

## 간헐포기 활성슬러지 중수처리공정의 현장적용 연구

서인석 · 김병균 · 박승국 · 권선용\*

한국수자원공사 수자원연구소 수도연구부 수처리팀

\* 한국수자원공사 총무관리처

### A Study on the Field Application of Intermittently Aerated Activated Sludge Process for Water Reuse System

In-Seok, Seo · Byung-Goon, Kim · Seung-Kook, Park · Sun-Woong, Kwon\*

*Water Supply & Sewerage Research Team, WRRRI, KOWACO*

*\* General Administration Dept. KOWACO*

#### Abstract

Intermittently aerated activated sludge process was applied as a water reuse process of 70 m<sup>3</sup>/day for the upgrade of organic, nitrogen and phosphorus removal efficiency and clarifier performance.

After application of the intermittently aeration, removal efficiency of BOD, SS, T-N and T-P were achieved 95%, 90%, 80% and 60%, respectively. Removal efficiencies in intermittently aerated process were considerably increased, comparing to those of continuously aerated activated sludge process. Also sludge rising problem in clarifier was improved. Average concentration of supplied reusing water were BOD 5 mg/L, turbidity 4 NTU and after chlorination, residual chlorine 0.4 mg/L, coliform 0 MPN/100mL.

Intermittently aerated activated sludge process could be one of the best alternative process for the retrofit of conventional activated sludge process for the removal of nutrient in water reuse system.

**KEYWORDS** : Water Reuse, Intermittent aeration, Nitrogen, Retrofit

### 1. 서 론

최근 들어 한번 사용한 물을 적절하게 처리하여 재이용하는 중수도에 대한 관심이 고조되고 있다. 19세기 중반부터 물이 부족한 지역 및 나라를 중심으로 활성화되기 시작한 중수도는 수질환경의 개선 및 물 부족의 해결책으로 이용되고 있다. 최근 우리 나라에서도 롯데월드를 비롯하여 많은 건물에서 중수도를 적용하여 운영하고 있으며 시설은 점진적으로 증가하는 추세이다.<sup>1),2)</sup> 최근 들어 막(membrane)분리를 이용한 처리공정이 적용되기 시작하였으나, 대부분의 건물에서 운영중인 중수처리공정은 24시간 포기를 시키는 활성슬러지 공정의 변형 들이다. 비교적 깨끗하고 질소 및 인의 농도가 높지 않은 오수를 중수원수로 이용하는 경우에는 큰 문제점이 없으나, 식당에서 발생하는 오수 등을 중수원수로 활용하는 경우에는 고도처리의 필요성이 크다. 중수처리시설에서의 고도처리는 특히, 질소 및 인의 처리는 오수분뇨합병정화조를 비롯하여 하수처리시설과의 연계성도 고려하여 운영하는 방안이 검토되어야 한다.

간헐포기 활성슬러지 공정은 유입수중의 유기물을 질소 및 인 제거과정에서 효율적으로 활용하고 기존의 활성슬러지 공정에서 공기공급장치의 ON/OFF에 의해 적용이 용이한 운영방법으로 기존공정에서 질소 및 인의 효율증진을 위해 효과적으로 적용할 수 있는 공정이다. 간헐포기 활성슬러지 공정은 하나의 반응조 내에서 시간에 따라 포기 및 비포기 상태로 교대로 설정하여 운영하는 방법으로 기존공정인 A/O, A<sup>2</sup>/O 및 Bardenpho 공정 등이 호기, 무산소, 혐기조건을 공간적으로 배치한 운

영이라면, 간헐포기 공정은 시간적인 배치에 따른 운영방법으로 유입수의 특성에 따라 운영인자의 변형이 용이하며, 제거효율도 비교적 우수한 방법이며, 특히, 에너지를 절감 할 수 있다는 장점을 지니고 있다. New York에 있는 Owego 하수처리시설 및 Washington D. C.에 있는 Blue Plains 하수처리시설에서 간헐포기를 적용한 결과, 80% 이상의 총질소 제거효율을 얻었으며,<sup>3),4)</sup> Oxiditch 형태의 간헐포기 운영인 Schreiber 공정의 적용에 있어서도 효율이 우수한 결과로 나타났다.<sup>5)</sup> 간헐포기의 개념은 기존의 SBR 시스템에서도 적용한 예가 많다.<sup>6)</sup> USEPA<sup>5)</sup>에서는 간헐포기 형태의 운영에 있어서 중요한 설계 및 운영인자로서 포기/비포기시간, SRT 및 유입수중의 BOD/TKN의 비율을 지적하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 24시간 포기를 시키는 장기포기 형태로 운영되는 기존의 공정을 간헐포기 형태로 개선하여 유기물, 질소 및 인의 효율적 제거방안을 검토하고, 또한 간헐포기 활성슬러지 시스템과 같은 BNR(Biological Nutrient Removal) 공정이 중수처리공정으로서의 효율성을 평가하였다.

### 2. 실험재료 및 방법

#### 2.1 유입수의 특성

원수로는 식당에서 배출하는 오수를 비롯한 화장실 분뇨를 제외한 잡배수를 사용하고 있으며, 중수처리공정은 지하에 설치되어 있고 식당에서 배출되는 오수가 상당부분을 차지하기 때문에 실험기간(10월~2월)중인 겨울철에도 수온은 비교적 일정하고 20~23℃ 정도로 높

Table 1 Average concentration of wastewater used in this research

Unit:mg/L except pH, Turbidity and BOD/TN

Items	BOD	COD <sub>mn</sub>	SS	Turbidity(NTU)	pH	T-N	T-P	BOD <sub>5</sub> /TN
Concentration	156.6	104	112	88.9	7.01	16.3	4.95	9.57

았다. 본 연구에서 유입수로 이용한 오수의 특성은 table 1과 같다. 유입수는 한국수자원공사 본사 사옥의 식당에서 배출되는 오수 및 잡배수이며, BOD 농도는 평균 156.6 mg/L이며, 총질소(T-N) 및 총인(T-P)의 농도는 16.3 mg/L 및 4.95 mg/L 수준으로 비교적 낮아 BOD/TN 비는 평균 9.57 정도로 BNR(biological nutrient removal) 공정을 적용하기에는 비교적 좋은 조건이다.

**2.2 적용대상 중수처리공정의 개요**

중수처리공정의 1일 처리용량은 70 m<sup>3</sup>/day이며, 수리학적 체류시간(HRT)은 20 시간 정도로 장기포기 형태로 운영되고 있으며, 기존의 포기조 운영은 용존산소를 0.1~0.3 mg/L의 범위에서 상한과 하한치를 설정하여 DO 농도에 근거하여 자동적으로 송풍기를 ON/OFF 시키는 방법으로 운영되고 있다. 처리방법은 스크린→조정조→포기조→침전조→오존처리→

모래여과→활성탄여과→염소소독으로 구성되어 있으며, 처리수는 화장실 세척수(flushing water)로 재이용하고 있는 시설이다.

**2.3 포기조 운영방법 변경(24시간포기→간헐포기)**

기존의 포기조는 2개의 반응조가 병렬로 연결되어 제 1 반응조는 전체부피의 60%, 제 2 반응조는 40% 이었으나, 간헐포기 형태로 운전이 가능하도록 제 1 반응조를 두 개의 반응조로 분리하였다. 분리는 제 1 반응조의 총 60% 중 절반인 30%로 하였다. 따라서, 포기 반응조는 3개의 반응조로 구성되게 하였으며, 제 1, 2 및 3 반응조의 부피는 전체부피의 각각 30, 30 및 40% 이다.

기존 및 간헐포기 형태로 변경후 포기조의 구조도는 그림 1과 같다. 제 1 반응조와 제 2 반응조는 산소의 공급을 교대로 하는 간헐포기 형태로 운영하고 제 3 반응조는 계속적으로 산

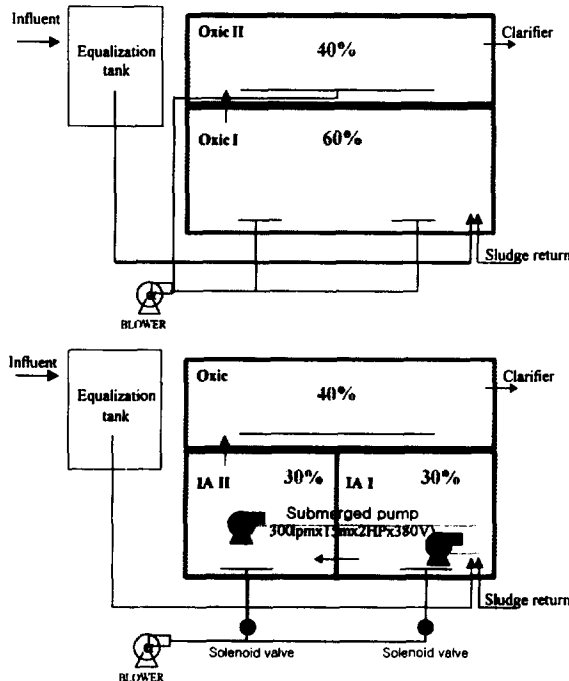


Fig. 1 Schematic diagram of the conventional extended aeration(top) and modified intermittent aeration(bottom) system

소를 공급하는 호기성 반응조로 운영하였다. 기존의 시설에서 간헐포기 형태로 포기조를 운영하기 위해 추가한 설비는 제 1 및 2 반응조를 간헐포기로 운영할 수 있게 하는 솔레노이드 밸브 2개와 비포기시 슬러지가 가라앉지 않게 설치한 수중펌프 2대 및 이들 장치를 컨트롤할 수 있게 구성한 콘트롤판넬 등이다. 수중펌프는 슬러지를 아래에서 위로 분사하도록 하였으며, 반응조의 중앙 바닥부근에 설치하였다.

수리학적 체류시간(HRT)은 20시간, SRT는 20~30일 정도 이었으며, 슬러지 반응은 기존 공정에서 운영한 방식을 이용하였으며, 침전조에서 제 1 반응조로 직접 반송하는 것이 약 100%, 별도로 설치된 슬러지 안정화조에서 제 1 반응조로 반송되는 것이 약 50% 정도로 총 150% 정도이었다.

2개의 간헐포기 반응조는 포기 및 비포기 주기를 반대로 설정하여 적용하였으며, 각 반응조의 운영방법은 그림 2와 같다. 제 1(IA I) 및 2 반응조(IA II)의 포기 및 비포기 시간은 1시간 간격으로 하였다. 제 3 반응조(Oxic)는 24시간 연속적으로 포기 되도록 하였다.

하고 20~23℃ 정도로 높았다. 포기조내의 MLSS 농도는 1,200~1,500 mg/L 정도이었으며, 슬러지의 SRT는 약 20~30일 정도로 유지하게 하였다. 포기조내의 MLSS/MLVSS의 비율은 0.75~0.8 수준으로 활성슬러지의 상태는 양호하게 유지되었다.

**3.2 유기물, 질소 및 인의 제거효율**

Bar 및 drum 스크린을 거친 후 조정조에 체류중인 유입수의 수질변화는 그림 3과 같다. 기존의 24시간 포기시키는 CAP(Continuous Aeration Process)에서 IAP(Intermittently Aeration Process)로 변경한 후에 유기물(BOD, CODMn) 농도는 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 변경 전에 침전조 유출수의 BOD 농도는 대략 15 mg/L 정도이었으나, 간헐포기 형태로 변경 후 BOD 농도는 급격하게 감소하여 5 mg/L 정도로 나타났다. 이러한 감소는 CODMn 및 총질소(T-N) 농도도 마찬가지로 경향을 보이고 있다. 변경전에 유출수중의 총질소(T-N) 농도는 8 mg/L 정도이었으나, 변경 후 점진적으로 감소하여 약 3 mg/L

Time, hr Reactor	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1 (IA I)	□	□	■	□	□	■	□	□	■	□	□	■	□	□	■	□	□	■	□	□	■	□	□	■	□
2 (IA II)	□	■	□	□	■	□	□	■	□	□	■	□	□	■	□	□	■	□	□	■	□	□	■	□	□
3 (Oxic)	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□

Fig. 2 Operation mode of intermittently aerated activated sludge process (□ : aeration, ■ : nonaeration)

본 실험에 있어서 모든 측정은 수질오염공정 시험법 및 Standard method(18eds.)에 근거하여 수행하였다.<sup>(7,8)</sup>

**3. 결과 및 고찰**

**3.1 운영상태**

시설이 빌딩의 지하에 있고, 오수관거를 통해 식당에서 비교적 따뜻한 오수가 유입되기 때문에 포기조 내의 온도는 겨울철임에도 불구하고

정도까지 감소하는 것으로 나타났다. 이는 기존의 24시간 폭기방식에서는 유입수중의 질소 성분이 질산화반응으로 인하여 질산성질소의 형태로 변환되어 침전조에서 탈질반응을 일으키거나 처리수로 배출되었으나, 제 1 및 2 반응조를 간헐포기 형태로 운영함으로 인하여 탈질산화 효율이 증진되고 유입수중의 유기물이 이 반응단계에서 효과적으로 이용되었기 때문으로 판단된다.

간헐포기 형태로 운영을 변경한 후 BOD 제

거효율이 약간 증진되어 95% 정도로 나타났으며, SS 제거효율은 80% 내외에서 변경 후 90% 이상으로 크게 증진됨으로서 침전조에서 고액분리가 효과적으로 이루어지고 있다는 사실을 알 수 있다. 총질소(T-N) 제거효율은 변경 전에는 약 50% 내외로 제거효율을 나타냈으나, 간헐포기 형태로 변경한 후 제거효율은 크게 증진되어 80% 이상을 나타내었으며, 또한, 총 인(T-P)의 제거효율도 60% 정도의 수준까지 크게 증진된 것으로 나타났다.

상기와 같이 유기물 및 질소의 제거능력이 향상된 것은 간헐포기를 적용함에 따라 질산화 및 탈질산화 반응이 효과적으로 수행됨에 따라 탈질산화 과정에 유기물이 효과적으로 이용되었기 때문인 것으로 판단되며, 또한, 변경 전에 침전조의 상태가 양호하지 못하여 생물학적 플록(biological floc)이 월류함으로 인하여 BOD, COD<sub>Mn</sub> 및 총질소(T-N) 측정에 영향을 끼쳤으나, 간헐포기 형태로 변경 후 침전조의 고액분리 능력을 향상시켜 플록의 월류를

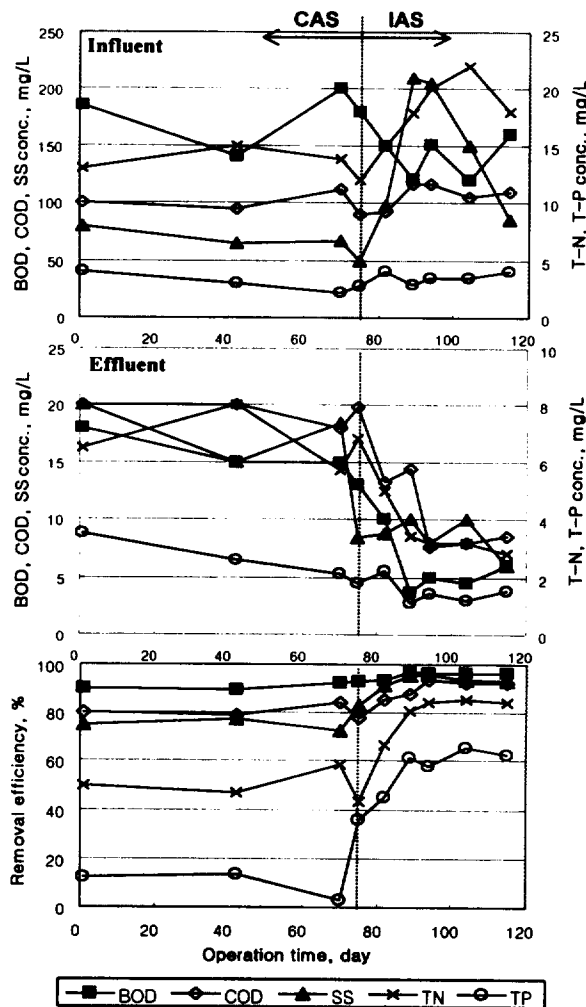


Fig. 3 Temporal variation of influent(top), effluent(middle) concentration and removal efficiency(bottom)(CAS : Continuous Aeration Process, IAP : Intermittently Aerated Process, COD : COD<sub>Mn</sub>)

억제 한데도 원인이 있었을 것으로 판단된다.

따라서, 기존의 운영방법에서 포기조의 운영을 간헐포기 형태로 운영함으로써 유기물은 물론, 질소 및 인도 동시에 효과적으로 제거할 수 있는 것으로, 여러 연구자들의 연구결과와 유사하였으며,<sup>3),4),9),10)</sup> 제거효율도 우수한 것으로 나타났다. 이는 기존의 생물학적 처리공정에 적용의 가능성을 보여주는 것이며, 기존 공정에 적은 시설비용으로 효과적으로 적용할 수 있으며, 더욱이, 유기물 및 질소 등을 효과적으로 제거함으로써 인하여 후속의 처리공정에 보다 많은 장점을 지니게 된 것으로 판단된다.

### 3.3 반응조내에서의 DO, ORP 거동

간헐포기 공정에서 공기가 비포기 상태에서는 무산소 및 혐기상태로 유지되는데, 이때, 유기물이 존재하는 상태에서 질산성질소가 존재하면 탈질산화 반응이 일어나며, 유기물의 종류에 따라 다르나 일반적인 하수나 폐수의 경우에는 탈질산화(denitrification) 반응이 완료된 후 인의 방출(phosphorus release)이 일어나게 된다. 이 과정에서 ORP는 감소하며, pH는 증가하게 된다. ORP(oxidation-reduction potential)의 감소곡선에서 탈질산화 반응의 완료시점과 인의 방출시점에서 ORP 변화폭의 차이로 인하여 기울기가 급격하게 변하는 변곡점(bending point)이 발생하게 되는데, 최근에 변곡점의 유무에 의해 탈질산화 반응의 완료시점을 평가하거나, 전체적인 공정을 평가 및 제어하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다.<sup>3),11),12)</sup>

ORP 값은 유입된 오염물질의 산화 환원의 정도를 나타내는 지표로서, 산소가 공급되어 운영되는 호기성 상태의 포기조에서는 유기물 산화 및 질산화 반응이 진행함으로써 ORP 값이 양의 값을 나타내며, 산소가 공급되지 않는 무산소 및 혐기성 상태에서의 포기조에서는 음의 값을 나타내게 된다.

그림 4는 간헐포기 형태로 변경한 후 제 1 및 2 포기조내의 DO 및 ORP의 변화를 측정 한 한 예이다. 포기상태에서 비포기 상태로 전

환한 후 제 1 반응조 내에서 용존산소의 농도가 0 mg/L 수준으로 감소하는데 약 12분 정도가 소요되는 것으로 나타났으며, 제 2 반응조의 경우에는 초기 DO 농도가 0.2 mg/L 정도로 낮았기 때문에 약 5분 정도가 소요되었다. 제 1 반응조의 경우, 비포기 후 약 30분 후(용존산소의 농도가 거의 0에 도달한 무산소 상태 후 약 20분 후)에 ORP의 변곡점이 나타나고 있다. 비교적 빠르게 변곡점이 나타나는 것은 유입수중의 질소성분이 10~15 mg/L로 비교적 낮아 질산화 반응에서 생성되는 NO<sub>3</sub>-N의 농도가 낮고 유입수중의 유기물이 비교적 풍부하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 시간에 따른 인의 농도변화를 측정하였으나, 유입수중의 인의 농도가 너무 낮아 인의 release-uptake 기작은 관찰하지 못하였다. 반면에 제 2 반응조 내에서는 ORP의 변곡점(bending point)이 관찰되지 않고 있다. 이는 유입되는 질소의 농도가 비교적 낮고, 유입수중의 유기물이 제 1 반응조에서 탈질산화 및 유기물 산화과정에서 대부분 이용되어 제 2 반응조 내에서는 탈질산화에 이용되지 못하였기 때문인 것으로 판단된다. 이는 2개 이상의 반응조를 간헐포기 형태로 운영하는 경우에는 제 1 반응조의 역할이 매우 중요하다는 사실을 알 수 있다. 이러한 결과는 많은 연구자들에 의해 발표되었으며,<sup>7),8)</sup> 본 연구에서도 이와 유사한 결과를 얻었다.

### 3.4 변경 전·후의 침전조 상태

24시간 포기시키는 운영방법에서 1시간 간격으로 제 1 및 2 포기조를 간헐포기 시키는 방법으로 변경한 후 침전조 내에서의 슬러지 부상은 크게 감소하였다. 변경 전에는 침전조 상부에 슬러지가 부상하여, 후속공정인 오존산화, 모래여과, 활성탄여과 및 소독과정에 큰 영향을 주었다. 슬러지 부상은 포기조에서 질산화가 충분히 진행된 후 침전조에 유입되었을 때, 침전조의 용존산소 농도가 감소하게 되고, 유기물이 존재하는 경우, 탈질산화 반응이 일어나 질소가스가 방출하는데, 이러한 반응에 주

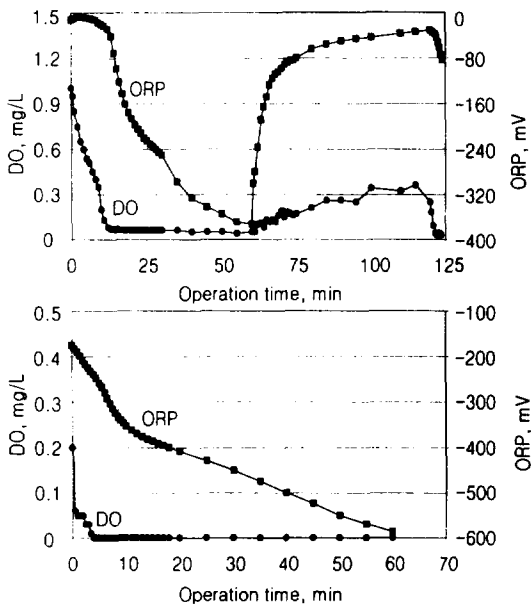


Fig. 4 Temporal variation of dissolved oxygen concentration and ORP in first(top) and second reactor(bottom)

원인이 있다. 포기조의 운영을 간헐포기 형태로 바꾸어 질산화 및 탈질산화 반응을 포기조 내에서 수행함으로써 인하여 침전조에서의 탈질산화 반응이 크게 억제되었다. 이로 인하여 침전조의 운영이 크게 용이하게 되었다.

### 3.5 수질평가

기존의 24시간 포기하고 extended aeration 형태의 운영에서 1시간/1시간의 포기/비포기 주기로 간헐포기 형태로 개선한 후 유기물, 질소 및 인의 제거효율은 크게 증진되었으며, 특히, 질소 및 인의 제거효율은 변경 전 후에 현격한 차이를 보이고 있다. 본 연구에서는 전체 처리공정을 대상으로 단위공정별 효율평가는 수행하지 못하였으나, 생물학적 처리공정의 처리수 및 최종적으로 공급되는 중수의 수질을 현행 중수의 수질기준과 비교 검토한 결과는 table 2와 같다. 조정조-포기조-침전조로 이루어진 생물학적인 2차 처리공정 유출수의 BOD 농도는 5 mg/L, T-N 농도는 3 mg/L, T-P 농도는 1.5 mg/L 수준이었으며, 중수처리공정에서 모래여과를 거쳐 최종적으로 공급되는 중수의 수질을 3차에 걸쳐 측정한 결과, BOD 농도는 염소소독 전에 4 mg/L 정도, 탁도는 4 NTU 이하이었으며, 염소소독 후 유리잔류염소 농도는 약 0.4 mg/L, 대장균은 0 MPN/100mL로 전혀 존재하지 않는 것으로 나타났다. 따라서, 전체적인 중수처리공정은 효율적으로 운영되고 있으며, 간헐포기 형태로 변형한 후 후속의 모래여과 공정의 부하를 크게 줄이고 침전지 내에서 슬러지 부상을 방지하는 등 전체적으로 공정이 안정적으로 운영되고 있는 것으로 나타났다.

Table 2 Criteria for reusing as toilet flushing water and water quality in this research

Items	Toilet flushing water(Criteria)	KOWACO building (this research)
Coliform	≤10/1mL	0 **
Residual chlorine	Detect	0.4 **
Turbidity	≤ 5"	≤ 4NTU **
BOD(mg/l)	≤ 10	5 *
pH	5.8~8.5	7~7.2 **

\* Biological treatment system effluent

\*\* After chlorination

#### 4. 결 론

24시간 연속포기 형태로 운영되고 있는 기존의 처리시설에서 유기물, 질소 및 인의 제거효율을 향상시키기 위해 간헐포기 형태의 운전을 현장적용한 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 포기조의 운영을 간헐포기 형태로 운영방법을 변경한 후, 유출수의 BOD 농도는 5 mg/L, 총질소(T-N)는 약 3 mg/L 정도까지 감소하여 BOD, SS, T-N 및 T-P의 제거효율은 각각 95%, 90%, 80% 및 60% 정도로 크게 증진되었다.

2) 포기조 내에서 질산화 탈질산화가 효과적으로 이루어짐으로 인하여 침전지 내에서 슬러지가 부상하는 문제를 크게 개선하였다.

3) 포기조 운영을 개선한 후 수질을 평가한 결과, 생물학적 처리공정의 후속공정으로 모래여과만을 실시하여도 화장실세정수로 재이용 하는데 충분한 수질을 확보하였다.

4) 간헐포기 공정을 현장 적용한 결과, 유기물, 질소 및 인의 제거효율이 크게 향상되었으며, 침전지 내에서 슬러지 부상 등의 문제점을 해결할 수 있었다. 따라서, 간헐포기 활성슬러지 시스템을 오수 및 중수처리공정으로 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- 고재권, 롯데월드의 중수도 활용사례, '99 하반기 하수도종사자 연찬회, 환경관리공단, 39-48 (1999).
- 한국수자원공사, 중수도 시스템 및 적용방안 연구 (1998).
- Sasaki, K., Yamamoto, Y., Tsumura, K., Hatsumata, S., and Tatewaki, M., Simultaneous removal of nitrogen and phosphorus in intermittently aerated 2-tank activated sludge process using do and ORP bending point control. *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 28, No. 11-12, 513-521 (1993).
- Lefevre, F., Audic, J. M., and Bujon, B., Automatic regulation of activated sludge aeration single-tank nitrification denitrification. *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 28, No. 10, 289-298 (1993).
- Wareham, D. G., Hall, K. J., and Mavinic, D. S., Real time-control of wastewater treatment system using ORP. *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 28, No. 11-12, 273-282 (1993).
- Wouters-Wasiak, K., Héduit, A., Audic, J. M., and Lefevre, F., Real time control of nitrogen removal at full scale using oxidation-reduction potential. *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 30, No. 4, 207-210 (1994).
- APHA., *Standard methods of examination of water and wastewater*, 18th edition, American



- Public Health Association, Washington D.C. (1992).
8. 수질오염공정시험방법, (주)도서출판 동화기술 (1996).
  9. 서인석, 이상일, 2단 간헐포기 활성슬러지 시스템에서 양돈폐수의 영양염류 제거특성 및 예측 모델의 검증, *대한환경공학회지*, 제19권 제1호, 187-196 (1997).
  10. 이원호, 서인석, 이상일, 간헐포기 활성슬러지 시스템을 이용한 양돈폐수의 처리시 부하량에 따른 유기물, 질소, 인의 동시제거, *한국물환경학회지*, 제14권 제3호, 305-313 (1998).
  11. Plisson-Saune, S., Capdevile, B., Mauret, M., Debuin, A., and Baptiste, P., Real-time control for nitrogen removal using three ORP bending points: signification, control strategy and results. *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 33, No. 1, 275-280 (1996).
  12. 김창원, 배준석, 이해군, 한기백, 간헐포기공정에서 포기/비포기 주기에 따른 질소원과 산화-환원전위차의 관계, *대한환경공학회 추계학술발표회*, 409-412 (1996).