

# 생물학적 인 제거원리 및 공정



\*김창원 · 한기백

(\*부산대 환경공학과 부교수, 경주전문대학 환경공학과 조교수)

## 목 차

1. 부영양화와 인의 규제
2. 생물학적 폐수처리시 인제거
  - 2.1 일반 생물학적 폐수처리 공정
  - 2.2 생물학적 고율 인 제거 공정
3. 생물학적 고율인 제거 메카니즘
  - 3.1 인 농축 박테리아
  - 3.2 혐기성 반응기의 산화환원 전위
  - 3.3 기질 특성 및 상관관계
4. 생물학적 고율인 제거 공정
  - 4.1 인 제거 공정
  - 4.2 인 및 질소 통합 제거 공정
5. 인 제거 공정 설계
  - 5.1 공정 선택 조건
  - 5.2 공정설계시 고려사항
6. 참고문헌

## 4. 생물학적 고율 인 제거 공정

EBPR을 위한 다양한 형태의 공정이 개발되어 왔으며 아래에 이들의 특징을 비교 검토하여 정리하였다. EBPR공정은 인 만을

제거하는 공정과 인 및 질소를 함께 제거하는 공정으로 구분할 수 있으며, 전자는 다시 mainstream 공정과 sidestream 공정으로 구분할 수 있다. 인 만을 제거하는 공정은, 질산화반응이 일어나는 공정에서는 반송슬러지내에 질산염의 농도가 높아져서 인 제거 효율이 떨어질 염려가 있다.

### 4.1 인 제거 공정

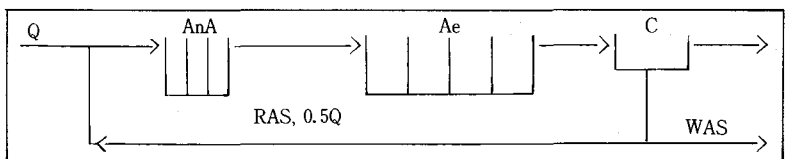
1) A/O(anaerobic / oxic) process(Hong et al., 1981 : Air Products and Chemicals, Inc)

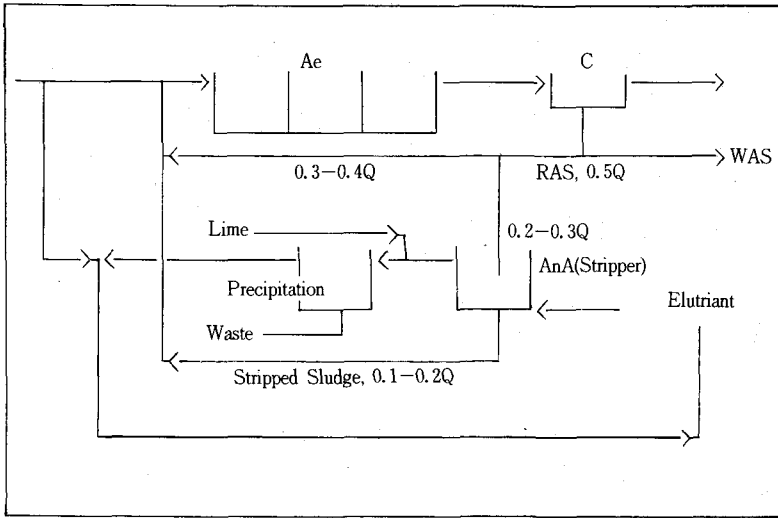
Phoredox Process(Barnard, 1976)와 동일한 형태인 혐기성 / 호기성 반응조로 구성되어 있으며, 차이점은 단지 혐기성 반응조는 3개, 호기성 반응조는 4개의 완전혼합

조로 칸막이되어 있다는 것이다. SRT가 비교적 짧고 유기물 부하율이 높은 고율로 운전하여, 슬러지 생산량이 높아 Modified Bardenpho process보다 인제거율이 높고 결과적으로 mainstream인 제거 공정보다 단위 BOD당 인 제거량이 가장 높다. 다음 그림에서 Q=유량, AnA=혐기성 반응조, Ae=호기성 반응조, C=침전조, RAS=반송슬러지, WAS=폐슬러지를 나타낸다.

2) Phostrip process(Levin and Shapiro, 1965)

반송슬러지의 일부를 sidestream인 혐기성 반응조 (Stripper tank, SRT 8-12 혹은 5~20 hrs)에 유입하여, 여기에서 인을 방출시켜 슬러지로부터 세척해내어 lime으



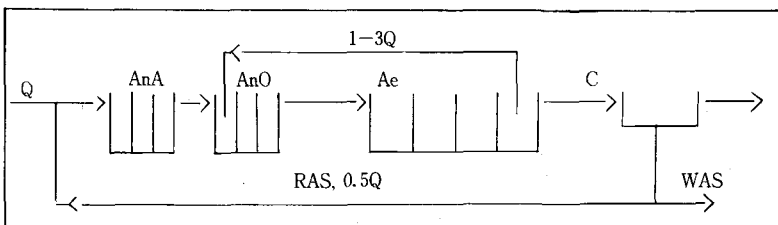


로 응집침전 시킨다. 처리수의 총 인농도는  $1\text{mg}/\ell$  이하로도 가능하며 폐슬러지에 의한 인 제거량도 일반폐슬러지 보다 약 50~100%가 높다. 최대의 장점은 여타의 생물학적 인체거공정에 비해 원폐수의 TBOD<sub>5</sub>에 민감하지 않다는 점이다. 그리고 pH에 영향이 큰 lime 요구량이 mainstream 화학적 인체거 공정보다 작게 소요된다.

#### 4.2 인 및 질소 통합 제거 공정

##### 1) A<sup>2</sup>/O process

A/O process의 변환공법으로 혐기, 호기성 반응조 사이에 3개 칸막이된 anoxic 반응조를 추가하여 ammonia만을 제거하거나 nitrate까지 제거하여 N, P 제거가 가능하다. N제거율은 40~70%정도이



**비교적 일반적인 질소농도를 함유한 폐수에서 질소까지 제거해야 되는 경우에는, mainstream 인 처리후 화학처리 및 유출수 TSS 제거방법 등에 의해서 방류수 인 농도를 낮출 수 있다. 이에 비하여 sidestream 처리공정은 원폐수 강도에 덜 민감하기 때문에 저유기물농도 폐수의 인 제거는 sidestream이 유리한 편이다.**

며 P 제거율은 A/O process보다 약간 낮다. AnO는 anoxic(무산소)반응기를 의미한다.

2) Modified(Five stage) Bardenpho process(Osborn and Nicholls, 1978; Eimco)

4단계인 Bardenpho공정 앞에 혐기성반응조를 추가하여 5단계로 변환시킨 공정이다. 고부하율 공정인 A/O, A<sup>2</sup>/O 공정에 비하여, Five-stage Bardenpho 공정은 질소제거 성능을 향상시키기 위해서 저부하량으로 설계한다.

혐기성 반응조-발효 및 인 방출, 반송슬러지는 입구부근에 유입

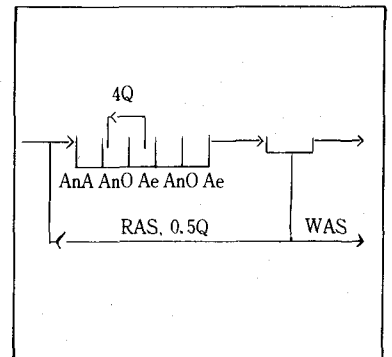
1차 anoxic-탈질 반응(nitrate → N<sub>2</sub> gas, 질산염 70% 제거)

1차 호기성 반응조-탄소원 산화, 질산화 반응, 인 섭취

2차 anoxic반응조-추가 탈질반응

2차 호기성 반응조-충분한 산소공급으로 2차 침전조에서 혐기화에 따른 인방출 방지

총 SRT는 대개 10~20일 유지하며, 방류수는 총인농도는  $3\text{mg}/\ell$  이하로 처리 가능하다.

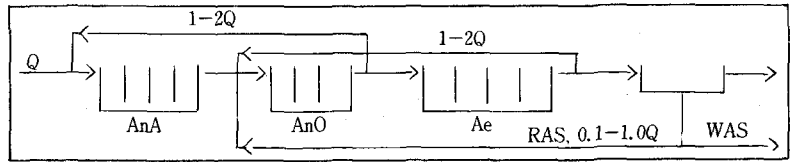


3) UCT (University of Capetown) process (Ekama et al, 1984)

Modified Bardenpho Process의 변형공정으로 nitrate의 인제거에 미치는 영향을 고려하여, 반송슬러지를 anoxic 반응조에 유입하여 탈질반응후 낮은 질산염농도 하에서 혐기성반응조에 회송하여 인방출도록한다. 2차회송율을 조절하여 탈질반응을 조절하여 반송슬러지에 함유되어오는 1차회송 슬러지내 nitrate농도를 극소화한다. 결과적으로 공정상 탈질능력을 완전히 활용치 못하는 문제점이 있어 다음에 소개된 변형공정이 개발되었다. 원폐수내 TKN / CODsol 비율이 높은 폐수에 적용이 유리하다. SRT는 13~25일이다.

유기물부하를 높여 인 섭취량을 증가시키고자하는 것과, 고부하율로 운전하여 바이오매스 농도를 높여 인제거율을 높임으로써 반응기 용적을 감소시키고자하는 것이다. SRT는 UCT공정보다 아주 짧은 5~10일 이다.

비교적 일반적인 질소농도를 함유한 폐수에서 질소까지 제거해야 되는 경우에는, mainstream 인 처리후 화학처리 및 유출수 TSS 제거방법 등에 의해서 방류수 인 농도를 낮출 수 있다. 이에 비하여 sidestream 처리공정은 원폐수 강



### 5) Sequencing Batch Reactor (Irvine et al, 1985)

공정의 초기단계에서 반응조에

도에 덜 민감하기 때문에 저유기물농도 폐수의 인 제거는 sidestream이 유리한 편이다.

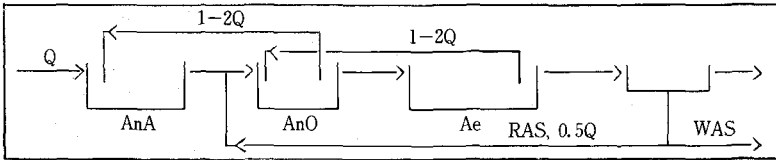
#### 2) 질소 제거정도

-질소(암모니아 및 총질소) 제거않할 경우 : A/O 혹은 Phostrip 공정 채택. Phostrip 공정은 추가 처리 없이 방류수 총인 1mg / l 도달 가능. A/O는 처리정도가 조금 떨어짐. O&M cost는 Phostrip 이 높다.

-질산화반응 혹은 부분 탈질로 부분 질소 제거의 경우 : 질산화반응과 총질소를 6~12 mg / l 까지만 요구하는 경우에는 anoxic 반응조 1개로 충분함 A<sup>2</sup>/O공정, 20 이하인 경우는 UCT, VIP 공정 채택.

-대부분의 총질소 제거할 경우 : Five-stage Bardenpho 공정 채택. 유출수 총질소 3mg / l 이하 가능하고 인처리도 양호함. 단 T-BOD<sub>5</sub> / TP 비율이 20 이하인 경우에는 A<sup>2</sup>/O 공정처럼 인 제거효율이 낮아질 수 있음.

이상의 공정선택을 위한 기본조건을 검토한 결과를 표 2에 요약하였다.

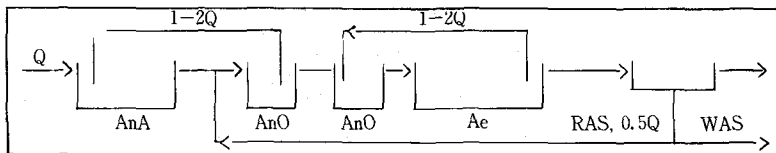


Modified UCT process는 위에서 제기된 문제점을 해소하기 위해 anoxic 반응조를 2개로 구분하여, 1차 anoxic반응조는 반송슬러지내의 nitrate농도 감소 목적, 2차 anoxic반응조는 호기성반응조로부터 슬러지회송을 받으며 대부분의 nitrate 제거가 주목적이 된다.

폐수 주입후 혼합만 하는 혐기성 발효 기간을 추가하여 CODsol 섭취 및 인 방출 유도함으로써 인 제거가 가능하다.

## 5. 인 제거 공정 설계

### 5.1 공정 선택 조건



### 4) VIP (Virginia Initiative Plant) process (Daigger, 1988)

공정의 기본 개념은 UCT 공정과 같다. 차이점은, 각 반응조를 여러개의 직렬 완전혼합조로 구성하여 호기성반응조 첫째 구역의

### 1) TBOD<sub>5</sub> / TP 비율

TBOD<sub>5</sub> / TP 비율이 20 이하인 경우에는, mainstream 처리공정으로는 방류수 총인 농도를 1~2mg / l 이하로 낮추는 것이 상당히 어렵다고 알려져 있다(EPA, 1987).

표 2. Criteria for enhanced biological phosphorous removal processes

Process	Nit / Denit	Eff. TN conc. mg / ℓ	Sensitivity to TBOD <sub>5</sub> / TP ratio
A / O	no / no	not sufficient	moderate
Phostrip	no / no	not sufficient	low
A <sup>2</sup> / O	yes / yes	6-12	high
UCT	yes / yes	6-12	low
VIP	yes / yes	6-12	low
Bardenpho	yes / yes	3	high

### 5.2 공정설계시 고려사항

공정설계에 대한 세부사항은 다음 자료를 참조하기를 바란다. 여기에서는 중요한 몇가지 사항만을 검토하기로 한다.

Phostrip, A / O · A<sup>2</sup> / O, Bard-  
enpho : Design Manual for Phos-  
phorus Removal(EPA, 1987).

UCT : Ekama et al., 1984.

VIP : Daigger et al., 1988.

Sidestream 공정설계시 고려사항은 Phostrip 공정에서 이미 검토되었으며, Mainstream 공정에서 공정설계시 중요한 고려사항은 환경인자 (DO, 온도, pH), 설계인자 (SRT, 혐기성반응조 HRT, 호기성반응조 HRT), 기질가용성 (원폐수 특성, VFA농도, 질산염 농도)등으로 자세히 검토하면 다음과 같다.

#### 1) 환경인자

- 폐수 온도 : 질산화 / 탈질 반응에도 온도가 중요한 영향을 미치나 인 제거에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 현재까지는 보고되고있다.

- 호기성반응조의 용존산소 : 용존산소가 증가되면 인 제거속도는 증가되나 인 제거량에는 별 영향이 없다고 하나 충분한 연구가 되어있지 않다. 경험적으로 적정 용존산소는 1.5~3mg / ℓ로 알려져 있다. 용존산소가 이보다 낮으

면 인제거 감소, 질산화반응에 부영양, 벌킹문제 등이 발생한다. 이보다 더 높으면 탈질저하, 질산염 증가에 의한 인제거에 영향을 받는다.

- pH : 6.5~8.5사이에는 큰 영향이 없으나 최적 범위는 7.5~8.0이다.

#### 2) 설계인자

- SRT : BOD 산화, 질산화반응 및 탈질반응을 위해서는 가능하면 긴 SRT를 요구하나, 긴 SRT에서는 슬러지 발생량이 적기 때문에 단위 BOD당 인 제거율이 현저히 감소된다. 따라서 적절한 인 제거를 위해서는 될수록 짧은 SRT에서 운전하는 것이 바람직하다. A / O와 같은 고부하율공정은 짧은 SRT에서 (5~10일), Five-stage Bardenpho와 같은 저부하율공정은 긴 SRT(15~20일)에서 운전한다.

- 혐기성반응조 HRT : 발효반응이 충분하여 VFA 생산이 효율적이고, 농축박테리아가 CODsol (휘발성인 유기산, VFA)을 섭취하기에 충분한 HRT를 제공해야 하는데 보통 1~2시간이다. TBOD<sub>5</sub> / TP 비율이 낮거나 입자상 유기물이 많은 원폐수 일수록 긴 HRT가 요구된다. 그리고 유기물부하가 높을수록 유기물 섭취율이 높으므로, 혐기성반응조가 CSTR

보다는 Plug Flow Reactor 형태가 유리하다.

- 호기성반응조 HRT : oPsol 섭취에 충분한 시간이 요구되며, 인 섭취율은 10~30mgP / ℓ-hr 이고 (Comeau, 1989) 방출된 인농도는 대개 20~40mg / ℓ 이기 때문에 1~2시간이면 적정하다. 이는 DO와 PHV 농도에 영향을 받을 것으로 예상된다. 그리고 혐기성반응조의 HRT가 너무길면, VFA를 섭취하지 않고 인을 방출하여 세포내에 PHB가 부족하여지므로, 호기성반응조에서 인을 완전히 섭취하기 위한 에너지가 충분히 공급되지 못할 수도 있다(Barnard, 1984).

3) 기질 가용성 (substrate availability) 및 인제거능 (phosphorous removal capacity)

VFA : acetate, propionate와 같은 발효생성물이 많을수록 인 제거량이 많으나, 생성즉시 미생물에 의해 동화되기 때문에 인제거능을 측정하기 어렵다. 짧은 SRT에서, 유입수 용존 BOD / P 비율이 20~30(15이하, Hong et al., 1982) 일 때 유출수 용존인을 1mg / ℓ 이하로 얻을 수 있으나, 이는 SRT 및 질산염 농도에 영향을 받는다. 신선하고 입자상기질이 많고, 산소가 풍부한 원폐수는, 원폐수 자체 혹은 일차 침전시킨 슬러지를 발효시켜 용존상태이나 복합적인 유기물과 입상 유기물로 부터 단순 용존 유기물을 생산할 수 있다(Nichols and Osborn, 1979; Barnard, 1984). 단위 VFA (혹은 acetate, HAc) 당 제거되는 인의량은 세포 수율(cell yield)과 폐활성 슬러지의 인 함량이다. pilot plant

및 현장실험에서 대개 6.4~8.9g VFA 주입시 1g의 인이 제거되었다는 보고가 있다(Oldham and Stevens, 1985; Wentzel et al., 1988; Comeau, 1989).

- 질산염 : 혐기성반응조에서 질산염 1g에 대해서 약5g의 COD (혹은 3.4 g BOD<sub>5</sub>)를 탈질박테리아가 소모하므로 인농축박테리아가 사용할 VFA가 부족해지므로, 질산염 유입을 차단할 대책이 요구되며, 따라서 저유기물 농도 폐수의 경우가 더 문제가 된다.

#### 4) 기타고려 사항

원폐수의 전처리가 없을 때 EBPR은 부유성 미생물을 이용한 활성슬러지 공법에만 적용이 가능하고 부착성 미생물막 공정인 회전원판 공법 (RBC)이나 유동층 공법(fluidized bed)에는 적용이 어렵다는 제한점이 있다. 부착성 미생물막 공정에서의 인제거 방법의 개발이 필요하다.

그리고 *Acinetobacter* spp.가 저지방산 및 아세트산과 같은 저분자량 물질을 기질로 하기 때문에 폐수의 특성에 따라서 적용범위가 역시 제한되어진다(Potgieter and Evans, 1983). 따라서 폐수의 특성, 특히 저지방산 및 아세트산의 함유량이 *Acinetobacter* spp.의 성장율과 인 제거율에 미치는 영향 및 이에 대한 대책의 연구가 요구되고 있다.

폐슬러지 중에는 고농도의 인이 함유되어 있으므로 슬러지처리공정상에 혐기성소화시는 물론 이러니와 호기성 소화시에도 인이 방

출된다. 공기부상법 등으로 농축하여 바로 탈수, 소각 혹은 퇴비화되는 것이 바람직하다.

대부분의 EBPR 공정은 적정운전시 유출수 인 저감능력이 아주 우수하다. 비정상적인 경우를 대비하여 화학응집침전 혹은 방류수 여과공정을 고려할 필요도 있다.

일반적으로 유출수 SS는 5~30mg / ℓ인데 이 부유물질에는 총인이 포함되어있다. EPBM에서는 이에 의한 총인이 TSS의 6%까지도 될 수가 있기 때문에 중요한 고려 사항이 된다.

## 6. 참고문헌

- 1) Arvin, E. (1985) : Biological removal of phosphorus from wastewater. *CRC Crit Rev. Envir. Control* 15, 25-64
- 2) Barnard J.L. (1976) : A review of biological phosphorus removal in the activated sludge process. *Water SA*, 2(3), 126-144.
- 3) Comeau Y. et al. (1987) : Dynamics of carbon reserves in biological dephosphatation of wastewaters. In *advances in water pollution control; Biological phosphate removal from wastewaters*. PP. 39-55. Pergamon Press, Oxford.
- 4) Fuhs & Chen (1975) : Microbiological basis of phosphate removal in the activated sludge process for the treatment of

wastewater. *Microb. Ecol.* 2, 119~138

- 5) Fukase T. et al. (1982) : Studies on the mechanism of biological phosphorus removal in biological sewage treatment processes *Jap. J. Wate. Pollut Res.* 5, 309-317
- 6) Geber A. et al. (1986) : The effect of acetate & carbon compounds on the Kinetics of biological nutrient removal. *Wat. Sth. Afr.* 12, 7-12.
- 7) Hart M. A et al. (1982) : Microbiology of nutrient removing activated sludge. *Wat. Sci. Technol.* 14, 1501-1502
- 8) Hong S. et al. (1981) : A biological wastewater treatment system for nutrient removal, Presented at the 54th Annual Conference WPCF.
- 9) Levin, G.v. et al. (1965) : Metabolic uptake of phosphorus by wastewater organisms, *WPCF* 37, 6, 800-821
- 10) Marais, G.v. et al. 1983(15) : Observations supporting phosphate removal by biological excess-uptake-A review. *Wat. Sci. Techno. South Africa*
- 11) Nichols H. A. and Osborn D. W. (1979) : Bacterial Stress : Prerequisite for Biological removal of phosphorous. *WPCF.* 557-569
- 12) U.S Environment Protection Agency Design Manual (1983) : phosphorus Research EPA / 625 / 1-877 / 001

# 눈길모아 오염예방 마음모아 환경보전