

## SBR을 이용한 소규모 오수처리시설에 관한 연구

박민정·김동석  
대구가톨릭대학교 환경정보학부 환경과학전공  
(2002년 11월 16일 접수; 2003년 3월 20일 채택)

### A study on the small sewerage system using SBR process

Min-Jeong Park and Dong-Seog Kim

Dept. of Environ. Sci., Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 712-702, Korea  
(Manuscript received 16 November, 2002; accepted 20 March, 2003)

An evaluation of the application of SBR and biofilm on small sewerage system was conducted. A newly developed small sewerage system, using SBR, was successfully applied to the nutrient treatment using municipal wastewater. The system was consisted of 6 compartments. Two systems, with SBR (A type) or without SBR (B type), were compared by several parameters (COD, SS, T-N,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ , alkalinity, pH, DO) in all experimental periods. Also, the time variation of several parameters (DO, pH,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ) was examined in a SBR applied sewerage system. T-N removal efficiency of B type was higher than that of A type by the effect of nitrification and denitrification even though the COD removal efficiencies were similar. In aeration stage, the pH was decreased from 6.4 to 6.3 within 1 h and increased to 6.65 at the end of aerobic stage, and pH was decreased to 6.2 in non-aeration stage, and these phenomena were explained. The effects of nitrification and denitrification were compared in A type and B type sewerage system, and the typical nitrification and denitrification were observed in B type sewerage system.

Key words : Small sewerage system, SBR, Biofilm, Nutrient removal, DO, pH

#### 1. 서론

생활수준의 향상과 산업의 발달로 말미암아 오폐수의 발생량과 오염물 부하량이 증가함으로써, 단위 수역에 따라서는 자정능력을 초과한 오염물의 유입에 따른 수질오염이 심화되어 국지적으로는 용수로서의 가치를 상실한 지역도 나타나고 있다.

우리나라에서 발생하는 오폐수는 하루 19,680 천톤에 이르며, 이중 생활하수 발생량은 하루 15,484 천톤에 이르러 약 79%를 차지하고 있다.<sup>1)</sup> 발생하는 오수의 76%인 11,678 천톤은 하수처리구역 내에서 발생하고 있으나, 하수관개의 정비 미흡, 하수종말처리시설의 시설용량 부족 등으로 인하여 실제 하수종말처리시설로 유입·처리되는 생활오수의 양은 이보다 적을 것으로 추정된다. 하수처리구역 외

에서 발생하는 오수는 개별 건물에 설치된 오수처리시설로 유입·처리되도록 하고 있으나, 현재 수세식 화장실만 처리하는 단독정화조가 설치된 건물 및 방류수 수질기준이 BOD 기준 40 mg/L 내지 80 mg/L로 완화된 오수처리시설이 현존하고 있다.<sup>1)</sup>

대형 하수처리장은 항상 관리인력이 상주하고 있고, 자동화된 설비가 비치되어 있을 뿐만 아니라, 지속적인 슬러지의 폐기가 가능하여 전체적인 하수처리장 관리에 대한 어려움이 적은 편이다. 이에 비해 소규모 오수처리시설은 관리인력이 따로 상주하지 않고 자동측정설비를 비롯한 자동화시설이 거의 없으며, 년 1회 정도의 오수처리시설 청소기간에 슬러지를 배출 및 폐기시킬 수 있어, 시설의 관리 및 운영에 상당한 어려움이 있다. 그러므로 소규모 오수처리시설에서는 안정된 운전 및 관리가 보다 중요한 과제로 인식되고 있다.

또한, 최근 2~3년 전부터 우리나라에서도 대규모 하수처리장의 경우에는 건설 신기술이나 환경 신기술을 중심으로 질소와 인의 처리 개념이 도입

Corresponding Author : Dong-Seog Kim, Dept. of Environ. Sci., Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 712-702, Korea  
Phone : +82-53-850-3250  
E-mail : kimds@cataegu.ac.kr

된 다양한 공정들이 개발되었거나 개발되고 있으나, 기존의 소규모 오수처리시설은 단순히 BOD나 부유고형물(SS)의 제거에 만족하고 있고 현행 법규상에도 질소·인과 같은 부영양화 유발물질에 대한 규제가 없는 실정이다.<sup>2)</sup> 뿐만 아니라 소규모 오수처리시설을 제조하는 업체 또한 영세하여 BOD나 SS의 제거에 급급하여 질소와 인을 제거할 수 있는 기술력의 확보는 엄두도 못 내고 있는 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 미래 환경기준의 강화에 대비하고 하수처리구역이 아닌 지역의 수환경의 지속적인 보존과 영세한 환경업체의 환경기술 확보를 위하여 기존의 소규모 오수처리시설의 개선방안을 제시하고자 한다. 따라서 본 연구는 SBR(sequencing batch reactor, 연속 회분식 반응기) 공정을 소규모 오수처리시설에 응용하기 위한 기초 연구로서, 가능한 기존의·오수처리시설의 기본 틀을 유지한 상태에서, 1차 침전조와 2차 침전조에 여과조를 설치하여 SS(suspended solids, 부유 고형물)의 제거효율을 증진시킬 수 있는 방안을 마련하고 포기조를 생물막 공정과 SBR 공정이 복합된 공정으로 변형시킴으로써 질소 제거의 효용성을 검토하고 실제 현장 적용을 위한 기본 자료를 도출하고자 한다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 실험장치 및 재료

본 실험에 사용된 반응기(Fig. 1)는 아크릴을 사용하여 실제 오수처리시설과 유사한 형태로 제작되

었다. 전체적인 크기는 가로 550 mm, 세로 240 mm, 높이 260 mm의 장방형구조로서, 크게 유입조, 1차 침전-여과조, 1차 포기조 및 SBR(1), 2차 포기조 및 SBR(2), 3차 포기조, 2차 침전-여과조 등 6 구역으로 분할하였다. 각각의 유효용적은 4 L, 4 L, 5 L, 5 L, 5 L, 3 L이고, 전체 유효용적은 26 L로 하였다.

반응기는 2 기를 제작하여 하나는 중앙에 1차 포기조와 2차 포기조를 설치하여 지속적인 공기공급이 이루어지도록 하여 호기성 반응만이 계속되도록 하였고, 다른 하나의 반응기는 1차 포기조와 2차 포기조 대신 SBR(1)과 SBR(2)를 설치하여 포기-비포기를 시간간격으로 번갈아 실시하여 호기-혐기 또는 호기-무산소 반응을 반복하는 연속 회분식 반응 시스템을 도입하였다. 비포기 상태에서의 슬러지 교반 및 하수의 원활한 혼합을 위하여 중앙에 수중펌프를 설치하였다. 전체적인 반응조의 온도를  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하기 위하여 유입조와 1차 포기조 및 SBR(1)에 자동온도조절기를 설치하였다. 각 실험장치에 공급되는 오수는 C 대학내 오수처리시설에서 차집된 오수를 매일 운반하여 유입탱크에 저장한 다음 각 반응기로 유입시켰다.

유입조는 오수가 유입되어 저장되는 조로서 오수의 저장과 슬러지의 축적 및 저장을 주로 담당하는 조이다. 오수처리시설의 특징상 슬러지를 폐기시킬 수 없으므로 유입조가 슬러지의 저장에 많은 역할을 하게 되고, 이러한 형태에서 전체적인 SRT(solids retention time, 슬러지 체류시간)는 이론적으로 무한대에 이른다고 할 수 있다. 오수는 유입조의 상

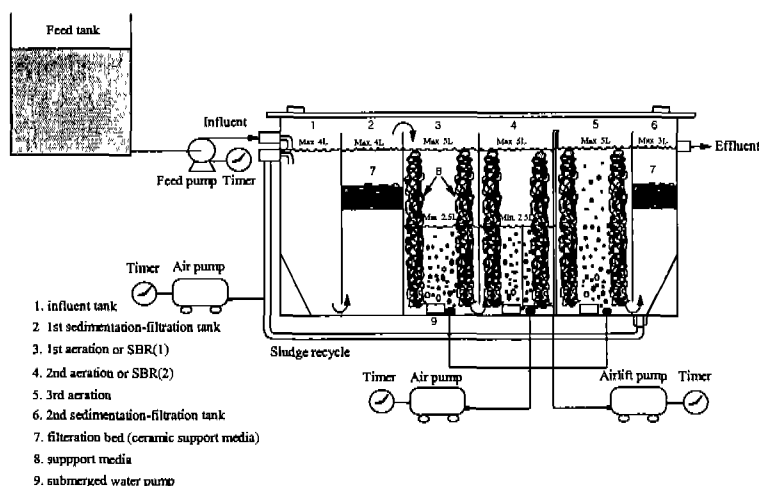


Fig. 1. Schematic diagram of conventional sewerage system (A type) and SBR applied sewerage system (B type).

부에서 유입시켰으며, 오수공급을 위한 정량펌프는 타이머에 의해 제어되는 시간주기에 따라 일정시간 동안 작동되도록 하였다.

1차 침전-여과조에는 하부에서 70 mm의 높이에 60 mm의 두께로 합성 세라믹 매체(synthetic activated ceramic, SAC)를 bed 형태로 설치하였으며 총 겉보기 부피는 1.1 L 정도였다. 이 합성 세라믹 매체는 직경 4 mm, 길이 4 mm의 원통형으로서, 겉보기 비중은 0.68~0.74, 압축강도는 90~180 kg/cm<sup>2</sup>, 공극률은 65.8~68.1%로 조사된 바 있으며, 자세한 매체 특성은 이규훈 등<sup>3)</sup>이 상세하게 조사하여 발표한 바 있다. 이 1차 침전-여과조에서는 부유 고형물의 침전이 주요 목적이고, 미침전된 부유 고형물은 합성 세라믹 매체에 의한 여과 효과에 의해 제거될 수 있으며, 시간이 경과됨에 따라 합성 세라믹 내에 증식되는 미생물에 의해 추가적인 유기물 제거 및 탈질화 효과를 기대할 수도 있다.

1차 포기조 및 SBR(1)과 2차 포기조 및 SBR(2)에는 그물상 매체를 설치하여 생물막이 형성될 수 있도록 하였다. 그물상 매체는 비표면적이 90~220 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, void ratio가 0.94인 polyvinylchloride 재질로서 각 반응조내에 4개씩 세로로 설치하였다. 이때 그물상 매체의 겉보기 부피에 대한 충전율은 약 20% 정도가 되도록 하였으나, 그물상 매체이므로 실제 충전율은 매우 낮았다. 반응조의 상태를 연속적으로 조사하기 위하여 기록계, DO meter 및 pH meter를 상부에 설치하였다. 공기를 공급하기 위한 공기 펌프 및 비포기시 교반을 위한 수중펌프를 타이머와 연결하여 미리 정해 놓은 시간주기(time schedule)에 따라 작동되도록 하였다. 포기시 주입되는 공기를 산기시킬 수 있는 산기석을 반응조 하부에 부착시켜 산기된 공기에 의해 형성되는 수류를 이용하여 반응조를 완전혼합형으로 유지하였다.

3차 포기조에는 1차 포기조 및 SBR(1)과 2차 포기조 및 SBR(2)에 설치한 것과 동일한 그물상 매체를 충전율 20% 정도로 설치하였다. 3차 포기조는 1차 포기조 및 SBR(1)과 2차 포기조 및 SBR(2)에서 미처리된 유기물의 제거 및 추가적인 질산화를 유도하기 위한 조로서 지속적인 포기가 유발되도록 유지하였다. 이 때 공기의 공급유량은 0.5 L/min으로 일정하게 유지하였으며 전체 운전기간 동안 DO의 농도는 4~5 mg O<sub>2</sub>/L로 유지되었다.

2차 침전-여과조는 미처리된 오수가 배출되기 전에 부유 고형물의 침전과 여과 및 생물학적 처리를 추가하기 위한 공정으로서, 1차 침전-여과조와 마찬가지로 합성 세라믹 매체를 충전시켰으며, 충전된 합성 세라믹 매체의 겉보기 충전 부피는 0.85 L

정도였다. 침전된 슬러지는 하루에 한번 간헐적으로 유입조로 반송하여, 유입조 내에서 슬러지가 축적 및 저장될 수 있도록 하였다.

## 2.2. 운전방법

각 실험에 있어서 오수공급 및 포기 양식은 Fig. 2와 같이 하였다. 식당과 같은 일반 음식점의 오수 배출방식을 기준으로 하였고, 가능한 하루 중 비포기 시간과 포기 시간이 균일하도록 설계하였다. 실험에 사용한 슬러지는 G시 하수처리장의 반송슬러지로서 100 mesh 체를 사용하여 헝잡물을 제거한 다음 2일 정도 계속 포기시켜 슬러지 상부에 부상하는 스크럼을 제거한 후 실험에 사용하였다. 슬러지는 실험 장치중 1차 포기조 및 SBR(1), 2차 포기조 및 SBR(2)와 3차 포기조에 각각 2,000 mg/L 정도의 MLSS(mixed liquor suspended solids)가 유지되도록 주입시켰다.

오수는 C 대학에서 발생하는 생활하수를 이용하였으며, 일반 식당을 기준으로 오전 11시~오후 2시, 오후 6시~오후 9시에 주로 발생하는 것으로 생각하여 실험장치 내로 유입시켰으며, 하루에 유입되는 총 오수량은 5.2 L/day로서 전체적인 실험장치에 대한 HRT는 5 일이었으며, 주 반응조인 1차 포기조 및 SBR(1)과 2차 포기조 및 SBR(2)에 대한 HRT는 각각 1일 정도로 하였다. 참고로 현재 운전되고 있는 실 규모의 오수처리 시설의 대략적인 HRT는 5~7일 정도로 설계되어 있다.

SBR(2)에서는 오수가 유입되기 20분전에 air-lift 펌프를 이용하여 처리된 오수를 3차 포기조로 이송하여 반응조의 1/2 정도를 비워둠으로써 유량조정

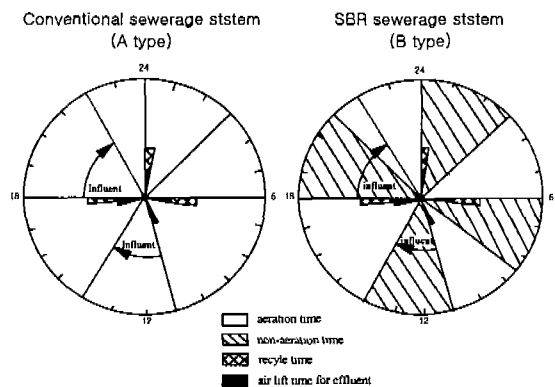


Fig. 2. Operation schedules of conventional sewerage system (A type) and SBR applied sewerage system (B type) in 1st aeration-SBR(1) and 2nd aeration-SBR(2).

조의 역할을 결합할 수 있도록 하였다.

SBR 공정을 이용한 오수처리 반응기에서의 실험 1주기는 17시간과 7시간으로 번갈아 일어나도록 설정하였으며, 1주기 중의 마지막 30분은 침전, 30분은 배출, 15분은 휴지기시간으로 배정하였다. 매주기마다 SBR(1)과 SBR(2) 반응조 유효용적의 50%인 5L의 새로운 기질을 공급하고 반응 종료시 공기송풍펌프(air-lift pump)를 이용하여 5L를 3차포기조로 배출하였다.

비포기시에는 혐기성 또는 무산소 조건을 만들기 위하여 공기주입은 하지 않고, 수중펌프를 이용하여 혼합시켜 인공하수와 미생물간의 접촉을 원활하게 하였다. 비포기시 반응조 내 공기의 유입을 막기 위하여 각 반응조는 전체적으로 밀폐를 하였다. 비포기 상태에 이어지는 포기 상태에서는 용존산소 농도가 반응조 내에 항상 3~5 mg/L 정도로 유지되도록 하였으며, 이 때의 공기 공급 유량은 약 0.5 L/min이었다.

2.3. 분석방법

시료분석은 효율을 알기 위한 일상적 분석과 시간에 따른 성분변화 과정을 조사하기 위한 경시분석을 동시에 하였다. 실험이 시작되고 난 후부터 매 2~3일 간격으로 SS, TCOD, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 등을 분석하였다. 본 연구의 모든 수질분석은 Standard Method<sup>4)</sup>를 기준으로 하였다. T-N은 수질오염공정시험법<sup>5)</sup>의 자외선 흡광 분광광도법을 사용하여 분석하였고, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N의 농도는 Ion Chromatography (Methrom Co.)를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 거시적 변화 관찰

C 대학의 오수처리시설에서 채수한 오수를 정량 펌프를 이용하여 직접 2개의 소규모 오수처리장치에 투입하여 실험하였다. 하나의 소규모 오수처리장치는 기존의 재래식 오수처리시설과 동일한 방식으로 운전되는 것으로 연속회분식 공정이 도입되지 않은 상태에서 시간주기에 따른 연속적인 오수의 유입과 유출이 발생하는 공정으로 이루어져 있다(A 유형). 다른 하나의 소규모 오수처리시설은 연속 회분식 공정이 도입되어 주기적인 포기-비포기 및 오수의 배출이 일어나도록 운전하였다(B 유형). 이러한 경우 2개의 소규모 오수처리시설에서 유입되는 오수와 유출되는 오수의 특성(COD, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)을 비교·관찰하였다(Fig. 3).

전체적으로 유입되는 오수는 부유 고형물 농도를 포함한 COD<sub>cr</sub>을 기준으로 할 때 113~272 mg/L으

로 큰 변화를 나타내었으나, 대략적인 평균 값은 195 mg/L였다(Fig. 3(a)). 유출수 COD의 경우, A 유형에서는 초기 운전 30일전에는 20~110 mg/L 정도로 변화가 크게 나타났고 평균 63 mg/L 정도로 나타나, 전체적인 COD 처리효율은 68%에 불과하였다. 그러나 초기 30일이 경과됨에 따라 유출수의 COD는 23~38 mg/L 정도로 변화 폭이 줄어들어 안정화되었고, 평균 유출수 농도도 32 mg/L 정도로 84%의 향상된 COD 처리효율을 나타내었다. B 유형에서는 초기 10일 정도 경과되면서부터 13~30 mg/L의 비교적 안정된 유출수 수질을 나타내었고, 평균 유출수 농도는 20 mg/L로서 90%의 비교적 높은 COD 처리효율을 나타내었다.

활성슬러지의 질산화와 탈질화에 대한 적응속도를 고려해 볼 때, 20일 이전에 측정하는 것은 큰 의미가 없다는 판단하에 운전시작 20일 이후부터

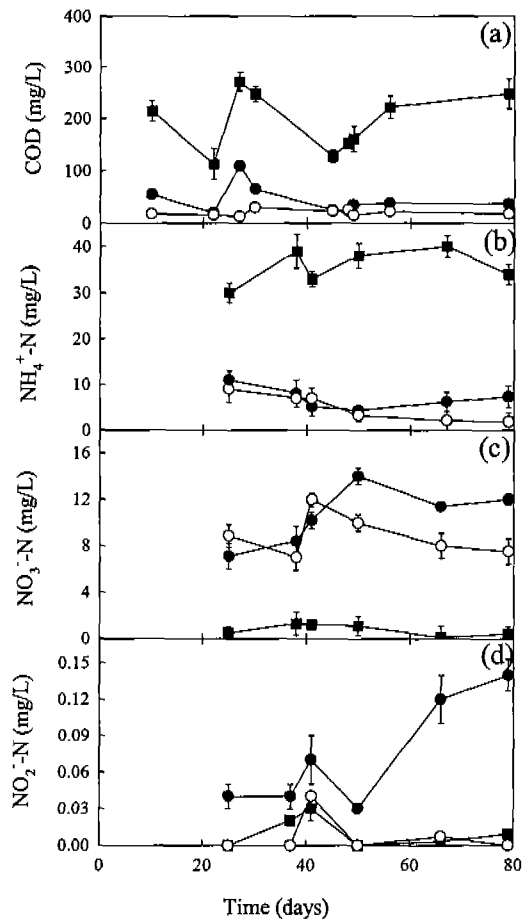


Fig. 3. Variation of COD, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N concentration in influent (■) and effluent of A type (●) and B type (○) according to time.

각종 질소의 변화를 관찰하였다. 소규모 오수처리 시설 내로 유입되는  $\text{NH}_4^+$ -N의 농도는 30~40 mg/L로, 유입되는 COD 값에 비해 변동이 적었으며, 평균 값은 36 mg/L로 나타났다(Fig. 3(b)). 통상적으로 유입되는 유기질소의 농도는 전체 질소 농도의 40% 정도라고 생각할 때,<sup>5)</sup> 현행 오수처리시설의 배출수 기준 T-N 60 mg/L을 약간 초과하였으나, 배출수의 기준을 보다 엄격하게 적용하여 T-N의 기준을 최소한 30 mg/L 이하로 낮출 필요가 있을 것으로 판단된다. 운전초기 40일 이전에는 A 유형과 B 유형의 유출수 중  $\text{NH}_4^+$ -N 농도가 약 8~10 mg/L로 70%의 질산화 효율로 나타났고, 그다지 차이도 비교적 크게 나타나지는 않았다. 시간이 경과됨에 따라 질산화 정도에 따라 A 유형에서는 4~7 mg/L로 약 80%의 질산화 효율을 나타내었고 B 유형에서는 1~3 mg/L로 93%의 질산화 효율로서, 질산화에 대한 차이가 비교적 크게 나타났다. 이는 SBR의 도입에 따라 유기물의 제거가 원활하였고 또한 유기물이 제거됨에 따라 질산화를 유발시키는 독립 영양 미생물의 활동이 보다 활발해졌기 때문인 것으로 생각해 볼 수 있다. 또한 B 유형에서는 탈질화를 유발시킬 수 있는 무산소 반응이 연속적으로 발생함으로써 질산화에서 생성된  $\text{NO}_3^-$ -N이 원활하게 제거되어  $\text{NO}_3^-$ -N의 축적이 적었기 때문인 것으로도 생각해 볼 수 있다. 최찬식 등<sup>7)</sup>은 SBR에서 유입수의 질산염 농도를 변화시키면서 유기물, 질소, 인의 동시제거를 관찰하였는데, 유입수의 질산염 증가에 따라서 질산화 효율은 약 14% 정도 감소하였고, 반응조 내에 질산염 축적시 질산화 반응이 저해를 받는 것으로 보고한 바 있다.

유입되는 오수가 질산화되어 있는 경우는 거의 없으므로 유입수중의  $\text{NO}_3^-$ -N의 농도는 0.1~1.3 mg/L 정도로 매우 낮은 값으로 나타났다(Fig. 3(c)). A 유형에서는 유출수 중의  $\text{NO}_3^-$ -N 농도는 시간이 경과됨에 따라 7 mg/L에서 12 mg/L까지 증가되는 경향을 나타내었는데, 이는 질산화에 따른 증가로 볼 수도 있으나, 탈질화 단계가 없어 계속적으로  $\text{NO}_3^-$ -N가 축적되기 때문인 것으로 판단해 볼 수 있다. B 유형에서는 유출수 중의  $\text{NO}_3^-$ -N 농도가 시간에 따라 그다지 큰 변화없이 비교적 일정한 값을 나타내었고 60일 이후에는 8 mg/L 정도의 값으로 유지되었는데, 이는 SBR 단계에서 탈질화에 따른  $\text{NO}_3^-$ -N의 변화가 발생하였기 때문인 것으로 판단된다.

유입 오수중의  $\text{NO}_2^-$ -N 농도는 매우 낮은 0~0.03 mg/L의 범위로 나타났다(Fig. 3(d)). 오수처리 장치의 운전이 진행됨에 따라, A 유형에서는 계속

적인  $\text{NO}_2^-$ -N의 축적이 발생하여 0.04~0.14 mg/L로 나타났는데 비해, B 유형에서는  $\text{NO}_2^-$ -N은 최대 0.02 mg/L로서 거의 검출되지 않았다. 이 또한 탈질화에 대한 영향 때문인 것으로 생각해 볼 수 있다.

### 3.2. 정상상태에서 반응조별 관찰

실험의 전 운전기간동안 COD,  $\text{NH}_4^+$ -N,  $\text{NO}_3^-$ -N 및  $\text{NO}_2^-$ -N의 변화가 거의 없는 60일 이후를 정상상태로 가정하였다.

A 유형과 B 유형에서 각 반응조의 역할을 비교하기 위하여 정상상태에서 각 반응조별 DO 농도, 알카리도, SS 농도, COD 농도,  $\text{NH}_4^+$ -N,  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NO}_2^-$ -N, T-N의 변화를 관찰하였다(Fig. 4와 5). 모든 측정은 새로운 오수가 유입되기 30분전인 오전 10시 30분에 이루어졌다.

각 반응조는 1, 유입조; 2, 1차 침전-여과조; 3, 1차 포기조 및 SBR(1); 4, 2차 포기조 및 SBR(2); 5, 3차 포기조; 6, 2차 침전-여과조로 구성되어 있다.

A 유형과 B 유형 모두 유입조에서는 DO 농도가 0 mg/L로 나타났다(Fig. 4(a)). 이는 유입조내에 1일 정도 체류함으로써 대형 하수종말처리장에서의 유입 오수조건과 동일한 것으로 생각된다. 1차 침전-여과조에서는 상향류 여과 방식으로 여과상위를 측정함으로써 대기와의 접촉으로 인하여 DO 농도가 다소 증가하여 0.8~1.2 mg/L 정도로 나타났다. 1차 포기조 및 SBR(1)에서는 A 유형과 B 유형에 따른 뚜렷한 DO 농도의 차이를 나타내었다. A 유형에서는 계속적인 포기로 인하여 DO 농도가 4.2 mg/L였으나, B 유형에서는 그에 미치는 못하는 3 mg/L 정도로 나타났다. 이는 비포기 시간에 따른 영향으로 생각해 볼 수 있다. 그러나 2차 포기조 및 SBR(2)에서는 DO 농도가 증가하여 4 mg/L 정도로 나타났다. 3차 포기조에서는 A 유형과 B 유형 모두 약간의 DO 농도의 증가를 보여 5~5.5 mg/L로 나타났는데, DO 농도를 이렇게 증가시키는 2차 포기조의 존재 유무에 대해서는 다소 생각해 볼 여지가 있는 것으로 판단되었다. 유출수에서는 DO 농도가 다소 감소하여 2.5~3.2 mg/L 정도의 DO 농도를 나타내었다.

유입수내의 알카리도는  $\text{CaCO}_3$ 를 기준으로 할 때 약 330 mg/L로 나타났고, 반응조를 거치면서 알카리도는 감소하는 경향을 나타내었다(Fig. 4(b)). 1차 침전-여과조에서는 알카리도가 약간 감소하여 260~280 mg/L로 나타났으나, A 유형과 B 유형의 큰 차이는 나타나지 않았다. 그러나 1차 포기조 및 SBR(1)과 2차 포기조 및 SBR(2)의 경우, A 유형

에서는 질산화만 이루어지므로 알카리도의 소모가 많아 100 mg/L 정도로 나타났으나, B 유형에서는 탈질화에 의한 알카리도 보충에 의해 알카리도는 170~200 mg/L로 나타나 알카리도의 소모는 A 유형에 비해 적은 것으로 나타났다. 대체적으로 탈질 과정에서는 1g의 NO<sub>x</sub>-N이 탈질화되는 과정에 3.57g의 알카리도가 생성되며, 생성된 알카리도는 질산화 과정에서 소비된 알카리도를 회복시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있다.<sup>8)</sup> 또한, A 유형의 경우, 3차 포기조에서의 알카리도는 2차 포기조 및 SBR(2)의 알카리도와 동일하였는데, 이 결과로부터 대부분의 질산화는 1차 포기조에 이루어진 것으로 생각해 볼 수 있었다. B 유형에서는 3차 포기조에서 알카리도가 150 mg/L로 다소 감소함으로써 약간의 질산화가 추가적으로 발생하였다는 것을 간접적으로 알 수 있었다. 최종 A 유형과 B 유형의 경우, 2

차 침전-여과조에서의 알카리도는 각각 100 mg/L와 150 mg/L로 나타나 B 유형의 알카리도가 다소 높게 유지되고 있는 것을 알 수 있었다.

전체 반응조별 SS 농도의 변화를 살펴보면(Fig. 4(c)), 유입조에서의 SS 농도는 13 mg/L로 나타났다. 이 결과는 통상적인 오수의 조건보다는 SS 농도가 낮은 것으로 판단되며, 그 이유는 본 실험의 특성상 기존 오수처리시설에서 유입수를 채수하여 오는 과정 중 SS가 적게 포함되었기 때문인 것으로 생각해 볼 수 있다. 유입되는 SS는 1차 침전-여과조를 거치면서 상당량 제거되어 7~10 mg/L 정도로 나타나, 1차 침전-여과조의 필요성을 인식하게 해주었다. 그 다음의 연속적인 공정을 거치면서 SS 농도는 2~3 mg/L 정도로 감소되어 탁월한 SS 제거 효과를 나타내었으며, A 유형과 B 유형의 차이는 크게 나타나지 않았다.

COD의 경우(Fig. 4(d))에서, 유입수 농도는 130 mg/L 정도로 나타났고 1차 침전(여과)조를 거치면서 30%의 제거효과를 나타내어 90~100 mg/L로 나타났다. 1차 포기조 및 SBR(1)를 거치면서 65~70%의 COD가 제거되어 30~45 mg/L로 나타났으나, 순수한 호기성 분해에 의한 유기물 제거량(A 유형)과 호기성 분해 및 탈질화에 의한 유기물 제거량(B 유형)은 큰 차이를 나타내지 않았다. 최종 2차 침전-여과조에서의 COD 농도는 20~30 mg/L로 나타났고 B 유형이 A 유형에 비해 약간 적게 나타났으나, 그 차이는 그다지 크지 않았다.

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 경우(Fig. 5(a)), 유입수에서의 농도는 35 mg/L 정도였으며 1차 포기조 및 SBR(1)과 2차 포기조 및 SBR(2)를 거치면서 농도가 급격하게 감소하여 10 mg/L 이하로 나타났다. A 유형의 경우, 1차 포기조 및 SBR(1)와 2차 포기조 및 SBR(2)에서의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 농도는 5~9 mg/L였으나 B 유형에서는 7~12 mg/L로 나타나, B 유형이 A 유형에 비해 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 농도가 다소 높았는데, 이는 A 유형이 지속적인 호기성 상태를 유지함으로써 질산화가 활발하였기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 3차 포기조를 거치면 상황은 역전되어 A 유형에서는 7 mg/L로 1차 포기조에 비해 큰 변화가 없었으나, B 유형에서는 3차 포기조에서도 질산화가 발생하여 2 mg/L로 낮게 나타났다. 이는 A 유형에서는 탈질화가 발생하지 않아 2차 포기조에서 추가적인 질산화를 기대할 수 없었으나, B 유형에서는 SBR(1)과 SBR(2)에서 탈질화가 발생함으로써 질산성 질소의 감소가 초래되어 3차 포기조에서는 추가적인 질산화 효과를 얻을 수 있었던 것으로 판단된다.

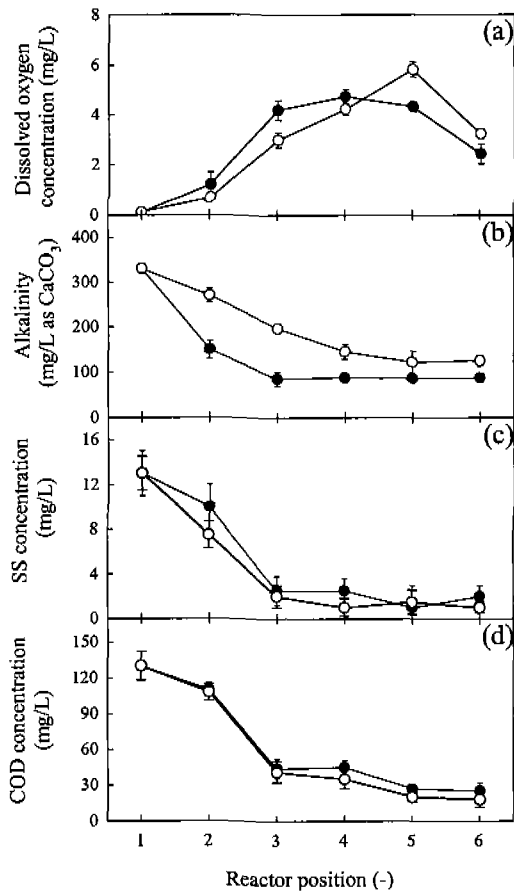


Fig. 4. Variation of DO, alkalinity, SS, COD concentration in A type (●) and B type (○) according to reactor position.

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N의 경우(Fig. 5(b)), 1차 포기조 및 SBR(1)과 2차 포기조 및 SBR(2)를 거치면서 급격한 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도의 증가를 관찰할 수 있었다. A 유형의 경우에는 13 mg/L 정도로 나타나 유입되는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 40% 정도가 질산화된 것으로 생각해 볼 수 있었다. B 유형의 경우에는 A 유형보다 낮은 8~10 mg/L로 나타났는데, 이는 탈질화에 의한 영향으로 생각해 볼 수 있다.

전 반응조에 있어 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N의 농도 값은 매우 낮고 농도 변화(Fig. 5(c))도 그다지 크지 않은 것으로 나타났는데, B 유형에 비해 질산화만 유발되는 A 유형에서 다소 높은 값을 나타내었다.

T-N의 경우(Fig. 5(d))를 살펴보면, 유입조의 T-N 농도는 52 mg/L 정도로 유입되는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 농도가 35 mg/L인 것을 볼 때 유입되는 오수중 유기질소는 17 mg/L 정도로 T-N의 33% 정도를 차지하는 것으로 판단된다.

전체적으로 여러 반응조를 거치면서 T-N은 감소하는 경향을 나타내었는데, 특히, 1차 침전-여과조에서 상당한 감소를 나타내었다. 이는 1차 침전-여과조에서 미세한 유기질소 고형물들이 여과작용에 의해 제거되었기 때문인 것으로 생각해 볼 수 있다. A 유형에서는 최종 T-N 값은 24 mg/L 정도로 나타나 54%의 T-N 제거효율을 얻을 수 있었으며, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 농도가 8 mg/L이고 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N의 농도가 13 mg/L 인 것을 감안해 보면 대부분의 유기질소는 제거된 것으로 판단된다. B 유형에서는 A 유형에 비해 T-N 값이 낮은 11 mg/L 정도로 나타나, A 유형 보다는 T-N 제거효율이 79%로 높게 나타났다. 이 때 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 농도가 2 mg/L이고 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N의 농도가 8 mg/L인 것을 고려하면 A 유형과 마찬가지로 유기질소는 거의 제거되거나 전환되었고, 또한 상당한 질소 제거효과를 얻었음을 알 수 있다.

### 3.3. SBR에서의 DO 및 pH 변화

B 유형의 오수처리장치에서, 포기시 공기 공급 유량을 0.5 L/min으로 고정하여 포기 2.5시간, 비포기 2.5시간을 유지한 상태에서 SBR에서의 DO와 pH 변화를 관찰해 보았다(Fig. 6). 포기를 시작함에 따라 SBR 내의 DO 농도는 급격하게 증가하여 1시간 30분 정도 경과된 시점에서 5 mg/L 내외의 정상상태를 유지하였다. 초기 10분 이내에 DO 농도가 1.2 mg/L 정도로 유지됨에 따라 충분한 호기성 상태의 유지에는 문제가 없는 것으로 판단된다. 포기 2시간 30분 후 비포기 상태로 운전함에 따라 DO 농도는 급격하게 감소하여 1시간 정도 경과함에 따라 0.1 mg/L 이하로 유지되었다. 그러나 DO 농도가 감소하는 1시간 동안에는 호기성 상태가 유

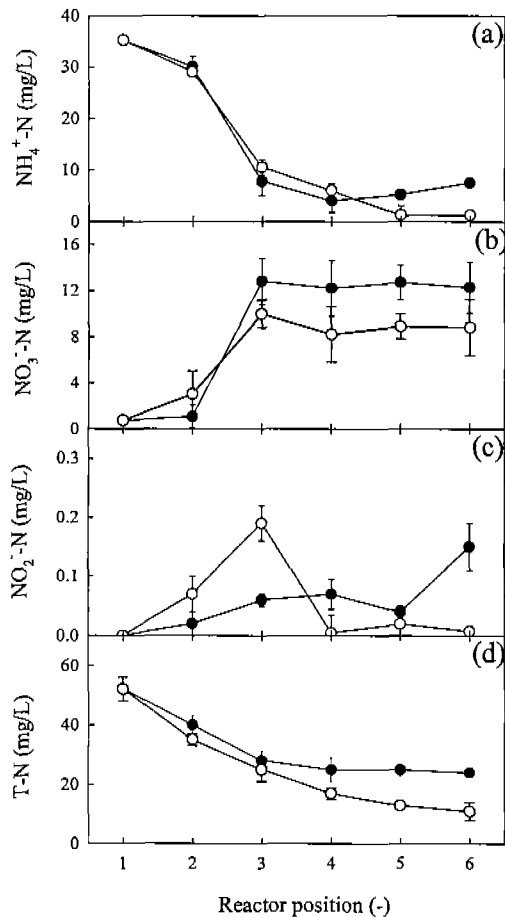


Fig. 5. Variation of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N and T-N concentration in A type (●) and B type (○) according to reactor position.

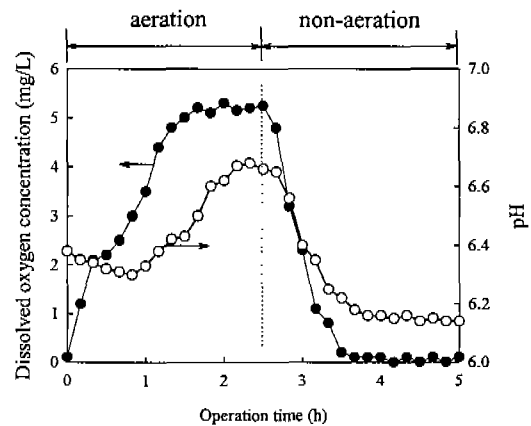


Fig. 6. Track analysis of DO (●) and pH (○) in SBR.

지됨으로써 탈질화 반응에 문제가 있는 것으로 판단되며, 실제 호기성 상태는 3시간 30분간 유지되고 무산소 상태는 1시간 30분 정도 유지되어 다소 무산소 상태가 부족한 것으로 판단된다. 그러므로 포기-비포기로 구분하는 것이 아니라 실제 호기-무산소 시간에 따른 배분이 SBR 운전에서 매우 중요한 것으로 생각된다. 필요에 따라서는 호기성 상태에서의 DO 농도를 낮춤으로써 무산소 상태에 빨리 도달할 수 있도록 하거나, 반응조내 미생물 농도를 높게 유지하여 산소의 소비속도를 증진시키는 방안도 생각해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다. 그러나 생물막의 경우, 외부 조건의 DO가 다소 존재하더라도 내부는 DO가 부족하여 무산소 상태가 되는 경우가 많은 것으로 보고되고 있어,<sup>9)</sup> 본 실험에서의 조건에서도 DO가 1mg/L 이하인 상태에서는 생물막 내부는 무산소 상태가 되어 탈질화가 충분히 이루어진 것으로 판단된다.

포기를 시작함에 따라 SBR 내의 pH는 약 1시간에 걸쳐 6.4에서 6.3 정도로 약간 감소하는 경향을 보이다가, 그 이후로는 pH가 증가하여 호기성 마지막 단계에서는 6.65까지 증가하였다. 초기 기간동안 pH가 감소하는 것은 유기질소에서 암모니아로 분해되는 과정(ammonification)과 인의 섭취과정을 통하여 알칼리도가 증가하는 것보다 질산화에 의해 알칼리도를 소모하는 것이 많기 때문인 것으로 생각해 볼 수 있다. 또한 이 기간 이후 pH가 증가하는 것은 질산화가 거의 완료되고 인의 섭취가 발생하기 때문인 것으로 판단해 볼 수 있다. 이 과정에서 pH가 다시 증가하는 지점은 질산화의 종료를 나타내는 것으로 "ammonia valley"<sup>10)</sup> 또는 "nitrogen break point"<sup>11)</sup>라고 부르고 있다.

김한승<sup>12)</sup>은 SBR을 이용한 실험에서, 암모니아의 농도가 높은 경우(90 mg NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N /L)에는 호기기간동안 pH가 감소하는 것으로 나타났으나, 그렇지 않은 경우에는 pH가 증가하는 것으로 보고하였다. 정진영<sup>13)</sup>은 SBR을 이용한 고농도 암모니아 폐수처리에서 포기기간동안 제올라이트를 첨가한 SBR에서 pH의 증가를 관찰하였다. 유재연<sup>14)</sup>은 모의 음식물 쓰레기를 외부탄소원으로 이용한 SBR 공정에서, 호기 기간동안 초기 20분 정도는 pH가 급격하게 증가하다가 그 이후 pH가 서서히 감소하는 것으로 발표하였으나, 그에 대한 설명을 언급하지는 않았다. 박창광<sup>15)</sup>은 SBR의 호기단계에서 3번의 큰 pH 변화를 나타내었다고 보고하였는데, 초기 50분 이내에 pH 8.5까지 증가하다가 80분동안 pH가 감소하여 pH 7.8까지 감소하였으며 그 이후 다시 pH 8.2까지 증가하였다. 이동석<sup>16)</sup>은 SBR의 호기 과정

중 암모니아의 농도가 높아질수록 pH의 감소량이 커지고 감소시간도 길어진다고 보고하면서, pH의 최저점이 질산화 종료 시점과 잘 일치하고 있어 pH가 질산화 완료의 좋은 지표가 될 수 있다고 언급한 바 있다.

또한, 비포기 단계에서는 pH는 감소하기 시작하여 1시간 30분 정도 경과된 시점에서 pH는 6.2 이하로 감소하였고, 이때 DO 농도는 0.1mg/L 이하로 유지되고 있었다. 이 과정에서 pH가 감소하는 것은 탈질화에 의한 알칼리도의 공급보다 혐기성 발효와 인 방출에 의한 알칼리도 소모에 따른 영향이 크기 때문인 것으로 생각해 볼 수 있다.<sup>17)</sup> 그 이후 pH는 거의 변화가 없이 6.15 정도 일정하게 유지되었는데, 초기 pH 6.4에 비해 다소 감소하여 비포기 반응시 6.15의 값으로 종결되었다.

정진영<sup>13)</sup>은 제올라이트를 첨가한 SBR의 경우 비포기기간동안 pH 감소현상을 관찰하였고, 유재연<sup>14)</sup>의 결과에 의하면 무산소 기간 초기에는 급격한 pH의 감소가 관찰되다가 그 이후 약간의 pH 증가현상을 관찰할 수 있었다. 박창광<sup>15)</sup>은 유재연<sup>14)</sup>과 비슷한 결과를 관찰하였는데, 무산소 단계에서 초기 40분 이내에 pH 7.9 정도까지 감소하다가, 그 이후 약간의 pH 증가가 나타난 다음 감소하는 것으로 관찰하였는데, 이는 이산화탄소의 생성으로 pH가 낮아지다가 탈질 반응에 의한 수산화 이온의 영향으로 pH가 증가하거나 유지되는 것으로 판단하였다. 김한승<sup>12)</sup>과 이동석<sup>16)</sup>은 유입 암모니아 농도에 관계없이 pH는 무산소 기간동안 감소하는 것으로 발표하였다.

한대호<sup>18)</sup>, Lee 등<sup>19)</sup>, Ra 등<sup>20)</sup> 및 Kim 등<sup>21)</sup>은 본 실험의 연구결과와 유사한 결과를 발표한 바 있으며, Cheng 등<sup>22)</sup>은 유기물 농도의 변화에 따라 pH와 ORP 곡선에 있어 상당한 차이가 발생한다고 보고하였다.

그러나 김화옥<sup>23)</sup>, 박성원<sup>24)</sup>, 최태전<sup>25)</sup>, 김해숙<sup>26)</sup>, 한지용<sup>27)</sup>은 본 연구결과와 다소 상이한 pH 변화를 관찰하였는데, 비포기 기간동안 pH가 증가하다가 포기기간에는 pH가 감소하는 경향을 나타내었다.

#### 3.4. 1차 포기조 및 SBR(1)에서의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 및 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 변화

운전 주기 5시간 동안 1차 포기조 및 SBR(1) 내의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 및 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 변화를 관찰하였다(Fig. 7). A 유형에서는 포기만 5시간 동안 계속되고, B 유형에서는 2시간 30분 동안의 포기 후 2시간 30분 동안 비포기 상태를 유지하였다.

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 경우, A 유형과 B 유형 모두 2시간 30분 동안의 포기기간동안 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 감소가 나타



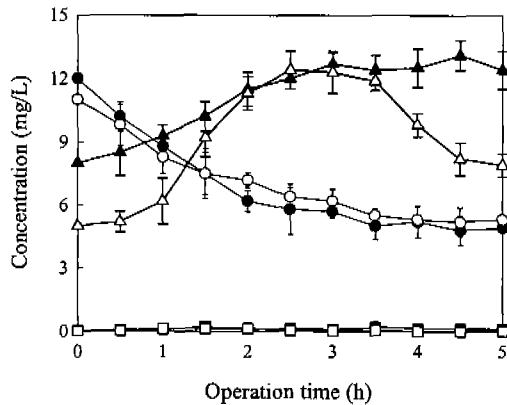


Fig. 7. Typical profiles in 1st aeration tank or SBR in A type (●  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , ▲  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , ■  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ) and B type (○  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , △  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , □  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ).

났다. A 유형의 경우 2시간 30분 동안의 추가적인 포기에도 불구하고  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 감소는 지속적으로 발생하기는 하였으나 그 양은 그다지 많지 않아 최종  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 농도는 5~6 mg/L로 나타났다. 또한 B 유형에서는 2시간 30분 정도 경과된 후 약 1시간 정도는 약간의  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 감소는 있었으나 그 이후에는 6 mg/L 정도로 일정하게 유지되었다. 이는 앞의 Fig. 6에서 본 바와 같이 비포기 기간 중에도 DO가 1시간 정도는 잔존하여 질산화가 일어난 결과로 볼 수 있다. 이 결과에서 2시간 30분 이후의 포기는 그다지 질산화에 도움을 주지 못한다는 것을 알 수 있었으며, A 유형이 B 유형에 비해 지속적인 포기에 의해 질산화 효율은 조금 높다는 것을 알 수 있다.

$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 경우, A 유형은 초기 2시간 30분의 포기기간동안 지속적인 증가 경향을 나타내다가 2시간 30분 이후의 추가 포기기간동안에는 그다지 큰  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 증가를 나타내지 못하였다. 이에 비해 B 유형에서는 초기 1시간 정도의 포기기간에는 완만한  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 증가를 보이다가 그 이후 1시간 30분 동안은 급격한  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 증가를 나타내었다. 이러한 차이는 A 유형은 지속적인 포기에 의해 DO의 농도가 항상 5 mg/L 이상으로 유지되어 있지만, B 유형은 무산소 상태에서 다시 포기가 시작됨에 따라 호기성 상태로 전환되어 적응하는 단계가 존재하기 때문인 것으로 판단된다. B 유형에서 2시간 30분의 포기후 비포기시 무산소 상태로 유지됨에 따라 탈질화가 발생하여  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 감소가 발생하였다. 초기 1시간 정도는 잔존하는 DO로 인하여(Fig. 6), 탈질화가 활발하게 발생하지는 않았으

나, 그 후 활발한 탈질화를 관찰할 수 있었다. 그러나 이 때 유기물의 농도가 COD로 10 mg/L 이하로 충분하지 못하여 충분한 탈질화가 발생한 것으로 보기는 어렵다. 그러므로 추가적으로 이 비포기시에 탈질화 반응을 촉진시키기 위하여 유기물을 공급하는 방안을 강구해야 할 필요성을 인식할 수 있었으나, 현실적으로 오수처리시설에서 외부 탄소원을 이용한다는 것은 매우 어려운 일이므로, 이 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

A 유형과 B 유형 모두에서, 초기 30분에서 1시간 30분까지 약간의  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 이 확인되다가 그 이후에는 거의 검출되지 않았으나, B 유형에 비해 A 유형에서 계속적으로 보다 많은  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 가 검출되었다.

#### 4. 결 론

기존 소규모 오수처리 시스템(A 유형)과 SBR 공정을 응용한 시스템(B 유형)을 이용하여 오수 중에 있는 유기물 및 질소 제거 비교실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 소규모 오수처리시설내 SBR 공정을 도입하여 적절한 유기물과 질소 제거효율을 얻을 수 있었고, 본 실험기간 내에 안정한 오수처리시설의 운전이 가능하였다.
- 2) 운전초기에는 A 유형과 B 유형의 유출수 중  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  농도가 그다지 큰 차이가 없었으나, 시간이 경과됨에 따라 A 유형에서는 약 80%의 질산화 효율을 나타내었고 B 유형에서는 93%의 질산화 효율을 나타내었는데, 이는 B 유형의 탈질화 영향을 볼 수 있었다.
- 3)  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 경우, A 유형은 초기 2시간 30분의 포기기간동안 지속적인 증가 경향을 나타내다가 이후의 추가 포기기간동안에는 그다지 큰  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 증가를 나타내지 못하였으나, B 유형에서는 초기 1시간 정도의 포기기간에는 완만한  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 증가를 보이다가 그 이후 1시간 30분 동안은 급격한  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 증가를 나타내어, SBR 공정의 도입에 따른 명확한 변화를 관찰할 수 있었다.
- 4) A 유형에서는 질산화만 이루어지므로 알카리도의 소모가 많았으나, B 유형에서는 탈질화에 의한 알카리도 보충에 의해 알카리도의 소모는 A 유형에 비해 적은 것으로 나타났다.
- 5) B 유형에서, 포기를 시작함에 따라 SBR 내의 pH는 약간의 감소 경향을 보이다가, 그 이후로는 pH가 증가하여 호기성 마지막 단계에서는 6.65까지 증가하였다. 또한, 비포기 단계에서는

pH는 감소하기 시작하여 pH는 6.2 이하로 감소하였다.

- 6) 비포기시에 탈질화 반응을 촉진시키기 위하여 유기물을 공급하는 방안을 강구해야 할 필요성을 인식할 수 있었으나, 현실적으로 오수처리시설에서 외부 탄소원을 이용한다는 것은 매우 어려운 일이었다.

### 감사의 글

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었습니다. (KRF-2001-E00147)

### 참고 문헌

- 1) 환경부, 2001, 환경백서, 449-456pp.
- 2) 환경관리공단, 2002, 환경신기술 소개집, 8-100pp.
- 3) 이규훈, 정은지, 박태주, 1996, SAC매체를 이용한 고정생물막 반응기에 의한 하수의 유기물질과 암모니아성 질소의 동시제거, 한국수질보전학회지, 12(4), 359-367.
- 4) APHA, AWWA and WEF, 1995, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th ed., Washington D.C., USA.
- 5) 김복현, 오양환, 홍종순, 목동우, 김재건, 이경호, 1999, 수질오염공정시험법, 동화기술, 247-248pp.
- 6) Barnes, D. and P.J. Bliss, 1983, Biological control of nitrogen in wastewater treatment, New York, E. & F. N. SPON, 1-12pp.
- 7) 최찬식, 김동한, 정태학, 1994, SBR 공정에서 질산염이 질소와 인의 제거에 미치는 영향, 한국물환경학회지, 10(2), 82-89.
- 8) 최은희, 우혜진, 고주형, 부정민, 김창원, 2002, 다양한 탈질용 대체기질물질의 성능평가, 대한환경공학회지, 24(9), 1561-1568.
- 9) Munoz-Colunga, A. and S. Gonzalez-Martinez, 1996, Effects of population displacements on biological phosphorous removal in a biofilm SBR, Wat. Sci. and Technol., 34(1-2), 303-313.
- 10) Al-Ghusain, I., J. Huang, O.J. Hao and B.S. Lim, 1994, Using pH as a real-time control parameter for wastewater treatment and sludge digestion processes, Wat. Sci. and Technol., 30(4), 159-168.
- 11) Peddie, C. C., D. S. Mavinic and C. J. Jenkins, 1990, Use of ORP for monitoring and control of aerobic sludge digestion, J. Environ. Eng., 116, 461.
- 12) 김한승, 1993, SBR 공정에서 세포내 인 거동 및 슬러지 침전성에 미치는 영향인자에 관한 실험적 연구, 서울대학교 석사학위논문.
- 13) 정진영, 1999, 연속회분식 반응기를 이용한 고농도 암모니아성 질소 함유폐수의 처리, 한국과학기술원 박사학위논문.
- 14) 유재연, 1999, 모의음식물쓰레기를 외부탄소원으로 이용한 SBR공정 효율향상, 서울대학교 석사학위논문.
- 15) 박창광, 2000, SBR에서의 ORP를 이용한 반응기 최적화, 경북대학교 석사학위논문.
- 16) 이동석, 2001, 생물학적 영양소 제거를 위한 분할주입 SBR 공정의 자동제어, 부경대학교 박사학위논문.
- 17) Satoh, H., T. Mino and T. Matsuo, 1992, Uptake of organic substrates and accumulation of polyhydroalkanoates linked with glycolysis of intracellular carbohydrates under anaerobic conditions in the biological phosphorous removal process, Water Sci. and Technol., 25(5/6), 933-942.
- 18) 한대호, 2001, 연속유입 SBR 공정에서 질소·인 제거효율에 영향을 주는 인자에 관한 연구, 서울시립대학교 석사학위논문.
- 19) Lee, D. S., C.O. Jeon and J.M. Park, 2001, Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a sequencing batch reactor using single sludge system, Water Research, 35(16), 3968-3976.
- 20) Ra, C. S., K. V. Lo and D. S. Mavinic, 1998, Real-time control of two-stage sequencing batch reactor system for the treatment of animal wastewater, Environ. Technol., 19, 343-356.
- 21) Kim, H., O.K. Hao and T.J. McAvoy, 2001, SBR system for phosphorous removal: ASM2 and simplified linear model, J. Environ. Eng., 127(2), 98-104.
- 22) Cheng, N., K.V. Lo and K.H. Yip, 2000, Swine wastewater treatment in a two stage sequencing batch reactor using real-time control, J. Environ. Sci. Health, B35(3), 379-398.
- 23) 김화옥, 1996, SBR을 이용한 축산폐수 처리에 있어서 SRT 영향 및 Pilot 실험, 서울산업대학교 석사학위논문.
- 24) 박성원, 1996, SBR을 이용한 정화조폐액의 영양소 제거에 관한 연구, 고려대학교 석사학위논문.
- 25) 최태전, 1996, SBR 공법을 이용한 돈사폐수 처

SBR을 이용한 소규모 오수처리시설에 관한 연구

- 리시 최적 운전 Cycle 결정, 강원대학교 석사학  
위논문.
- 26) 김해숙, 1997, SBR을 이용한 분뇨와 돈사폐수  
의 혼합처리시 C/N과 C/P비의 영향, 강원대학  
교 석사학위논문.
- 27) 한지용, 1998, SBR공정에서 운전조건외 변화에  
따른 하수중의 질소·인 제거특성, 제주대학교  
석사학위논문.