

Step feed system과 dPAO 미생물을 이용한 5-stage BNR 기술

삼성엔지니어링 기술연구소

1. 서론

우리 나라 하수의 특성은 낮은 유기물 농도에 비하여 질소 및 인의 농도는 상대적으로 높아 낮은 COD/N, COD/P비를 나타낸다. 낮은 C/N, C/P비를 나타내는 하수로부터 안정적으로 질소 및 인을 제거하는 것이 어려운데 이는 질소 및 인의 제거에 필요한 유기물이 부족하기 때문이다. 분류식 하수관거가 설치된 지역에서 발생하는 하수의 경우 합류식 하수관거에 비하여 유기물 농도가 높게 나타나지만 질소 및 인의 농도가 높아 C/N, C/P비가 낮게 나타나는 것으로 보고되고 있다. 유기물이 부족한 하수로부터 안정적으로 질소와 인을 제거하기 위해서는 외부탄소원을 이용하여 공급하거나 질소 및 인을 제거하는데 필요한 유기물의 소모가 적은 공정의 적용이 필요하다.

제한된 유기물을 가지고 질소와 인을 제거하기 위해서는 질소제거 및 인 제거에 필요한 유기물을 적정하게 공급하는 것이 유기물 이용효율을 극대화시키는 방안이다. 일반적으로 알려진 이론적인 질소제거에 사용되는 유기물은 $3\text{gCOD/gNO}_3\text{-N removed}$, $2\text{gCOD/gPO}_4\text{-P removed}$ 정

도 되지만 실제 현장에서는 $5\sim 10\text{gCOD/gNO}_3\text{-N removed}$ 및 $5\text{gCOD/gPO}_4\text{-P removed}$ 로 나타나고 있다. 이는 이론적인 탄소요구량보다 훨씬 많은 탄소원이 필요하다는 것을 의미하며 국내에서와 같이 질소, 인 농도에 비해 상대적으로 낮은 유기물을 가지고 질소와 인을 동시에 고효율로 제거하기에는 기존 영양소제거 공정으로는 어려움이 있다는 것을 의미한다. 이를 해결하는 방안 중에 한 방법은 원수 유기물을 질소제거 및 인 제거에 필요한 양을 산정하여 주입하는 방법이(step feed system) 있다. 이는 원수를 anaerobic조 및 anoxic조에 효과적으로 분배하는 것이 이론적으로 필요한양으로 줄이는 방법이다.

또한 국내하수 특성으로 보아 질소 및 인을 제거하는데 필요한 유기물의 소모가 적은 공정을 개발하여 적용하는 것이 효과적이며, 이러한 방법들 중에는 Sharon(single reactor high activity ammonia removal over nitrite) 공정과 Anammox(anaerobic ammonium oxidation) 공정 및 dPAO(denitrifying phosphorus accumulate organisms)를 이용하는 것 등이 있다. Sharon 공정은 고농도 암모니아성 질소를 $\text{NO}_2\text{-N}$ 으로 아질산화시키는 공정으로 기존 질산화에

비해 25% 가량의 산소소요량을 줄일 수 있고 탈질에서도 40% 가량의 탄소원 소요량을 절감시킬 수 있는 공정이며, Anammox 공정은 탄소원의 공급 없이 암모니아성질소를 전자공여체로 이용하여 탈질반응이 일어나는 공정이다.

PAO(phosphorus accumulate organisms)에서 최종전자수용체를 질산성 질소와 산소를 이용가능한 미생물을 dPAO 미생물이라고 하며, anoxic 조건에서는 PAO 미생물들이 질산성질소를 최종전자수용체로 이용하여 생물대사반응을 하는 과정에서 PHB 산화 및 탈질반응이 일어난다. dPAO 미생물은 인을 세포 내에 저장하는 미생물 중에 탈질능력이 있는 미생물로 이러한 미생물은 혐기성 상태에서 VFA(volatile fatty acids)를 PHA(poly-β-hydroxy-alkanoates)형태로 세포 내에 축적하는데 이때 필요한 에너지를 ATP(adenosine triphosphate)를 ADP(adenosine diphosphate)로 전환하여 얻는다. dPAO를 이용하여 질소 및 인을 제거할 경우 anaerobic조에서 세포 내에 축적된 유기물을 anoxic조에서 탈질반응에 사용하므로써 보다 많은 질산성 질소의 제거가 가능해 지며 호기조건에서 PHA를 산화하기 위해 필요한 산소요구량을 줄일 수 있다. 또한 작은 미생물 증식으로 인하여 슬러지 생산량을 줄일 수 있다는 장점이 있다.

본 기술은 유입원수를 pre-anoxic, anaerobic 및 anoxic조에 step feed 방식을 적용하여 수행한 pilot 결과와 dPAO 미생물 분리동정에 대한 결과를 소개하고자 한다.

2. 핵심기술

2.1 5-stage BNR 공정기술

"Pre-anoxic, Anaerobic, dPAO, Anoxic, Oxid조로 구성되어있는 5-Stage BNR(Biological Nutrient Removal) 공정 기술"

- Pre-anoxic조에서는 후속되는 anaerobic조에서의 혐기

성상태를 유지하기 위해 pre-anoxic조로 반송되는 슬러지내 질산성질소를 유입되는 원수에 포함된 유기물을 이용하여 제거하는 조

- Anaerobic조에서는 pre-anoxic조를 거친 처리수와 유입원수를 이용하여 인제거 미생물들이 세포내에 PHA를 저장하며 인을 방출하는 조
- dPAO조에서는 oxic조로부터 내부순환되는 하수내에 포함된 질산성질소를 혐기조를 거친 처리수와 혼합되어 탈질반응과 인 섭취반응이 동시에 일어나는 조
- Anoxic조에서는 dPAO조를 거친 처리수와 원수 유입수가 혼합되어 질산성질소를 탈질시키며 유기물이 대부분 산화되는 조
- Oxic에서는 anoxic조를 거친 처리수내에 포함된 암모니아성질소를 산화시키며 잔존유기물질을 산화시키며 일부는 dPAO조로 내부순환시키며 나머지는 침전지로 자연 유하 되도록 하는 조
- 공정 구성도

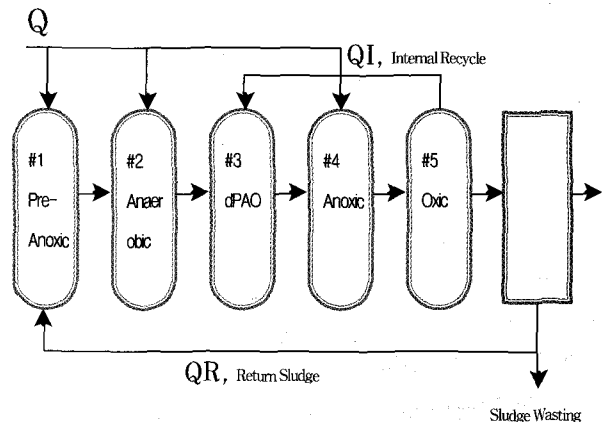


Fig. 1 Schematic diagram of 5-stage BNR using dPAO

Table 1 Operating Characteristics of 5-stage BNR using dPAO

구분	1	2	3	4	5
	Pre-anoxic	Anaerobic	dPAO	Anoxic	Oxic
HRT(hr)	0.5	1.0	0.5	2.0	4.0
MLSS(mg/L)	8,000-12,000	5,000-6,000	2,500-4,500	2,500-4,500	2,500-4,500
반송율 (Influent basis)	33	-	200	-	-
유입유량 (Influent basis)	10	60	-	30	-

2.2 유입원수가 Step Feed 되는 System

“유입원수를 pre-anoxic, anaerobic 및 anoxic조에 분배 주입하는 step feed system을 이용하여 질소와 인을 제거하는 기술”

- Step Feed System은 원수내 포함된 유기물을 질소제거와 인제거에 효율적으로 이용할 수 있어 질소와 인 제거 효율이 향상되는 기술
- 반송슬러지내 함유된 질산성 질소를 제거하는데 필요한 유기물은 pre-anoxic조로 유입되어 후속 되는 Anaerobic 조에서의 안정적인 혐기성 상태 유지가 가능하다.
- Step feed system에서 유량 분배율은 처리대상하수의 특성【C/(N+P), 온도, pH, alkalinity】및 처리수질 조건에 (N, P) 따라 효율적 배분이 가능한 기술
- S처리장에 대한 분배율은 pre-anoxic조, anaerobic조, anoxic조로 각각 10, 60, 30%로 되어있음.

2.4 슬러지 발생량이 적은 기술(Long SRT 평균 20d 이상)

“원수 유입 유기물이 oxic조 이전 반응조에서 제거되며 탈질미생물, 질산화미생물 및 dPAO미생물 증식계수가 작

어 반응조내 적정 미생물 농도를(3,000~4,000mg/L MLVSS) 유지하기 위해서는 SRT를 길게 유지하여 슬러지 발생이 적은 기술”

- 슬러지 발생량은 탈질미생물(0.18gVSS/gCOD제거) 및 질산화미생물의(0.12gVSS/gNH₄-N) Y 값이 작기 때문에 반응조내 미생물을 3,000~4,000mg/L 를 유지하기 위해서는 20일 이상의 SRT를 유지하여야 함
- 본 공정에서 발생하는 슬러지량은 제거되는 COD 당 세포합성계수를 측정하면 0.25 ~ 0.30gVSS/gCOD제거 정도 된다.

2.5 dPAO 미생물을 이용하는 기술

“ Anaerobic 유출수와 oxic조 반송수가 dPAO조로 유입되어 탈질·탈인 반응이동시에 일어나는 dPAO 미생물을 이용하는 기술 ”

- dPAO(denitrifying Phosphorus Accumulate Organisms) 미생물은 혐기성상태에서는 일반 PAO와 동일한 기작을 일으키며, anoxic 상태에서는 Electron acceptor로 nitrate를 이용하여 혐기성조에서 세포내에 축적된 PHA를 산화하며 이때 획득한 에너지를 이용하여 ATP를 생성한다.
- 그러므로 dPAO를 이용한 공정에서는 유기물이 없는 anoxic 상태에서 인의 섭취반응과 탈질반응이 동시에 일어나는 효과적인 기술이다.

3. 연구개발 결과

3.1 유기물 제거

본 연구의 유입원수로 사용한 S하수종말처리장의 유기물 농도가 계절에 변화하며, 가을철보다는 겨울철에 농도가

증가하는 것으로 나타났다. 본 공정은 유입수가 각각의 반응조에 나뉘어 주입되므로 유입원수의 주입율에 따라 각 반응조에서 제거되는 유기물의 양이 다르게 된다. 각 반응조내의 용존성 유기물의 농도를 측정된 결과 anoxic조나 oxiaic조 및 처리수의 유기물 농도는 거의 비슷하게 나타났는데 이는 대부분의 용존성 유기물은 anaerobic조 및 anoxic조에서 제거된다고 볼 수 있다. 처리수의 BOD와 COD농도는 5 mg/L 및 20~30mg/L 이하로 안정적인 처리결과를 나타내었다. Fig. 2는 환경관리공단에서 수행한 환경기술평가 결과를 나타내며, 평균 제거율은 96%로 나타났다.

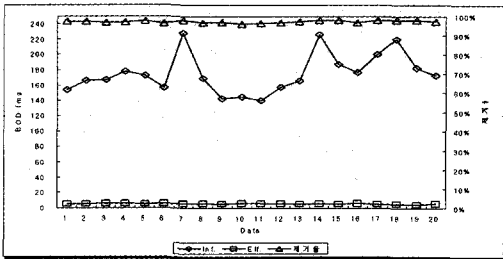


Fig. 2 BOD vs Influent, Effluent & Removal Rate

3.2 질소 제거

(1) 질소 제거

S 처리장에 유입되는 T-N 농도는 평균 41mg/L(25~56.6 mg/L) 였으며 처리수의 수질은 평균 10mg/L 이하로 처리되었다. 평균 제거율은 78% 이며, 암모니아의 제거율은 98%로 나타났다. Fig.3은 유입수 및 처리수 수질과 제거율을 나타낸 그림이다.

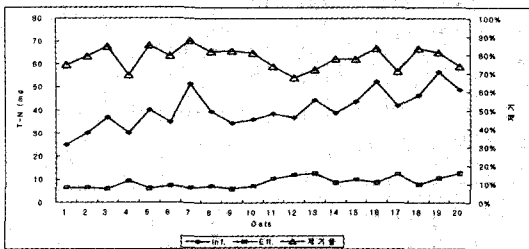


Fig. 3 T-N vs Influent, Effluent & Removal Rate

또한 각 반응조에서의 TIN제거량을 보면 다음 Fig. 4와 같으며 2/3 이상이 dPAO조와 anoxic조에서 제거되는 것을 알 수 있다.

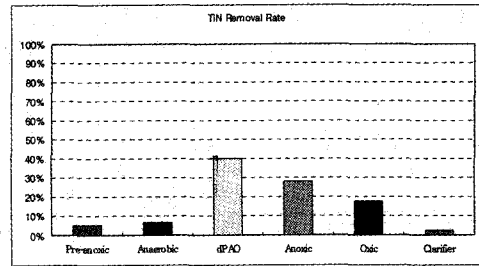


Fig. 4 TIN vs Removal Rate

(2) 비질산화율(SNR; Specific Nitrification Rate)

Oxic조에서는 유기물 제거보다는 암모니아를 산화시키는 질산화 미생물의 활성이 증가하게 되어 질산화가 잘 일어나는 것으로 나타났다. 동일한 유입수를 이용하여 동일한 조건에서 운전된 A2/O공정에서 발생한 슬러지를 이용한 질산화 실험결과 본 공정에서 발생한 슬러지의 비질산화율이 50% 이상 크게 나타났다. 실험결과 유입수 암모니아 농도가 30mg/L 이상일 때 본 공정의 비질산화율은 7.5 mgN O₃-N/gMv/hr로 A2/O 공정의 4.5 mgNO₃-N/gMv/hr보다 높게 나타났다. Fig. 5에 암모니아성 질소의 부하에 따른 제거된 암모니아성 질소의 양을 나타내는데 유입되는 암모니아성 질소가 모두 질산화 되는 것으로 나타났다. 실험결과 얻어진 비질산화율은 1.7~7.5 mgNO₃-N/gMv/hr로 나타났다. 실험결과 유입수내의 암모니아성 질소의 농도가 38 mg/L 일 때 완전한 질산화가 가능하였다.

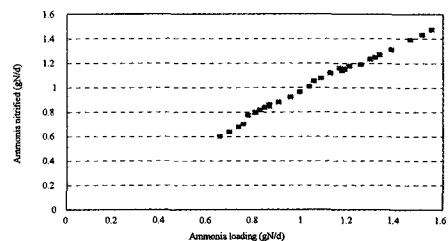


Fig. 5 Ammonia loading vs. ammonia nitrified.

(3) 비탈질율(SDNR; Specific denitrification rate)

실험 결과 dPAO조에서 비탈질율은 1.25 mgNO³⁻-N/gV SS/hr로 나타났는데 내생탈질율 0.3mgNO³⁻-N/gVSS/hr보다는 높고 anoxic조에서의 1.7 mgNO³⁻-N/gVSS/d보다는 작았다. dPAO조에서 비탈질율이 pre-anoxic조 보다 높고 유기물이 주입되는 anoxic조 보다 작은 것은 전자공여체로 혐기성상태에서 저장된 PHA 기질을 이용하는 것으로 판단되는데 회분식 실험을 실시한 결과 동일한 결과를 나타내었다.

원수가 유입되는 anoxic에서의 비탈질율은 외국 문헌자료와 비교해 볼 때 50~60% 정도로 나타났는데 이는 anoxic조로 유입되는 질산성질소의 양이 적었기 때문인 것으로 판단된다. Table 2는 본 실험을 통하여 구한 각 반응조에서의 비탈질율을 요약한 것이다.

구 분	Pre-anoxic	dPAO	Anoxic
평 균	0.8	1.0	1.7
최 대	1.7	3.8	2.9
최 소	0.4	0	0.4

Table. 2 SDNR at Ax reactor(mgNO₃-N/gMv/hr)

3.3 인 제거

Pre-anoxic 조 및 anaerobic조에서의 인 방출과 dPAO조 및 Oxid조에서의 인 섭취반응은 Pilot 운전기간 내내 안정화된 경향을 나타내었다. 유입수의 T-P 농도는 평균 5.7mg/L(4.2~7.2 mg/L) 였으며, 처리수내 인 농도는 0.5mg/L 이하로 방류되었다. 다음 Fig. 6은 각 반응조에서의 PO₄-P 농도 변화를 나타낸 것이다.

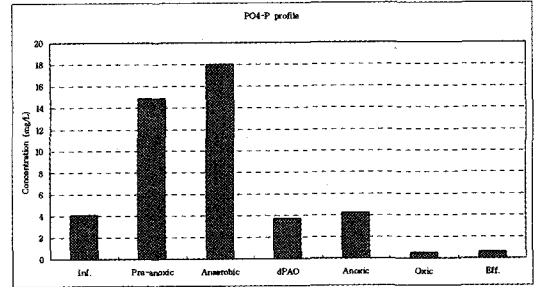


Fig. 6 Influent and effluent PO₄-P concentrations.

전체 제거량을 100%로 보고 각 반응조에서의 PO₄-P 제거량을 나타내면 다음 Fig. 7과 같다.

그림에서 pre-anoxic와 anaerobic조에서는 200%이상의 인 방출이 일어났으며, dPAO조와 oxid조에서의 인 제거가 이뤄진 것을 알 수 있으며, 30분 정도로 짧은 반응조 체류시간인 dPAO조에서 제거율이 oxid조보다 높은 것을 보면 dPAO 미생물이 존재한다는 것을 알 수 있다.

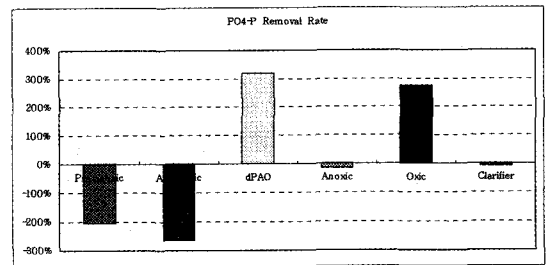


Fig. 7 PO₄-P Removal Rate

dPAO조에서의 SPUR은 혐기조에서 인 방출반응에 필요한 탄소원을 acetate로 사용한 문헌 값에 비해 20배정도 낮은 값이나 실 규모 연구결과인 0.9 mgP/gVSS/hr다는 2.5배 정도 높은 값이다. 이러한 연구결과의 차이는 인 방출에 사용한 기질종류와 체류시간의 차이에 의해서 발생하는 것으로 판단된다. 본 연구의 경우 dPAO조의 체류시간은 30

분으로 유지되었기 때문에 실 규모에서의 SPUR 값보다 높은 것으로 생각된다.

구분	SPRR	SPUR		
	Anaerobic	Pre-anoxic	dPAO조	Oxic
평균	1.7	0.06	2.0	0.8
최대	29	0.15	7.0	2.5
최소	0.4	-	0.4	0.4

Table 3 SPRR and SPUR (mgSP/gMv/hr)

3.4 슬러지 생산량

Pilot plant에서의 운전결과로 dPAO의 Yield coefficient를 다음 식을 이용하여 근거로 하여

$$W_{MT} = F[X_{10,T} + \frac{(1 + f_d \cdot b_H \cdot \theta_c) Y_{H,T} (S_{so} + X_{so} - S_s)}{1 + b_H \cdot \theta_c}$$

식에 대입하여 Pilot plant 전체의 Ynet값을 구하면 Ynet = 0.4gCOD/gCOD로 나타났다.

3.5 dPAO 미생물 동정 결과

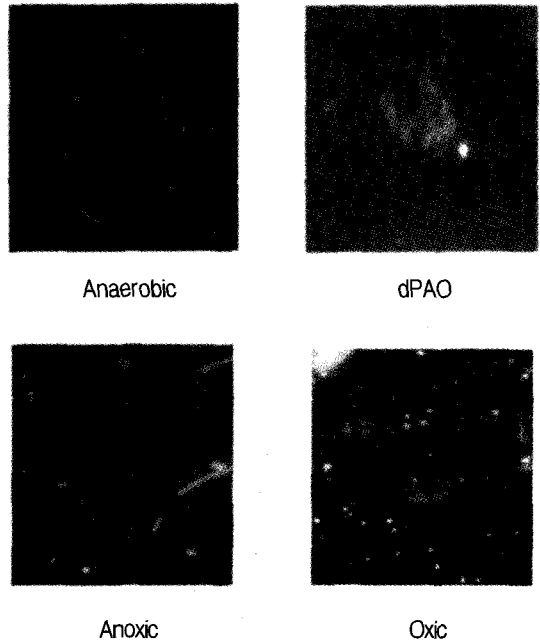
실험 결과는 R2A배지에서 성장한 미생물을 counting한 결과로 각 반응조에서 서식하는 미생물의 총수로 이들 미생물 중에는 탈질·탈인 미생물과 dPAO 미생물이 포함되어 있다.

각 반응조의 culturable bacteria 총수

- Anaerobic : 3.5×10^8 CFU/g
- dPAO : 6.2×10^8 CFU/g
- Anoxic : 4.9×10^8 CFU/g
- Oxic : 2.15×10^9 CFU/g

dPAO조와 oxic조가 다른 구획에 비해 많은 미생물이 서식하여 수처리에 관여한다는 결과를 얻었다. 즉 질소와 인을 제거하는 미생물이 많이 포함되어져 있음을 알 수 있다. 각각의 반응조에서 서식하는 미생물중 인을 축적하는 미생물과 dPAO 미생물의 분포를 증명하기 위해서 DAPI 염색 방법을 이용하여 직접 반응조의 시료에서 인축적 미생물의 분포를 조사였다. 이 방법은 슬러지에 서식하는 미생물 중 인을 축적하는 미생물은 밝은 노란색을 발하며 인을 축적하지 않는 미생물은 푸른 형광 빛을 발하게된다. 각각의 반응조에서 인을 축적하는 미생물의 분포는 다음 아래의 Fig. 7과 같다.

실험 결과 푸른색을 발하는 점은 각 zone에 서식하는 일반 미생물이며 밝게 노란빛을 발하는 점은 인을 축적하는 미생물이다. 따라서 dPAO조와 oxic조에서는 밝은 노란 색을 발하는 미생물이 많이 서식하고 있는 것을 보여주고 있다. 이와는 대조적으로 anaerobic조와 anoxic조에서는 인을 축적하는 미생물 분포가 현저하게 감소해 있음을 알 수 있었다.



4. 결 론

국내하수처리장과 같이 질소와 인 농도에 비해 유기물이 낮은 상태에서 영양소제거를 위해서는 유기탄소원을 효과적으로 사용가능한 공정을 적용하여 미생물에게 유기물이 이용효과가 극대화하는 방안이 필요하다.

이를 위한 방안으로 step feed system과 dPAO 미생물을

이용하는 방법이 질소와 인 제거 효율을 높일 수 있는 공정 중에 한가지 방안이다. 본 기술을 적용하면 질소 제거율을 80%까지 높일 수 있으며, 인 제거율은 90%의 높은 효율이 환경관리공단 현장 평가에서 입증되었으므로, 향후에 고도 처리시설을 적용해야 하는 처리장에서는 본 기술의 적용으로 많은 효과를 얻을 것으로 예상된다.



‘환경기술정보총람3’ 발간 예정

본연합회에서는 전국의 환경관리인 및 환경인들에게 기술정보 제공을 통해 업무에 도움을 주고자 국내 환경산업 현황을 총망라한 환경관리인의 지침서 ‘환경기술정보총람3’을 발간할 예정입니다.

- ◆ 발간예정일 : 2001년 6월경
- ◆ 거제내용 : 업체별환경기술정보, 환경기술자료, 환경정보자료, 환경관련 업체현황, 환경관리인 주소록 외 회원들이 반드시 알아야 할 환경상식
- ◆ 발행예정부수 : 3만부
- ◆ 판매가 : 50,000원
- ◆ 원고마감 : 2001년 5월 10일
 - 업체별 환경기술정보와 관련하여 신기술이나 제품소개를 원하시는 업체는 4월 30일 까지 본연합회 사무국으로 원고를 작성 하여 보내 주십시오. 보내 주신 원고는 성의껏 게재해 드리겠습니다.

원고 및 광고 문의

전화 (02)852-2291(대) 팩스 (02)852-2294
<http://www.kemf.or.kr> E-mail : kemf@kemf.or.kr

[사]전국환경관리인연합회