

혐기 및 무산소조를 이용한 SBR 공정에서 오염물질 제거 및 슬러지 저감에 관한 연구

백병천[†] · 김태령 · 김용문*

전남대학교 환경시스템공학과

* (주)에이팩 기술연구소

A Study on the Pollutant Removal and Sludge Reduction in the SBR Process with Anaerobic and Anoxic reactors

Byeong-Cheon Paik[†] · Tae-Ryeong Kim · Young-Mun Kim*

Department of Environmental System Engineering, Chonnam National University

*Technical Research Center, APEC Co., Ltd.

Abstract

In this study, pollutants removal and sludge reduction in the SBR(sequencing batch reactor) process with anaerobic and anoxic tanks were investigated. Average organic removal efficiencies of BOD₅ and COD were 96.3% and 98.8%, respectively, and average concentrations of SS in effluent was 4.8 mg/L. Average nutrient removal efficiencies of T-N, NH₃-N and T-P were 86.7%, 92.3%, and 62.5%, respectively. It showed that large amounts of organic matter and nutrients were removed from the SBR reactor. Before sludge returning to the anaerobic tank, the value of measured sludge yield(Y_{obs}) was 0.130, which was suggested that a large amount of sludge was reduced in the SBR process with anaerobic and anoxic tanks. After 20 days sludge returning to the anaerobic tank, the value of sludge yield(Y_{obs}) was 0.033, which revealed the large amount of sludge reduction in the anaerobic tank.

Keywords : Aerobic tank, Anoxic tank, SBR tank, Pollutants removal, Sludge yield

1. 서론

현재 질소·인 등 영양염류를 중심으로 강화된 방류수 수질 기준에 적합한 공법 변형 및 개발이 요구되며, 추가적으로 슬러지를 반응기내에 탄소원으로 활용하거나 저감할 수 있는 기술에 대한 필요성이 절실히 요구되고 있다¹⁻²⁾. 연속회분식공정(이하 SBR)은 유입, 포기, 침전, 유출, 무부하 운전 등의 공정을

연속적으로 반복하여 단일 반응기에서 호기적 조건과 무산소 조건을 동시에 운전할 수 있으며, 이와 같은 조건으로 유기물 뿐만 아니라 질소와 인 성분의 제거도 가능하다는 특징을 가지고 있다. 또한 현장 적용 시 설치면적이 작으면서 비교적 낮은 SVI (sludge volume index)를 유지할 수 있고, 구조가 간단하여 설치비용이 낮은 공법에 포함되지만 반응기 안에서 여러 종의 미생물이 분포

[†]Corresponding author E-mail: bpaik@jnu.ac.kr

하므로 전자수용체, 먹이, 용존산소 등을 놓고 경쟁을 하는 메카니즘을 정확히 파악하는데 다소 어려움이 있다³⁻⁶⁾.

SBR 공정을 이용하는 경우 질소·인 동시 제거를 위해 여러 반응단계의 조합이 가능하다. 또한 별도의 반응 공정을 설치하여 각각의 효율을 높일 수 있는 강점이 있다. 이와 관련된 국내 SBR 기술 수준은 중·소규모 처리장에 대해서는 보급화 수준에 있으나 영양염류 제거를 위한 공정의 최적화, 운전 기술 등은 초기 상용화 단계수준으로 평가할 수 있다⁷⁻⁸⁾.

한편, 국내의 경우 2000년 연간 하수슬러지 발생량은 1,741천톤, 2005년에 2,561천톤, 2008년에 2,817천톤으로 지속적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 1996년에 발효된 런던협약에 따라 2013년부터 슬러지의 해양 투기가 전면 금지됨에 따라 슬러지 처리 및 처분에 대한 대안 마련이 시급한 실정이다⁹⁾. 이에 따라 최근 소각, 탄화, 퇴비화 등의 다양한 사후처리기술이 개발되고 있으며, 특히 하수슬러지의 수처리 내 원천 감량은 국내 하수의 낮은 C/N비를 극복하기 위해 슬러지 내 유기물을 탄소원으로 활용하고자 하는 동시에 슬러지 감량화 연구도 증가하고 있다¹⁰⁾. 본 연구에서는 SBR조에 혐기조 및 무산소조를 별도로 설치하여 SBR 공정의 안정성을 높

이는 동시에 오염물질 제거 및 슬러지 저감 특성을 연구하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공정 및 운전

본 연구에서 사용한 혐기조를 갖는 SBR 공정은 Fig. 1에 나타내었다. 공정에서 반응조의 설계 부피 비는 혐기조(18 L):무산소조(18 L):SBR조(36 L)= 1:1:2 로 산정되었으나, 실제 운전 중 반응조의 부피는 수위조절 등을 통하여 혐기조(16.8 L):무산소조(13.2 L):SBR조(33.6 L)로 1:0.76:2의 부피비를 보였다.

Fig. 2는 SBR 혐기 및 무산소조를 갖는 SBR 공정의 각 반응조 상태를 보여주며, 운전 순서는 다음과 같다.

- ① SOL-101 밸브가 열리고 유입수가 유입된다.
- ② 혐기(Anaerobic)조의 수위가 상승한다.
- ③ 혐기조의 수위가 일정 높이까지 상승하면 무산소(Anoxic)조의 수위가 상승한다.
- ④ 무산소조의 수위가 일정높이까지 상승하여 수위계가 올라가면 SOL-101 밸브가 닫혀 유입이 중단된다.
- ⑤ SOL-102 밸브가 열리고 펌프가 가동되어 폭기와 혼합이 일어난다.

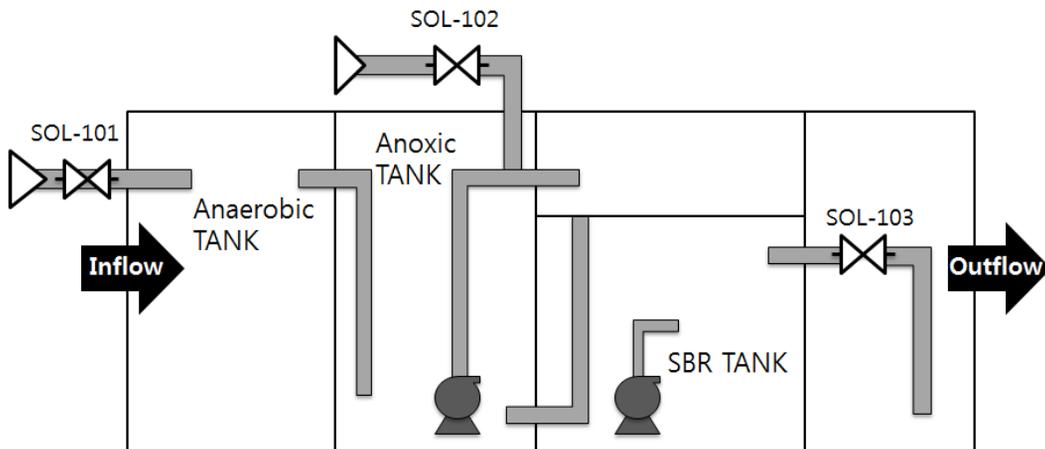


Fig.1. SBR process with anaerobic and anoxic reactors.

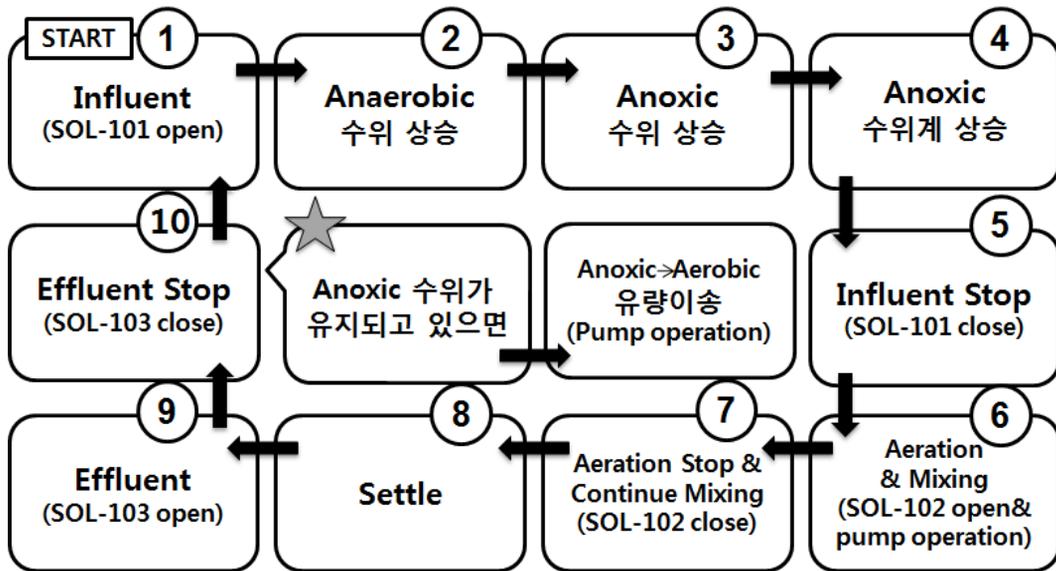


Fig. 2. Operation of SBR Process with anaerobic and anoxic reactors.

- ⑥ SOL-102 밸브가 닫히고 폭기가 중단된다.(혼합은 계속된다.)
- ⑦ 펌프의 작동이 중단되고 반응기 내에서 안정이 일어난다.
- ⑧ SOL-103 밸브가 열리고 처리된 상등수가 유출된다.
- ⑨ SOL-103 밸브가 닫히고 처리수의 유출이 중단된다.
- ⑩ 무산소조의 수위가 유지되고 있으면 무산소조에서 SBR조로 유량이 이송되고, 무산소조의 수위가 유지되지 않으면 ①로 돌아가 반응이 계속된다.

그리고 SBR 조의 운전모드는 유입 40분, 호기 120분, 무산소(교반) 120분, 침전 50분, 배출 30분으로 설정하여 SBR조에서의 체류시간(HRT)을 6시간으로 운전하였다. 반응조의 미생물 식종을 위하여 Y시 하수처리장에서 반송슬러지를 채취하여 슬러지를 1 mm 체로 걸러 식종하였다.

2.2. 유입수

반응 운전에 사용되는 유입수의 성분을

Table 1과 같이 제조하였다. BOD₅, COD, T-N, T-P, Alkalinity의 농도를 맞추주기 위하여 수돗물을 사용하고, Glucose, NH₄HCO₃, KH₂PO₄ 를 주입하였고, 그 외 영양염류를 공급해 주기 위하여 MgSO₄ · 7H₂O, MnSO₄ · H₂O, FeCl₂ · 7H₂O, CaCl₂ · 2H₂O, CuSO₄, ZnSO₄ · 7H₂O를 주입하였다⁴⁻⁵.

Table 1. Composition of influent

Components	Conc. (mg/L)
BOD ₅	280
COD _{Mn}	250
T-N	40
T-P	4
Alkalinity	200 as CaCO ₃
pH	8.0-8.2

2.3. 분석방법

실험기간 동안 반응조의 유입, 유출수에 대하여 BOD₅, COD_{Mn}, SS, T-N, NH₃-N, NO₃-N,

NO₂-N, T-P, PO₄-P를 매일 시료 채취하여 분석하였다. 각 실험항목, MLSS 및 MLVSS의 분석방법은 수질오염공정시험법에 준하여 실험하였다¹²⁾. 24시간 이상 시료를 보관할 경우에는 시료 200 mL당 0.1 N 황산 1 mL를 첨가한 후 4 °C에서 냉장보관 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유기물 제거

Fig. 3과 Fig. 4는 혐기조 및 무산소조를 갖는 SBR 공정에서 운전기간 동안 유기물 제거 효율을 보여준다. 공정 유출수의 BOD₅농도는 7.6-19.1 mg/L의 범위로 평균농도는 10.3 mg/L였으며, 처리효율은 93.2-97.3%로 평균 96.3%의 처리효율을 보였으며, COD농도는 0.4-11.9 mg/L의 범위로 평균농도는 3.0 mg/L였으며, 처리효율은 95.3-99.8%로 평균 98.8%의 처리효율을 보였다. Fig. 5는 운전기간 동안 유출수 중의 SS 농도를 보여준다. 유출수의 SS 농도는 1.0-13.5 mg/L의 범위로 평균농도는 4.8 mg/L로 나타났다.

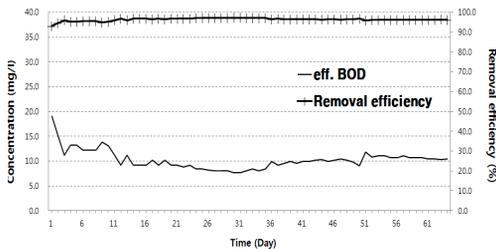


Fig. 3. Removal efficiency of BOD₅.

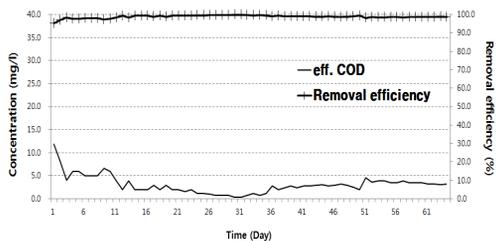


Fig. 4. Removal efficiency of COD.

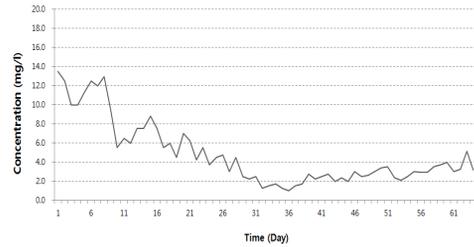


Fig. 5. Effluent concentration of SS.

3.2. 영양염류 제거

Fig. 6과 Fig. 7은 혐기 및 무산소 조를 갖는 SBR 공정에서 운전기간 동안 영양염류 제거 효율을 보여준다. 공정 유출수의 T-N 농도는 2.93-10.34 mg/L의 범위로 평균 농도는 5.33 mg/L였으며, 처리효율은 74.1-92.7%로 평균 86.7%의 처리효율을 보였다. 유출수의 NH₃-N의 평균농도는 3.07 mg/L, NO₃-N의 평균농도는 1.75 mg/L, NO₂-N의 평균농도는 0.11 mg/L으로 나타났다. 한편, 공정 유출수의 T-P 농도는 0.99-2.90 mg/L의 범위로 평균농도는 1.50 mg/L였으며, 처리효율은 27.5-75.3%로 평균 62.5%의 처리효율을 보였으며, 유출수의 PO₄-P 농도는 0.89-2.83 mg/L의 범위로 평균농도는 1.43 mg/L으로 나타났다.

2012년 1월 1일부터 새롭게 적용되는 수질기준¹¹⁾은 1일 하수처리용량 500 m³이상의 기준에서 총인의 수질 기준이 매우 강화되어 I-III지역에 해당하는 0.2, 0.3, 0.5 mg/L의 기준을 만족하기 위해서는 본 공정 특성상 총인의 처리효율을 높이고 수질기준을 만족하기 위하여 화학적인 인 처리 방법 및 여과 처리 등의 후속공정 설치가 요구된다.

3.3. 제거효율

Fig. 8과 Fig. 9는 각 반응조에서 유기물 제거 효율을 보여준다. 유입수 BOD₅농도가 280 mg/L일때 혐기조 211.41 mg/L, 무산소조 143.85 mg/L, SBR조 9.06 mg/L로 반응조를 거

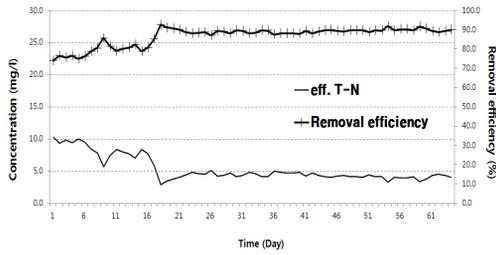


Fig. 6. Removal efficiency of T-N.

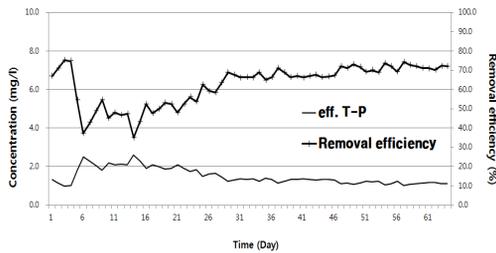


Fig. 7. Removal efficiency of T-P.

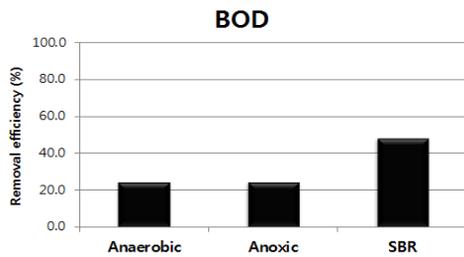


Fig. 8. BOD₅ removal efficiency in each reactors.

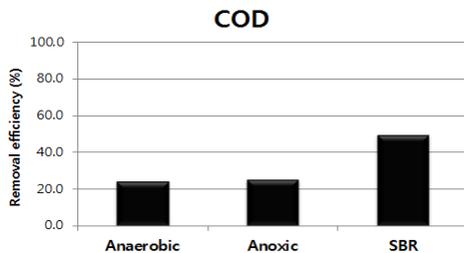


Fig. 9. COD removal efficiency in each reactors.

치면서 24.5%, 24.2%, 48.1%의 제거효율을 보였다. 유입수 COD농도가 250 mg/L일 때 혐

기조 189.3 mg/L, 무산소조 126.1 mg/L, SBR 조 1.96mg/L로 반응조를 거치면서 24.3%, 25.3%, 49.3%의 제거효율을 보였다.

Fig. 10과 Fig. 11은 각 반응조에서 영양염류 제거효율을 보여준다. 유입수 T-N 농도가 40 mg/L일 때 혐기조 35.07mg/L, 무산소조 29.43 mg/L, SBR조 3.87 mg/L로 반응조를 거치면서 12.3%, 14.1%, 63.9%의 제거효율을 보였다. 유입수 T-P농도가 4 mg/L일 때 혐기조 3.67 mg/L, 무산소조 3.29 mg/L, SBR조 1.30 mg/L로 반응조를 거치면서 8.3%, 9.5%, 49.7%의 제거효율을 보였다.

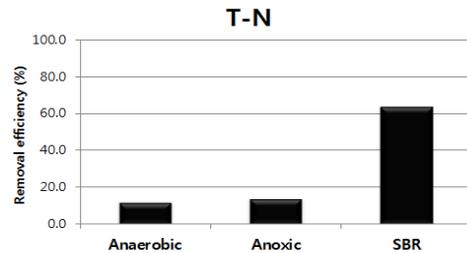


Fig. 10. T-N removal efficiency in each reactors.

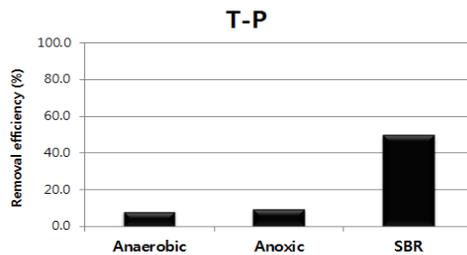


Fig. 11. T-P removal efficiency in each reactors.

3.4. 슬러지 발생량 및 저감율

3.4.1. 발생량

Table 2에 운전 62일 후에 각 반응조에서의 MLSS 농도와 공정에서의 총 MLSS 양을 나타내었다. 반응조 별 초기 식중 MLSS 농도는 혐기조 205 mg/L, 무산소조 0 mg/L, SBR

Table 2. MLSS concentrations in each reactors and total MLSS amounts

Item	Initial seed	After seed 62 days		MLSS amounts(g) of effluent during 62 days
	MLSS of seed sludge (mg/L)	MLSS before sludge return (mg/L)	MLSS after sludge return (mg/L)	
Anaerobic reactor (16.8 L)	205	400	2,233	19.94
Anoxic reactor (13.2 L)	0	1,300	1,450	
SBR reactor (33.6 L)	2,460	3,675	2,700	
Total MLSS amount (g)	86.1	147.36	146.92	

Table 3. Observed yield(Y_{obs}) according to solid retention time(SRT)

$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + k_d \cdot \theta_c}$	SRT(θ_c , day)	Y_{obs}	Sludge reduction(%)
	10	0.30	56.7
	15	0.24	45.8
	20	0.20	35.0
	25	0.17	23.5
	30	0.15	13.3

조 2,460 mg/L였다. 운전 62일 후에 혐기조의 MLSS 농도는 400 mg/L, 무산소조 1,300 mg/L, SBR조 3,675 mg/L로 슬러지 양이 증가하였다. 운전 62일동안 유출된 MLSS 양은 총 19.94 g으로 나타났으며, MLSS중 MLVSS가 차지하는 비율은 86% 였다. 그리고 SBR조 내의 슬러지를 혐기조로 반송 시킨 후 각 반응조 슬러지 양은 혐기조 2,233 mg/L, 무산소조 1,450 mg/L, SBR조 2,700 mg/L로 측정되었다. 이 자료를 토대로 62일동안 생성된 슬러지 양(MLVSS)은 69.8 g으로 산정되었으며, 62일 동안 제거된 평균 BOD₅양은 535.7 g 으로 산정되어 측정된 슬러지 생산계수(Y_{obs}) 값은 0.130로 나타났다.

3.4.2. 저감율

일반적으로 도시하수의 경우 전형적인 생

산계수(Y) 값은 0.6 mg VSS/mg BOD₅, 미생물 분해계수(k_d)는 0.01 g VSS/g VSS · d으로 보고되고 있다¹³⁾. 이들 값을 이용하여 미생물체류시간(SRT)에 따른 측정된 슬러지 생산계수(Y_{obs}) 값을 산정하여 Table 3에 나타내었다. SRT가 10일 일 경우 Y_{obs} 는 0.30, 15일 일 경우 Y_{obs} 는 0.24, 20일 일 경우 Y_{obs} 는 0.20, 25일 일 경우 Y_{obs} 는 0.17, 30일 일 경우 Y_{obs} 는 0.15으로 산정되었다. SBR조 운전에 따라 측정된 Y_{obs} 값과 일반하수의 SRT 변화에 따라 산정된 Y_{obs} 값을 비교하여 슬러지 저감율을 분석한 결과 SRT가 10일 일때 56.7%, 15일 일때 45.8%, 20일 일때 35.0%, 25일 일때 23.5%, 30일 일때 13.3%의 슬러지 저감율을 보였다.

3.4.3. 슬러지 반송 후 슬러지 발생량

Table 4에 슬러지를 혐기조로 반송시킨 후

Table 4. MLSS concentrations and total amounts after sludge return to the anaerobic reactor

Item	MLSS after sludge return (mg/L)	MLSS after sludge return 20days (mg/L)	MLSS amounts(g) of effluent during 20days
Anaerobic reactor (16.8 L)	2,233	802	
Anoxic reactor (13.2 L)	1,450	2,700	
SBR reactor (33.6 L)	2,700	3,050	2.01
Total MLSS amount (g)	146.92	150.89	

각 반응조에서의 MLSS 농도와 공정에서의 총 MLSS 양을 나타내었다. 반응조 별 초기 식중 MLSS 농도는 혐기조 2,223 mg/L, 무산소조 1,450 mg/L, SBR조 2,700 mg/L로 측정되었고, 반송시킨 후 운전 20일 후에 각 반응조의 MLSS 농도는 혐기조 802 mg/L, 무산소조 2,700 mg/L, SBR조 3,050 mg/L로 측정되었다. 운전 20일 동안 유출된 MLSS 양은 총 2.01 g으로 나타났으며, MLSS중 MLVSS가 차지하는 비율은 86% 였다. 이 자료를 토대로 20일 동안 생성된 슬러지 양(MLVSS)은 5.748 g으로 산정되었으며, 20일 동안 제거된 평균 BOD₅ 양은 172.8 g으로 산정되어 측정된 생산계수(Y_{obs}) 값은 0.033으로 산정되었다. 이는 혐기조로 슬러지 반송 없이 운전하였을 때 산정된 Y_{obs} 값 0.130에 비하여 매우 낮은 바, 혐기조에서 많은 양의 슬러지 감량이 일어나는 것으로 나타났다.

4. 결론

SBR 공정의 안정성을 높이고 슬러지 발생량을 저감시키기 위해 혐기조 및 무산소조를 갖는 SBR 공정을 Lab scale로 운전하였으며 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 운전기간 동안 평균 유기물 제거효율은 BOD₅ 96.3%, COD 98.8%, 평균 SS 유출 농도는 4.8 mg/L으로 나타났으며, 평균

영양염류 제거효율은 T-N 86.7%, NH₃-N 92.3%, T-P 62.5%로 나타났다.

- 2) 혐기조, 무산소조, SBR 조에서 유기물 제거효율은 BOD₅의 경우 혐기조 24.5%, 무산소조 24.2%, SBR조 48.1%, COD의 경우 혐기조 24.3%, 무산소조 25.3%, SBR조 49.3%로 나타났으며, 영양염류 제거효율은 T-N의 경우 혐기조 12.3%, 무산소조 14.1%, SBR조 63.9%, T-P의 경우 혐기조 8.3%, 무산소조 9.5%, SBR조 49.7%로 나타나 대부분의 유기물 및 영양염류는 SBR조에서 제거되는 것으로 나타났다.
- 3) 혐기조로 슬러지 반송전의 운전기간 동안 측정된 슬러지 생산계수(Y_{obs}) 값은 0.130로 나타났으며, 일반 도시하수의 경우 SRT가 10, 15, 20, 25, 30 days 일 때 각각 Y_{obs}값이 0.30, 0.24, 0.20, 0.17, 0.15로 산정된 값과 비교할 때 혐기조 및 무산소조를 갖는 SBR 공정에서 많은 양의 슬러지가 저감되는 것을 시사하였다.
- 4) 혐기조로의 슬러지 반송 20일 후에 측정된 슬러지 생산계수(Y_{obs}) 값은 0.033으로 나타났으며, 이는 혐기조로 슬러지 반송 없이 운전하였을 때 측정된 생산계수(Y_{obs}) 값 0.130에 비하여 매우 낮은 바, 혐기조에서 많은 양의 슬러지 감량이 일어나는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구과제는 환경부지정 전남녹색환경지원센터의 연구비 지원에 의해 수행한 연구과제입니다.

References

1. 전향배(1993), 연속회분식 반응조를 이용한 질소 및 인 제거 공정개발, 석사학위논문, 한국과학기술원.
2. Lee, H, Brereton, J.A, Mavinic, D.S., Fiorante, R.A., Oldham, W.K. and Paisely, J.K(2000), Nutrient removal with methanol as a carbon source, *Environmental Technology*, 22. pp. 1223-1235.
3. EPA(1985), Technology Assessment of Sequencing Batch Reactor, Project Summary, pp. 600/52 - 85/007.
4. 권중천(1988), 질소제거를 위한 연속회분식 반응조의 운전방식 연구, 석사학위논문, 한국과학기술원, pp. 14-25.
5. 박홍석(1990), 연속회분식 고정화 시스템을 이용한 질소, 인의 동시제거, 박사학위논문, 한국과학기술원.
6. 정진영(1999), 연속회분식 반응기를 이용한 고농도 암모니아성 질소 함유폐수의 처리, 석사학위논문, 한국과학기술원.
7. 김영준(2004), 단계주입 순환형 연속회분식 반응기를 이용한 하수처리에 관한 연구, 석사학위논문, 전남대학교.
8. 양형재(2007), 질소 인 처리기술, 동화기술, pp. 50-73.
9. 환경부(2008), 환경통계.
10. 백미경(2009), 질소제거 및 슬러지 감량화를 위한 ISA 공정의 효율성 개선에 관한 연구, 석사학위논문, 서울시립대학교.
11. 환경부(2011), 하수도법 시행규칙<별표1>.
12. 최규철, 권오억, 김동욱, 감용환, 박광하, 이우식, 이징연, 전세진, 정수경(2006), 수질오염 공정시험방법주해, 동화기술, pp. 161-298.
13. Metcalf and Eddy(2004), *Wastewater Engineering(Treatment and Reuse)*, 4th edition, McGraw Hill, pp. 580-598.