

변형 연속회분식 반응기를 이용한 오수의 고도처리

김병균 · 서인석 · 홍성택 · 정위득 *

한국수자원공사 수자원연구소

*(주)한국퓨어테크

Advanced Sewage Treatment by the Modified SBR(Sequencing Batch Reactor) Process

Byung-Goon Kim · In-Seok Seo · Sung-Taek Hong · Wi-Deuk Chung*

Water Resources Research Institute, Korea Water Resources Corporation

*PURE TECH KOREA INC.

Abstract

This study was performed to treat a sewage at the upper stream of dam using modified sequencing batch reactor. During the operating period, average COD_{Cr} removal efficiency was about 85 % but average T-N and $PO_4^{3-}-P$ removal efficiencies were 43 % and 30 % respectively. Because the organic matter was very low compared with nitrogen and phosphorous in influent($BOD_5/NH_4^+-N = 2$, $BOD_5/PO_4^{3-}-P = 15.6$), nitrogen and phosphorus removal efficiency was relatively low. Average nitrogen removal efficiency was 50 % at 10 °C or above and it was 36 % at 10 °C or below. As reactor was located in outdoor without any thermostat, temperature decreased at least 2.4 °C in the winter season. Therefore, if we would apply this modified sequencing batch reactor to sewage which concentration of organic matter was very low compared with nitrogen and phosphorous, we have to addition of external carbon and installation of any thermostat.

Keywords: SBR, organic matter, temperature, C/P ratio, C/N ratio.

I. 서 론

상수도 취수원인 호소 및 하천에 대한 수질관리는 매우 중요하게 여겨져 왔으나, 우리나라에서는 아직까지 부영양화를 일으키는 주요 원인물질인 영양염류(N, P)의 관리에 대한 근본적인 대책이 선진국에 비해 미진하고, 댐 상류의 마을단위에서 배출되는 오수관리에 어려움을 겪고 있는 실정이다.

특히, 댐 상류 중소규모 마을에서 배출되는 오수는 댐을 비롯한 상수원 수질에 직접적인 영향을 주므로 관리의 중요성이 크다. 그러나 우리나라 마을에 설치되어있는 대부분의 오수처리 공정은 유기물만을 제거하는 공정으로 부영양화 방지에 실질적인 도움을 주지 못하고 있는 실정이다¹⁾. 따라서 기존 댐의 부영양화 방지를 위한 영양염류 관리대책으로 댐 상류의 마을단위에서 배출하는

중·소규모의 오수 관리방안 도출이 시급히 요구된다.


질소 및 인등의 영양염류를 효율적으로 처리하는 방법으로 기존의 24시간 연속폭기 운영방식에서 호기/무산소/혐기 운영방식으로 공정을 개선하거나 신설하고 있다^{2),3),4),5)}. 특히, 오·폐수의 배출량과 농도가 일정치 않은 중·소규모 오수처리장은 운영이 간단하고 시설비 및 운영비가 적게 소요되는 연속회분식 반응기(Sequencing Batch Reactor, SBR)가 일반적으로 많이 이용되고 있다^{2), 4)}.

본 연구에서는 수자원연구소에서 개발한 변형 연속회분식 반응기(Modified Sequencing Batch Reactor, SBR)를 실제 댐 상류 마을에서 배출되는 오수를 대상으로 pilot plant 실험을 수행하고, 그 결과를 바탕으로 공정 개선방안을 도출하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험장치

본 연구의 변형 연속회분식 반응기는 크게 저류조와 2개의 반응조로 구성된다(Fig. 1). 기존 연속회분식 반응기와 다른 점은 반응조가 2개이며, 제 2반응조에서 제 1반응조로 슬러지를 이송시켜 제 1반응조의 반응단계 후반에서 유기물 부족으로 탈질율이 저하되는 문제점을 해결하였고, 처리수 방류시 디켄터(decanter) 대신 솔레노이드 밸브를 사용하였다. 또한 브로아 및 교반 장치를 타이머와 연계 운영하여 간헐폭기 형태를 반응조를 운영하였다.

Pilot plant는 오수 및 분뇨 등을 배출하는 충북 옥천군 대청댐 상류의 분류식 하수고나거를 설치한 S마을을 대상으로 하였다. 각 반응조의 용량은 저류조 5.4 m³, 제 1반응조 2.55 m³, 제 2반응조 2.415 m³ 이며, 처리수의 배출방법은 2개의 솔레노이드 밸브를 이용하였다. 한 개는 제 2반응조의 바닥으로부터 1.8 m 지점의 중앙에 설치하여 솔레노이드 밸브에서 1/2의 처리수를 배출하도록 하였다. 이때, 상부에 부상한 스크 및 이물질의 배출을 방지하기 위하여 배출구조를  형태로 설치하였다.

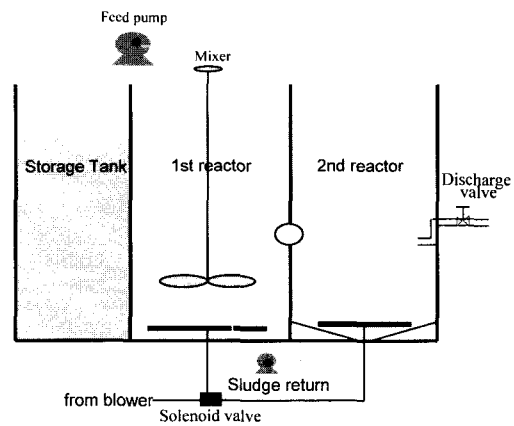


Fig. 1. Schematic diagram of modified SBR

2. 운영방법

변형 연속회분식 반응기는 유입 단계 → 무산소 단계 → 간헐폭기 1단계 → 간헐폭기 2단계 → 침전 단계 → 방류 단계를 1 cycle로 한다 유입 단계는 유입수를 조정조에서 제 1반응조로 10분 동안 유입하는 단계이며, 무산소 단계는 유입이 종료되는 시점으로부터 1~2시간동안 제 1 및 2반응조의 수중펌프를 가동시키고 공기를 공급하지 않는 상태에서 잔존된 질산성 질소를 탈질시키는 단계이며, 간헐폭기 1단계에서 제 1반응조는 비폭기 상태로 운영하고 제 2반응조를 폭기상태로 운영하며, 간헐폭기 2단계는 제 1반응조는 폭기상태로 운영하고 제 2반응조는 비폭기 상태로 운영한다. 간헐폭기 단계에서는 부분적인 질산화 및 탈질을 반복하는 단계이다. 침전 단계는 반응이 완료된 후 고액분리를 위한 단계로 약 1.5~2시간 정도 이루어지며, 이때 처리수의 배출을 원활하게 하기 위해 침전된 슬러지를 제 2반응조에서 제 1반응조로 이송한다. 마지막으로 방류 단계에서는 처리된 처리수를 효율적으로 방출하기 위한 단계로서 설치된 솔레노이드 밸브를 열어 배출하게 된다. 이때, 솔레노이드 밸브는 상부에 설치된 밸브를 우선적으로 열고, 일정시간이 지난 후에 하부의 밸브를 열어 침전된 슬러지의 방출을 최소화시키고자 하였다.

3. 현장적용시 운영모드

충북 옥천군 S마을에 설치한 변형 연속회분식

Table 1. Time Schedule of each stage in Modified SBR operation

Parameter		Fill(hr)	Anoxic time(hr)	IA time (hr)	Settling time(hr)	Drain (hr)	Idle (hr)
Stage I	0-30day	0.17 (10min)	2	6	2	0.5	1.33
Stage II	50-252day	0.17 (10min)	1	8	1.5	0.67 (40min)	0.67 (40min)
Stage III	252-322day	0.17 (10min)	1	20	1.5	0.67 (40min)	0.67 (40min)
Stage IV	322-343day	0.17 (10min)	1	8	1.5	0.67 (40min)	0.67 (40min)

반응기는 5m³/day의 규모로 343일간 운전하였다. 각 운전단계(stage)별 운영인자는 table 1과 같다. Stage I과 stage II의 1 cycle 시간은 동일하게 12시간으로 하여 각 반응단계별 운영시간을 변경하였다. Stage III는 pilot plant 운전 중 동절기로 온도 하강에 따른 질산화가 원활히 이루어지지 않아 1 cycle 시간을 12시간에서 24시간으로 늘리고 폭기/비폭기 총 반응시간을 8시간에서 20시간으로 바꾸어 운전하였다. 동절기가 지나고 다시 온도가 상승하는 시점에서 운영시간은 이전의 운전시간과 동일하게 환원하였다(stage IV).

III. 결과 및 고찰

1. 오수의 배출 특성

1-1. 유입오수의 평균특성

본 연구 대상지역은 약 60세대의 주택이 산재되어 있고, 약간의 소와 돼지를 사육하고 있어 가정에서 발생하는 생활오수와 가축의 사육으로 발생하는 축산폐수 등이 혼합되어 발생하고, 이후 차집관로를 통해 처리장으로 이송된다. 유입수로 이용한 오수의 평균특성은 table 2와 같다. 유입수의 평균 pH는 7.2로 중성이었으며, 평균 alkalinity는 302 mg CaCO₃/L이었다. TCOD_{cr} 및 SCOD_{cr}의 평균농도는 각각 147 mg/L 및 99 mg/L이었으며, BOD₅는 67 mg/L이었다. NH₄⁺-N 및 NO₃⁻-N의 평균농도는 각각 33 mg/L 및 0.9 mg/L이었으며, PO₄³⁻-P 농도는 4.3 mg/L이었다.

Table 2. Characteristics of influent wastewater

Items	Conc. (mg/L)	Items	Conc. (mg/L)
TCOD _{cr}	147	pH	7.1
SCOD _{cr}	99	Alkalinity	302
BOD ₅	67	C/N ¹⁾	4.45
TSS	28	BOD ₅ /NH ₄ ⁺ -N	2
NH ₄ ⁺ -N	33	C/P ²⁾	34
NO ₃ ⁻ -N	0.9	BOD ₅ /PO ₄ ³⁻ -P	15.6
PO ₄ ³⁻ -P	4.3		

1) C/N : TCOD_{cr}/NH₄⁺-N ratio, 2) C/P : TCOD_{cr}/PO₄³⁻-P ratio

유입수의 TCOD/NH₄⁺-N의 비율은 4.45, BOD₅/NH₄⁺-N의 비율은 2 정도였으며, TCOD/PO₄³⁻-P의 비율은 34, BOD₅/PO₄³⁻-P의 비율은 15.6 정도로서 유기물에 대한 질소 및 인의 농도가 매우 높음을 알 수 있다. 이는 기존에 설치한 가정의 정화조에서 오랜 시간동안 오수가 머무르는 동안 혐기성 반응을 일으켜 유기물은 분해되고 이에 따라 질소 및 인의 농도는 상대적으로 높아졌기 때문으로 생각된다.

1-2. 유입오수의 시간별 특성

연구대상지역인 댐 상류의 마을에서 발생하는 오수의 특성을 정확하게 파악하기 위해 12 - 24시간 동안 계속적으로 유입수의 수질을 모니터링 하였다(Fig. 2).

유입수의 질소 및 인의 농도는 시간의 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않고 일정한 농도로 배출되고 있으나, 유기물의 농도는 오전 9시경과 저녁

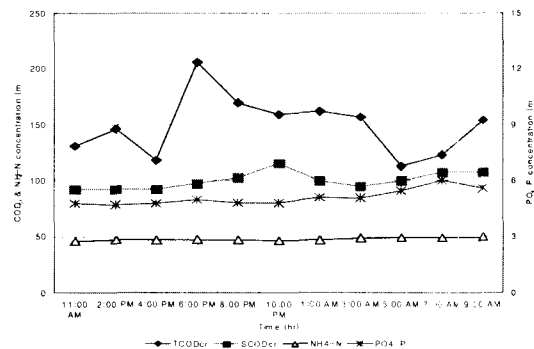


Fig. 2. Daily variation of influent concentration

6시경에 높은 농도를 보이는 일반적인 경향을 나타내고 있다.

유입수 중의 pH 및 알칼리도 변화는 거의 나타나지 않았으며, pH는 일반적인 오수와 거의 유사한 7.15 정도이었으며, 알칼리도는 약 300 mgCaCO₃/L 였다.

2. 유기물, 질소 인 제거효율

2-1. 반응조 내 온도변화

Fig. 3에는 343일간의 운전기간 중 pilot plant 반응조 내 온도의 변화를 나타내었다.

그림에서와 같이 5월부터 8월까지의 약 15 °C에서 28 °C까지 온도가 상승하다가 11월 26일(운전 후 190일)부터 3월 30일(운전 후 315일)까지 약 125일간 10 °C 이하의 온도를 보이고, 1월 22일, 최저 2.4 °C까지 감소하는 경향을 보이며, 4월부터는 온도가 상승함을 알 수 있다. 겨울철 반응조 내 수온이 낮아지는 이유 중 pilot plant가 지하에 매설되지 않고 특별한 보온장치도 없이 옥외에 설치하였기 때문이다. 수온의 측정은 오전, 정오, 오후 3차례 측정치를 평균한 값으로 운전자가 측정하지 못한 밤 시간에는 더욱 낮은 수온을 보일 것으로 예상된다

2-2. 유기물 제거효율 평가

Fig. 4에는 유입 COD_{cr}, 유출 COD_{cr} 및 COD_{cr} 제거효율을 나타내었다. 유입수 TCOD_{cr}은 최소 약 48 mg/L에서 최대 328 mg/L 범위로 농도변화가 심하며, 평균 TCOD_{cr}은 147 mg/L, SCOD_{cr}은 99

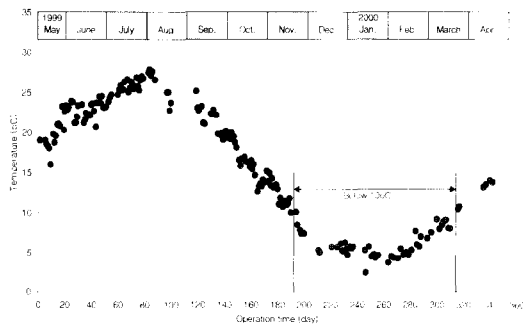


Fig. 3. Variation of temperature in SBR reactor

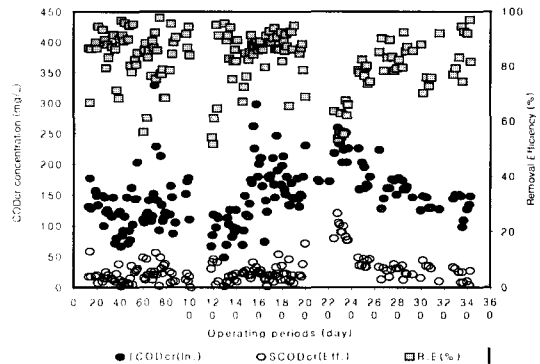


Fig. 4. Variation of TCOD_{cr}, SCOD_{cr} concentration and COD removal efficiency

mg/L이다. 방류수의 SCOD_{cr}은 대부분 50 mg/L 이하를 유지하고 있으나, 동절기에는 처리효율이 낮아져 방류수가 120 mg/L로 높아지기도 한다. 동절기를 제외한 기간 중 방류수는 평균 21 mg/L의 농도를 보이고 있으며, COD_{cr}의 처리효율은 평균 85 %의 높은 처리효율을 보이고 있다.

우리나라에서는 오수처리시 방류수의 법적기준을 BOD와 COD_{Min}으로 규제하므로 본 실험에 사용한 오수의 COD_{cr}과 BOD 및 COD_{Min}의 상관관계를 구하면, COD_{cr}은 BOD에 비해 약 2.2배, COD_{Min}에 비해 약 3배의 농도를 보이므로, 방류수 COD_{cr}의 평균농도인 21 mg/L를 BOD로 환산하면 약 10 mg/L, COD_{Min}으로 환산하면 약 7 mg/L가 될 것으로 추정되고, 동절기 방류수 COD_{cr}의 최고농도인 120 mg/L는 BOD로 환산하면 약 55 mg/L, COD_{Min}으로 환산하면 약 40 mg/L가 될 것으로 추정된다.

위와 같은 결과로 볼 때, 동절기에는 방류수 법적기준을 초과할 가능성이 있으므로, 실공정 적용시 시설물의 지하 매설 등의 동절기 보온대책이 필요할 것으로 생각된다.

2-3. 총질소의 농도변화

총질소 평균 유입농도는 63.3 mg/L, 평균 유출농도 37.3 mg/L로 평균 제거효율은 약 43 %의 낮은 값을 나타내는데 이는 유입수 성상(BOD₅/NH₄⁺-N = 2)이 상대적으로 유기물에 비해 질소 성분이 높기 때문이며, 높은 제거효율을 얻기 위해서는 인위적으로 유기물을 공급해 주어야 할 것으

로 판단된다. 또한, 온도에 따른 총질소 제거효율을 비교하면 각각 10°C 이상에서 평균 49.5 %, 10°C 이하에서 평균 35.6 %로 13.9 %의 효율 차이를 보이고 있다. 위와 같은 결과에서 총질소 제거는 유입수 성상(C/N비)과 온도에 큰 영향을 받을 수 있다.

2-4. 암모니아성 질소의 농도변화

Fig. 5에는 유입 암모니아성 질소, 유출 암모니아성 질소 농도 변화를 나타내었다. 유입 암모니아성 질소 농도는 평균 38 mg/L이며, 유출 암모니아성 질소 농도는 평균 14 mg/L로, 질산화 정도를 백분율로 나타내면 63 %의 질산화 정도를 보이고 있다.

Fig. 6에서는 온도에 따른 질산화 정도를 나타내었다. 수온 10°C 이상에서는 88 % 이상의 질산화 효율을 나타내나, 수온이 낮아짐에 따라 급격한 질산화 효율 감소를 나타내고 있으며, 수온 상승에 따라 다시 질산화 효율이 회복되는 경향을 보이고 있다. 질산화 반응은 온도 변화에 매우 민감하게 영향을 받을 수 있다.

2-5. 질산성 질소의 농도변화

유입 질산성 질소 및 유출 질산성 질소 농도의 변화를 Fig. 7에 나타내었다.

유입수에 존재하는 질산성 질소는 매우 낮은 농도로 유입되며, 평균 유입농도는 0.88 mg/L였다. 방류수에 존재하는 질산성 질소의 농도는 질산화 반응에 의해 생성되고, 탈질반응을 거쳐 질소가스로 전환되어 대기 중으로 방출된다.

그러나, 그림에서와 같이 유입수의 특성상 BOD/

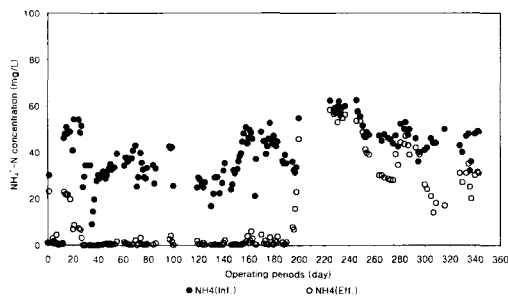


Fig. 5. Variation of NH4-N concentration

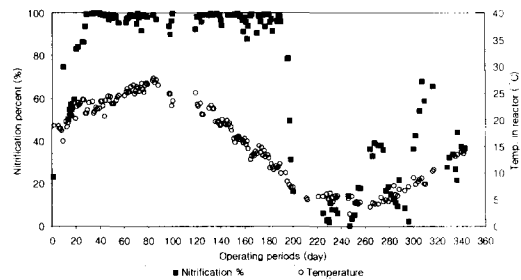


Fig. 6. Variation of nitrification efficiency according to temperature

T-N 비율이 상대적으로 낮아 탈질에 필요한 유기원을 충분히 공급하지 못하므로 발생한 질산성 질소가 탈질반응을 원활히 수행하지 못하여 반응조 내에 축적되는 현상을 확연하게 보여주고 있다. 10°C 이하의 동절기에는 유출 질산성 질소 농도가 4.1 mg/L로, 10°C 이상일 때의 유출 질산성 질소 농도 16 mg/L보다 매우 낮게 나타났는데, 이는 탈질반응이 원활하게 일어나서가 아니라 낮은 수온에 의한 저조한 질산화 반응으로 인한 것이다.

2-6. 인의 농도변화

변형 연속회분식 반응기에서 오수처리 시 유입 인산염 인(PO₄-P) 및 유출 인산염 인의 농도를 Fig. 8에 나타내었다. 유입수에 존재하는 인산염 인의 농도는 운전 초기부터 서서히 증가하다가 운전 70일 이후부터 120일 사이에서 최대값을 보인 후 120일 부터 서서히 감소하는 경향을 보인다. 이는 7월 말부터 9월까지 높아지는 온도의 영향으로 인산염 인의 농도가 증가하는 것으로 판단된다.

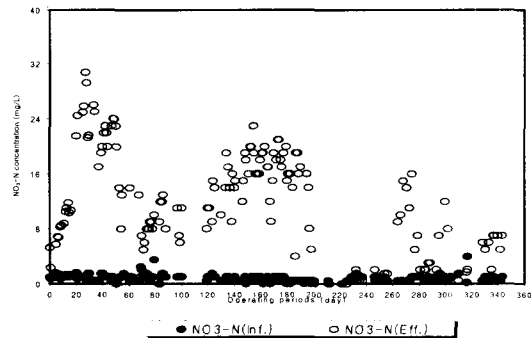


Fig. 7. Variation of NO₃-N concentration

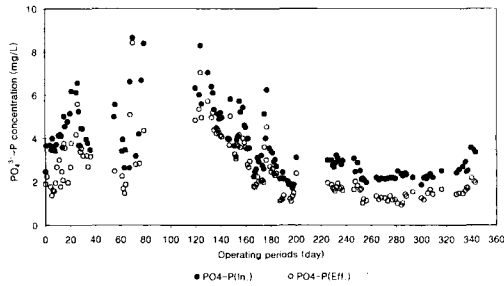


Fig. 8. Variation of PO4-P concentration

운전 중 유입 인산염 인 농도는 평균 3.61 mg/L이며, 유출 인산염 인 농도는 평균 2.54 mg/L이고, 30 %의 낮은 처리효율을 보인다. 이를 수온 10 °C 이하와 10 °C 이상으로 나누어 평가하면 10 °C 이하에서는 유입 인산염 인 농도가 평균 2.41 mg/L로 전체 평균값보다 약 1.2 mg/L 낮게 유입되며, 유출 인산염 인 농도는 1.48 mg/L, 처리효율은 39 %로 상대적으로 높은 효율은 보인다. 반면 10 °C 이상에서는 24 %의 낮은 효율을 보이고 있다. 인이 낮은 처리효율을 보이는 이유는 미생물에 의한 인방출에 필요한 유기물을 얻기에는 반응조 내의 유기물 농도가 너무 낮았고, 이 유기물마저도 탈질 미생물과의 경쟁에 의해 이용하지 못하므로, 인의 과잉섭취 및 방출을 원활히 수행하지 못하기 때문인 것으로 생각되며, 질산화 반응이 원활히 일어나지 못한 동절기에는 상대적으로 인 제거효율이 증가하였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Pilot plant 운영기간 중 유기물의 제거 효율은

높았으나, 질소 및 인 처리효율은 비교적 낮는데 이는 유입수 BOD₅/NH₄⁺-N의 비율이 2, BOD₅/PO₄³⁻-P의 비율이 15.6 정도로 낮기 때문으로 판단된다.

2. 온도에 따른 질산화 평가에서 수온 10 °C 이상에서는 88 % 이상의 높은 질산화 효율을 보이나, 수온이 낮아짐에 따라 질산화 효율도 급격히 감소하여 수온의 영향이 크게 작용하였다. 따라서, 동절기에는 시설물의 지하 매설 등의 동절기 보온대책이 필요한 것으로 판단된다.
3. 동절기에는 상대적으로 인 제거효율이 높아지는 경향이 있는데, 이는 상대적으로 낮아진 질산화율로 인하여 인 방출에 유기물을 많이 이용하였기 때문인 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 곽종운 : 하수의 화학적 처리를 통한 원수수질 개선, 생명의 물 살리기 정책 심포지움, 1999.
2. U.S. EPA : Design Manual Phosphorous Removal, 1987.
3. Krichten, D. J., et al. : Design and Start-up of Several Full-scale A/O Plants, Proceeding of an IAWPRC Specialized Conference, 273-283, 1987.
4. Grady, C. P. L., et al. : Biological Wastewater Treatment, 1999.
5. 서인석, 김병균, 이상일 : 간헐폭기 활성슬러지 공정에서 C/N비와 질소제거의 관계, 대한위생학회지, 제 13권 2호, 57-65., 1998.