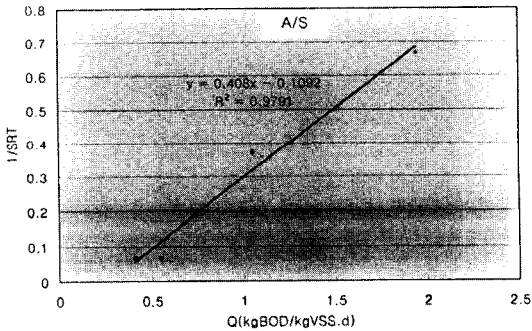
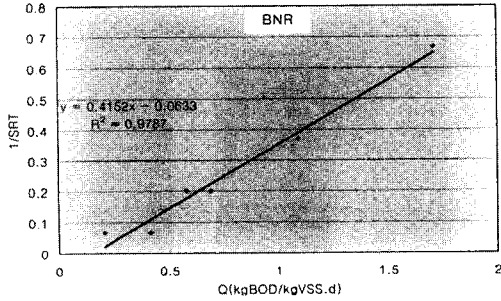


Fig. 4.5 BNR공정과 활성슬러지와의 미생물성장 계수 및 내생성장계수비교

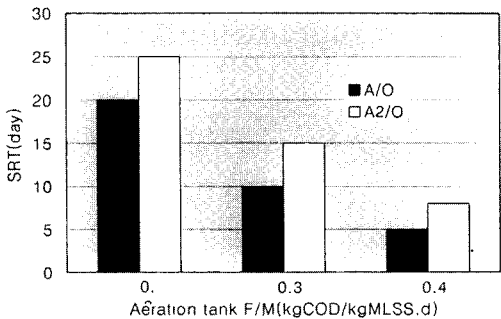


Fig. 4.6 A/O공정 A<sup>2</sup>/O공정간의 폭기조 F/M비에 따른 SRT비교

Fig. 4.7은 SRT에 따른 혐기조 및 호기조에서의 슬러지 인 함량을 나타낸것으로서 SRT가 길어 질수록 슬러지내의 인이 축적되고 혐기 및 호기조 슬러지간에 인 함량이 같아짐을 알 수 있다.

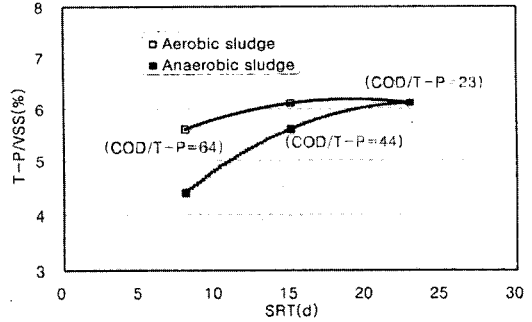


Fig. 4.7 SRT에 따른 혐기, 호기조의 슬러지 인 함량

Fig. 4.8은 1차 무산소조에서 F/M비에 따른 질산성 질소제거율을 나타낸것이고 Fig. 4.9는 내생탈질조건에서 질산성 질소제거율을 나타낸 것으로서 1차 무산소조에서 질소제거율은 F/M비가 높을수록 증가하고 F/M비가 약 1.7에서는 M-Phostrip공정이나 A<sup>2</sup>/O공정 제거율이 유사하나 F/M비가 낮으면 M-Phostrip공정이 제거율이 높음을 알 수 있다. 내생탈질조건에서는 1차 무산소조에 비교하여 질소제거율이 매우 낮다.

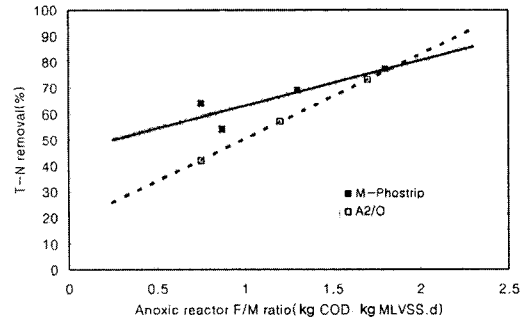


Fig. 4.8 1차 Anoxic조에서 F/M비에 따른 질산성 질소제거

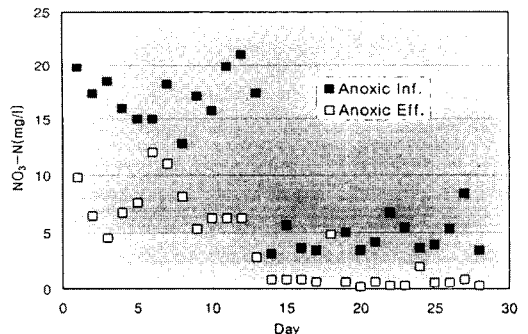


Fig. 4.9 내생탈질조건에서의 질산성 질소제거

Fig. 4.10은 2차 침전 반송슬러지내의 질산성 질소농도에 따른 혐기조에서의 인방출농도를 나타낸 것으로서 반송슬러지내의 질산성 질소농도가 낮을수록 혐기조에서 인방출농도가 증가함을 알 수 있다.

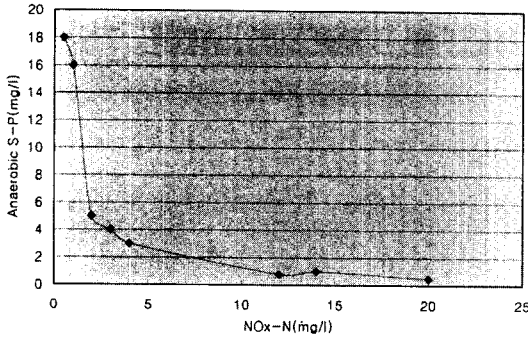


Fig. 4.10 반송슬러지내의 NO<sub>3</sub>-N농도에 따른 혐기조에서의 인방출농도

Fig. 4.11은 Phostrip공정의 탈인조 상등액의 S-COD농도를 나타낸 것으로서 슬러지 농축조와 같은 탈인조에서는 혐기성 발효에 의한 Cell분해가 되어 용해성 유기물 농도가 증가함을 알 수 있다.

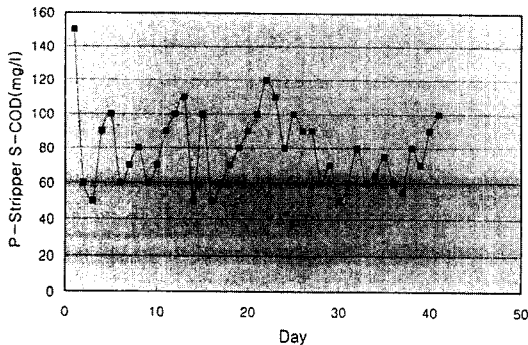


Fig. 4.11 Side-Stream프로세스의 탈인조상등액의 S-COD농도

Fig. 4.12는 탈인조에서 반송슬러지의 질산성 질소 농도에 따른 인 방출농도를 나타낸 것으로 탈인조에서 인 방출에 질산성 질소의 영향을 덜 받는 것으로 Fig. 4.13과 같은 탈인조의 구조적인 장점 때문이다. **環境保全**

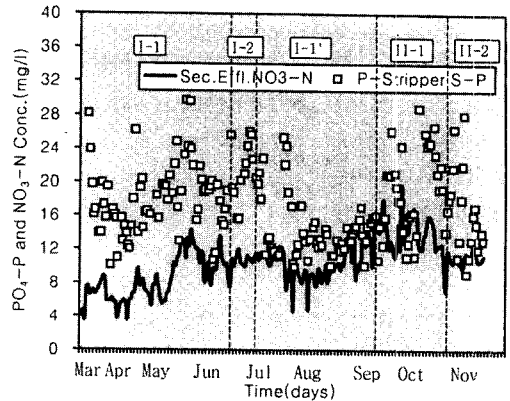


Fig. 4.12 탈인조에서 NO<sub>3</sub>-N의 유입에 따른 인방출 농도

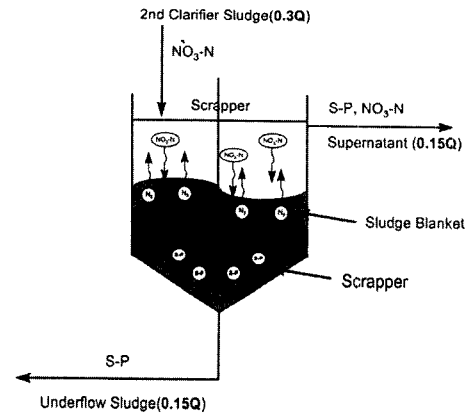


Fig. 4.13 탈인조에서 인 방출을 위한 질산성 질소 영향 저감원리

- 약 력

- 충북대학교 화학공학과 졸업
- 인하대학교 대학원 환경공학 석사·박사

- 특 허

- 생물학적 인·질소 제거장치 및 방법(한국, 영국, 일본)
- 왕겨를 이용한 활성탄 제조공법(한국, 중국, 태국, 베트남)
- 하나로 생물학적 인·질소제거 고도처리 장치 및 방법(한국, 일본, 중국, 말레이시아, 인도, 러시아)
- Phostrip을 개조한 생물학적 인·질소제거장치 및 방법(한국, 독일, 중국)