

RO 농축수 처리를 위한 SBR 공정 적용에 관한 연구

A Study on Application of SBR Process for RO Retentate Treatment

김일회[†] · 주현종*
Il-Whee Kim[†] · Hyun-Jong Joo*

동국대학교 토목환경공학과 · *경기대학교 환경에너지시스템공학과
Department of Civil and Environmental System Engineering, Dongguk University
*Department of Environmental Energy Systems Engineering, Kyonggi University

(2011년 7월 2일 접수, 2012년 2월 24일 채택)

Abstract : In this study, Application of sequencing batch reactor (SBR) process for RO retentate treatment was performed. Efficiency of treatment by load and temperature variation was tested. The SBR process was operated two types as HRT per one cycle was 8 and 12 hours, respectively. Methanol was injected for an effective denitrification owing to low C/N ratio of the RO retentate. TN removal efficiency of the SBR process was relatively stable at the change of flow-rate and temperature. The optimum time cycle of SBR process was 2 cycle/day for TN removal, and in the case of 3 cycle/day, the effluent TN concentration was found under the effluent quality standard. In the result of assessment, the application of SBR process for RO retentate treatment was effective and could be utilized to design for the wastewater treatment plant. The specific nitrification rate (SNR) and specific denitrification rate (SDNR) were 0.043~0.066 kg NH₃-N/kg MLVSS·day and 0.096~0.287 kg NO₃⁻-N/kg MLVSS·day, respectively. The derived kinetic could be applied for design to the aerobic and anoxic tank in the RO retentate treatment.

Key Words : SBR Process, RO Retentate, Nitrogen Removal, Temperature

요약 : 본 연구는 역삼투공정에서 발생하는 농축수의 생물학적 처리에 관한 것으로, SBR공정의 처리성능 및 부하변동과 온도변화에 따른 효율을 평가하였다. SBR공정의 cycle당 HRT가 각각 8시간과 12시간으로 2가지 형태로 공정운전이 이루어졌으며, RO농축수의 낮은 C/N비 때문에 효과적인 탈질을 위해 메탄올을 주입하였다. 유량과 온도의 변화에도 SBR공정의 질소 제거 효율은 비교적 안정적인 것으로 나타났다. SBR공정의 최적 time cycle은 2 cycle/day이지만, 3 cycle/day 조건에서도 방류수 TN 농도가 수질기준 이하로 나타났다. 평가결과 RO 농축수 처리를 위한 SBR공정의 적용은 효과적이었으며, 폐수처리장 설계에 활용이 가능할 것이다. SNR과 SDNR은 각각 0.043~0.066 kg NH₃-N/kg MLVSS·day와 0.096~0.287 kg NO₃⁻-N/kg MLVSS·day로 나타났다. 도출된 동역학적인자는 RO농축수 처리에서 포기조와 무산소조 설계에 적용이 가능할 것이다.

주제어 : SBR공정, RO농축수, 질소제거, 온도

1. 서론

세계적으로 물 부족이 심각하게 나타나고 있으며 무한한 자원으로 인식되어지던 수자원은 더 이상 무한한 자원이 아닌 관리가 필요한 자원으로 인식되어지면서 적절한 수자원의 관리가 필요하게 되었다.¹⁾ 이러한 물 부족 현상의 대안으로서 수자원의 보존과 친환경적인 측면, 안정적인 용수의 확보 측면에서 하수처리수의 재이용이 대두되고 있으며, 최근 들어서 물 재이용 분야에 막을 이용한 기술적용이 증가되고 있는 추세이다.²⁾ 하수처리수의 재활용 분야나 산업단지에서의 하천수를 공업용수로 이용하는 분야에서 역삼투(Reverse Osmosis, RO)막의 적용은 해수담수화 공정에서 파생된 형태로 국내·외에서 활발한 연구가 진행 중에 있으며 매우 빠르게 발전하고 있는 실정이다. 지금까지 RO를 적용한 하·폐수 및 기타 유사 공정의 가장 큰 문제점 가운데 하나는 농축수의 처분으로 가열 증발과 같이 비교적 부담이 큰 방법으로 처리를 하거나 RO 전단계 공정으로의 반송 등과 같이 제한적이기 때문에 보다 근본적인 농축수 처리

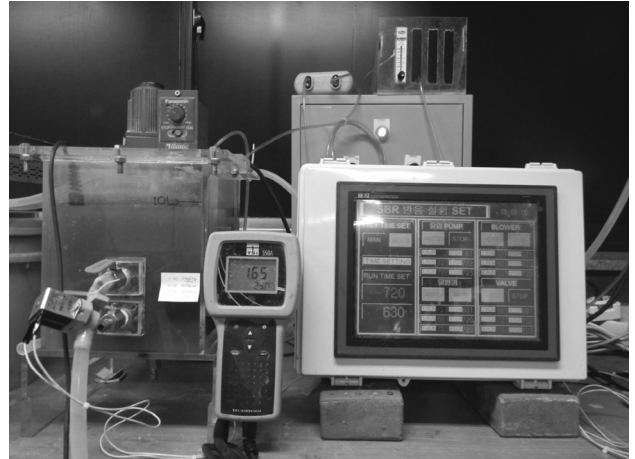
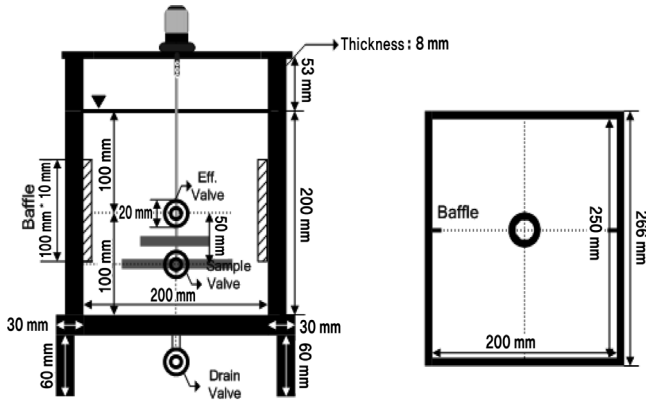
공정이 요구된다.³⁾ RO를 이용한 재이용 시설에서 필연적으로 RO 농축수가 발생하게 되며, 고농도의 질소 제거를 위한 적절한 처리공정의 연구가 필요한 시점이다. 본 연구는 산업단지에서 하천수를 공업용수로 이용 하기 위해 사용되는 RO 공정에서 발생하는 RO 농축수를 처리하는 고도 수처리 공정의 적용에 대한 연구로써, 고농도 질소제거에 적합한 SBR 공정을 선정하여 처리효율 평가 및 부하변동과 온도변화에 따른 공정의 효율을 평가하였다. 또한 실제 RO 농축수 처리공정의 설계에 활용이 가능하도록 동역학적 인자인 Specific Nitrification Rate (SNR)과 Specific Denitrification Rate (SDNR)을 도출하였다.

2. 연구 방법

2.1. 실험 장치

본 연구에 사용된 SBR 반응기를 Fig. 1에 나타내었으며 반응기는 아크릴을 이용하여 제작하였고, PLC 제어프로그램을

[†] Corresponding author E-mail: hohan0507@hanmail.net Tel: 02-407-2266 Fax: 02-407-2267



(a) Plan view

(b) View

Fig. 1. Schematic diagram of SBR process.

통해 공정시간을 제어하였다. 탈질을 위한 외부 탄소원으로 메탄올을 사용하였으며, 포기시간이 끝나고 무산소가 시작될 때 자동으로 주입되도록 구성하였고, 공기량 설계를 통해 250 ml/min으로 산소공급을 일정하게 유지해 주었다.

2.2. 운전 조건

본 연구에서의 SBR 공정의 운전 조건을 유량과 온도변화에 따라 Table 1에 나타낸 바와 같이 Case 1, Case 2, Case 3로 구분하여 실험을 수행하였다. Table 2의 RO 농축수 성상을 바탕으로 포기와 무산소 시간을 설계하여 공정 cycle과 반응시간을 결정하였으며, Case 1의 운전조건을 바탕으로 유량을 증가시킨 Case 2와 수운을 변화시킨 Case 3로 구분하여 부하변화와 온도변화에 대한 공정해석을 수행하였다.

Fig. 2는 SBR 공정의 Time table을 나타낸 것이며, Case 1과 3은 2 cycle/day로서 포기 5시간, 비포기(무산소 부분) 5시간, 잔류 COD성분의 산화를 위한 재포기 30분, 침전 1시

간 방류 및 휴지시간을 30분으로 총 12시간이 1 cycle로 구성하였다. 유량을 증가시킨 Case 2의 경우 포기와 비포기가 각각 3시간으로 구성하였고, 재포기, 침전, 방류 및 휴지는 Case 1과 3의 시간과 동일하다.

Table 2. Characteristic of RO retentate in the lab. scale reactor

Item	Concentration (mg/L)	
	Mean	Min. - Max
pH	7.94	7.46 - 8.51
Alkalinity	487.60	390.00 - 615.91
TBOD ₅	54.73	48.00 - 64.00
SBOD ₅	46.92	38.00 - 58.00
TCOD _{cr}	110.03	89.75 - 132.25
SCOD _{cr}	100.73	82.25 - 122.25
TCOD _{mn}	57.55	48.00 - 66.00
SCOD _{mn}	51.36	40.00 - 61.20
TN	122.27	107.5 - 150.00
TKN	60.18	48.50 - 75.20
NH ₃ -N	55.93	42.00 - 68.60
NO ₃ -N	56.46	43.20 - 70.00
TP	2.92	1.74 - 4.60
PO ₄ ³⁻ -P	2.43	1.24 - 3.70
TSS	10.09	7.00 - 15.00
VSS	8.00	4.2 - 11.40

Table 1. Operating condition of SBR process

Process	Flow (L/day)	HRT	SRT (day)	DO supply (ml/min)	Temp. (°C)	
Case 1	SBR	10	2 cycle/day	30	250	20
Case 2	SBR	15	3 cycle/day	30	250	20
Case 3	SBR	10	2 cycle/day	30	250	8

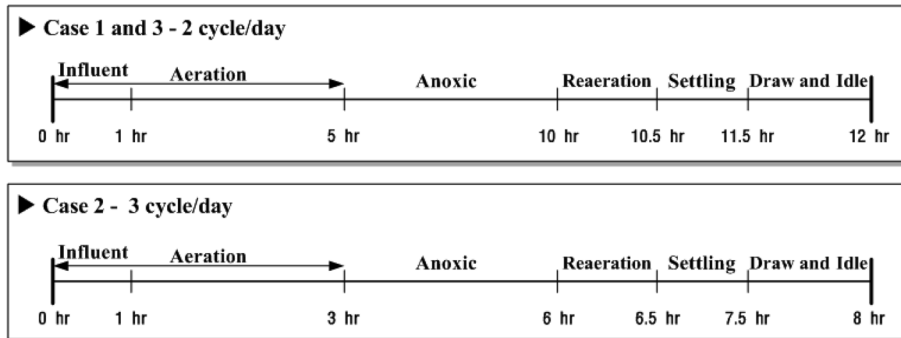


Fig. 2. Time table of SBR process.

Table 3. Analytical methods and instrumentation

Parameter	Method	Instrument/Reference
BOD	5-day BOD test	Standard Methods (2005)
COD _{cr}	Closed method	Standard Methods (2005)
SS	Gravimetric method	Standard Methods (2005)
TKN	Macro Kjeldahl Nitrogen	Standard Methods (2005)
NH ₃ -N	Nesslerization method	Hach/Standard Methods (2005)
NO ₃ ⁻ -N	Ultraviolet spectrophotometric screening method	Hach/Standard Methods (2005)
TP	Sulfuric acid-nitric acid digestion	Hach/Standard Methods (2005)
PO ₄ ³⁻ -P	Vanadomolybdo phosphoric acid colorimetric method	Hach/Standard Methods (2005)

본 실험에 사용된 RO 농축수는 H 산업폐수처리장의 용수 처리설비에서 채수하여 사용 하였으며, 성상은 Table 2에 나타내었다. TN이 높고 BOD가 낮기 때문에 탈질에 반드시 외부탄소원이 필요한 것으로 나타났으며, TN농도가 최소 107.5 mg/L에서 최대 150 mg/L이며 평균농도는 122.27 mg/L로 높게 나타났다.

2.3. 수질분석 방법

수질분석 방법 및 기구는 Table 3에 나타낸 바와 같다. 유기물의 경우, BOD 분석은 5-day BOD 시험법을 이용하였으며, COD 분석은 크롬법으로 측정하였고, 측정방법은 Closed titrimetric method를 이용하였다. SS는 GF/C filter와 Gucci 도가니를 이용하여, 103~105℃와 550℃에서 건조하여 측정하였다. TKN은 Macro Kjeldahl Nitrogen 방법으로 하였으며, 암모니아와 질산성 질소는 Standard Methods 방법에 준하여 Hach사 흡광도 기기를 사용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. SBR 공정의 RO 농축수 제거 특성(Case 1)

SBR 공정의 Case 1 운전결과 방류수의 TN 농도가 평균 6.52 mg/L로 94.9%의 제거율을 보였으며, 슬러지가 RO 농축수에 적응하고 난 이후에는 Table 4에서처럼 안정적인 제거효율을 나타내었다. TBOD₅의 경우 87.59%의 제거율로 방류수 농도가 6.86 mg/L로 안정적으로 나타났지만, COD_{cr}의 경우 다소 높게 방류되는 것을 확인 할 수 있었다. RO 농축수에 난분해성 물질이 어느 정도 존재하는 것으로 판단되며, 이러한 난분해성 유기물은 생물학적으로 처리하는데 한계가 있기 때문에 화학적 처리가 병행되어야 할 것으로 사료된다. TP의 경우 평균 2.99 mg/L가 유입되어 평균 1.66 mg/L로 방류되어 제거율은 낮지만 방류수 수질기준 2 mg/L 이하로 유지되었다.

Fig. 4는 공정 시간에 따른 NH₃-N과 NO₃⁻-N의 거동을 나타낸 것이다. NO₃⁻-N은 포기시간 후 최대 85 mg/L까지 농도가 올라갔으며, 무산소 반응후 최대 7.8 mg/L로 안정적인 탈질반응을 보여주고 있다. NH₃-N의 경우 포기시간에 거의 대부분 질산화가 이루어진 것을 볼 수 있으며, 방류수에서 최

Table 4. Performance of the SBR process (Case 1) - average concentration

Item	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Removal efficiency (%)
pH	8.19	8.2	-
Alkalinity	492.72	444.61	-
TBOD ₅	55.29	6.86	87.59
SBOD ₅	49.79	5.33	89.30
TCOD _{cr}	111.57	77.97	30.11
SCOD _{cr}	101.95	70.14	31.20
TCOD _{mn}	56.57	34.27	39.42
SCOD _{mn}	51.71	31.17	39.73
TN	128.68	6.52	94.93
TKN	63.99	1.28	98.00
NH ₃ -N	57.23	0.85	98.51
NO ₃ ⁻ -N	57.99	3.68	93.66
TP	2.99	1.66	44.52
PO ₄ ³⁻ -P	2.48	1.2	49.39
TSS	10.42	6.92	33.56
VSS	8.02	5.06	36.87

소 0.41 mg/L에서 최대 1.45 mg/L로 방류되는 것을 확인 할 수 있었다. 이와 같은 공정 profile 분석을 통해 SBR 공정이 RO 농축수의 질소제거를 비교적 안정적으로 수행하고 있는 것을 알 수 있었으며, SBR의 RO 농축수 처리공정으로 적용이 가능하다고 판단된다.

3.2. 유량증가에 따른 SBR 공정효율 평가(Case 2)

Case 2 운전은 SBR 공정의 부하변동에 대한 공정효율을 평가하는 것으로, Case 1의 운전조건에서 유입유량만 1.5Q로 증가시켜 운전을 실시하였으며 Table 5와 Fig. 5에 나타낸 것처럼 비교적 안정적인 오염물질 제거효율을 얻을 수 있었다. 운전 cycle을 3 cycle/day로 증가 시 포기와 비포기의 반응시간 감소로 인하여 NH₃-N, NO₃⁻-N 등 TN 제거효율이 다소 감소하였다. 그러나 유량이 증가함에도 불구하고, 방류수 수질기준 20 mg/L 이하로 평균 15.66 mg/L로 유출되는 것으로 나타났다. 따라서 3 cycle/day에 비해 2 cycle/day 운전이 최적의 운전조건으로 판단된다. 하지만 3 cycle/day 운전 시에도 방류수 수질기준은 초과하지 않으므로 3 cycle/day 운전조건을 갑작스런 유입 유량 증가 등 비상시 대처 방안으로

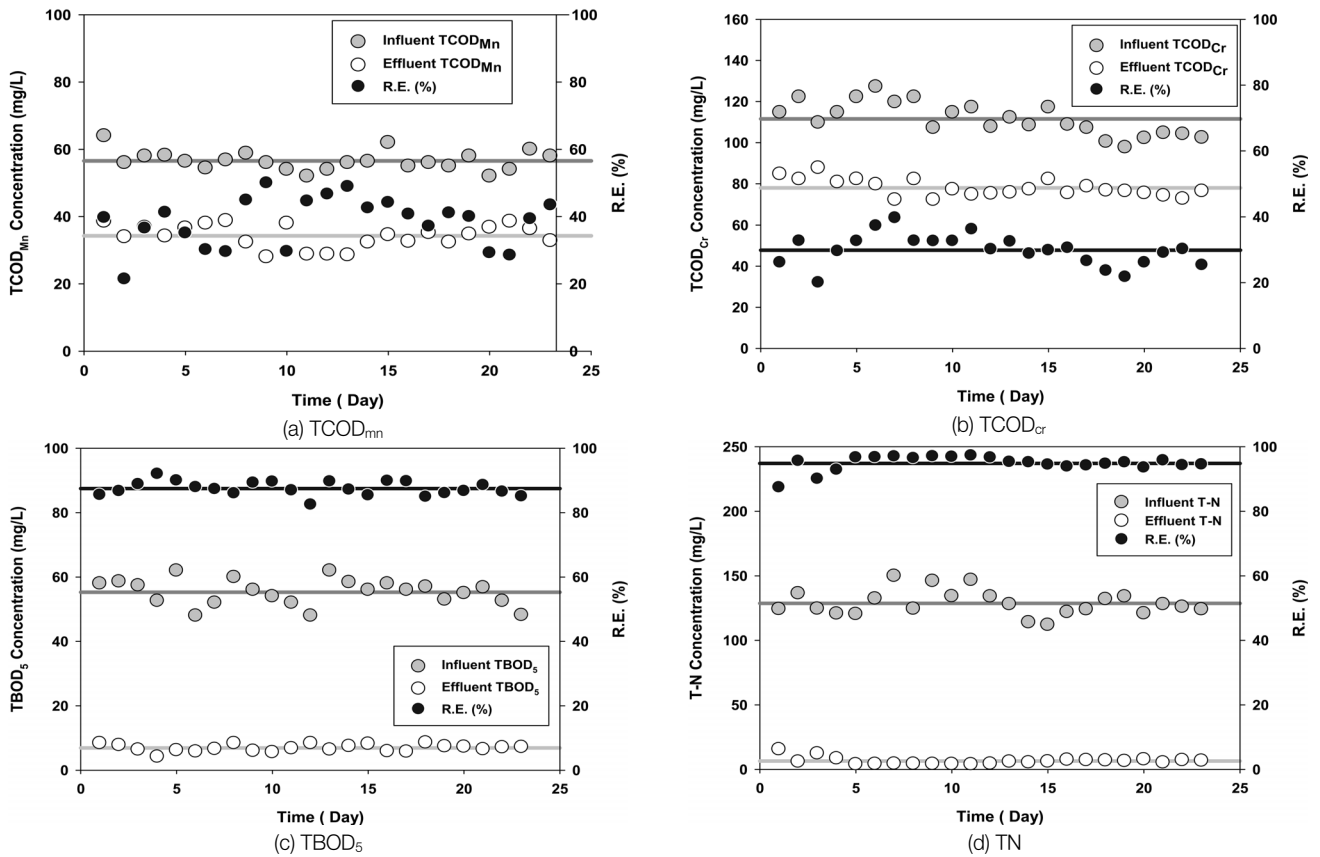


Fig. 3. Performance of organic matters and TN in the case 1.

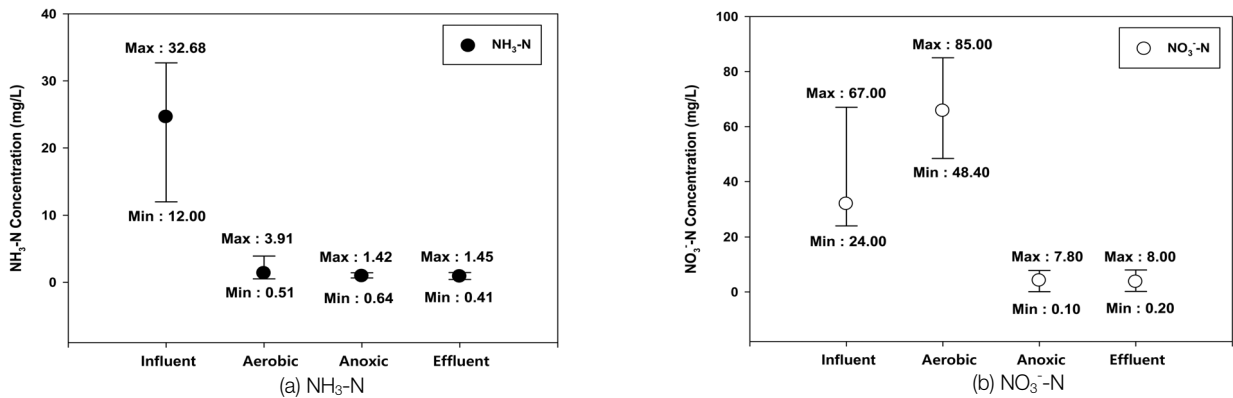


Fig. 4. Profiles of NO_3^- -N and NH_3 -N in the case 1.

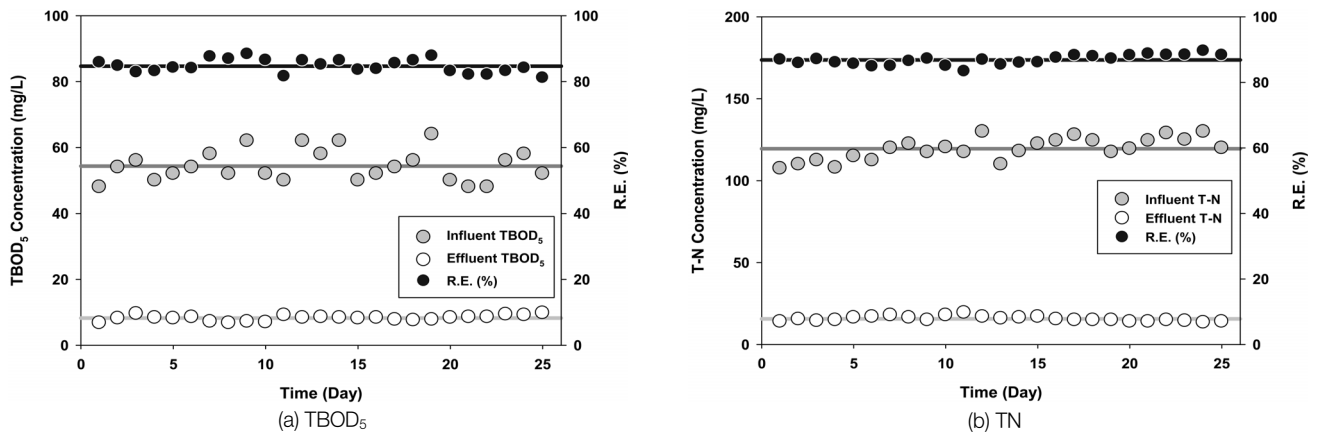


Fig. 5. Removal efficiencies of TBOD₅ and TN in the case 2.

Table 5. Performance of SBR process in the case 2

Item	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Removal efficiency (%)
pH	7.83	8.1	-
Alkalinity	490.48	441.36	-
TBOD ₅	54.32	8.26	84.82
SBOD ₅	45.20	6.58	85.43
TCOD _{cr}	107.89	77.45	77.45
SCOD _{cr}	99.49	68.65	68.65
TCOD _{mn}	58.4	35.45	39.30
SCOD _{mn}	52.08	31.45	39.62
TN	119.46	15.66	86.89
TKN	58.85	6.21	89.45
NH ₃ -N	54.90	5.59	89.81
NO ₃ ⁻ -N	54.21	8.78	83.80
TP	2.93	1.67	42.79
PO ₄ ³⁻ -P	2.45	1.39	43.36
TSS	9.63	7.89	18.06
VSS	7.78	5.91	23.98

활용할 수 있다고 판단된다.

Fig. 6은 Case 2의 NH₃-N과 NO₃⁻-N의 공정 profile을 나타낸 것이다. Case 1에 비해서 포기시간에 NH₃-N의 농도가 비교적 높은 것으로 나타났으며, 포기 3시간 동안 질산화가 충분히 이루어지지 않았고, 무산소 시간의 탈질효율도 Case 1에 비해 낮아진 것을 확인할 수 있었다. 반응시간이 줄었음에도 불구하고 방류수 수질이 TN 20 mg/L 이하로 비교적 안정적으로 나타났기 때문에, 유입유량 변화에 대한 대처방안으로 Case 2 운전조건을 충분히 활용할 필요가 있다고 판단된다.

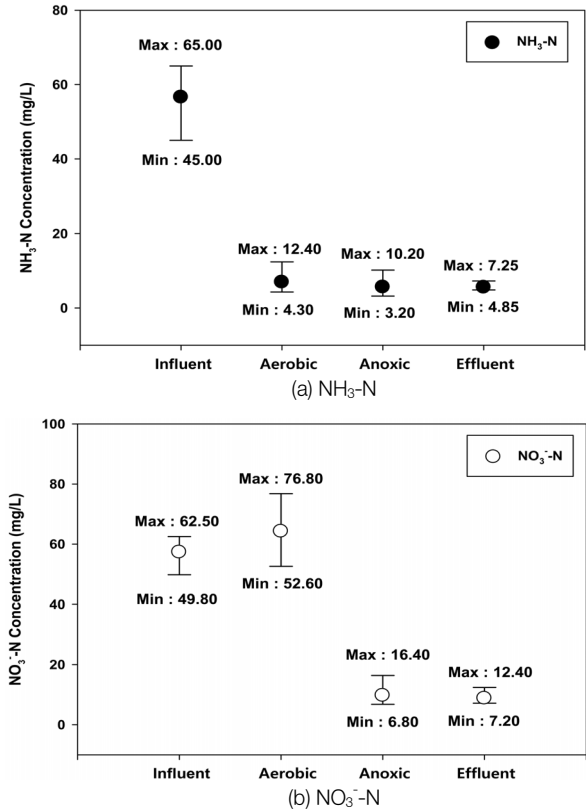


Fig. 6. Profiles of NH₃-N and NO₃⁻-N in the case 2.

3.4. 수온변화에 따른 RO 농축수 처리특성 평가(Case 3)

Case 3은 Case 1의 운전조건에서 수온을 20℃에서 8℃로 감소시켜 운전을 실시한 것이며, 전체적인 오염물질 제거효율이 감소하였으며 특히 질산화 속도가 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 20℃에 적응되어 있던 미생물이 수온이 8℃

Table 6. Comparison of the performance according to temperature in the SBR process

Item	20℃			8℃		
	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Removal efficiency (%)	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Removal efficiency (%)
pH	8.19	8.2	-	7.83	7.84	-
Alkalinity	492.72	444.61	-	480.00	450.32	-
TBOD ₅	55.29	6.86	87.59	54.64	8.06	85.24
SBOD ₅	49.79	5.33	89.30	46.00	6.5	85.88
TCOD _{cr}	111.57	77.97	30.11	110.75	80.15	27.63
SCOD _{cr}	101.95	70.14	31.20	100.85	74.95	25.68
TCOD _{mn}	56.57	34.32	39.32	57.60	35.12	39.22
SCOD _{mn}	51.71	31.17	39.73	50.32	29.57	41.24
TN	128.68	6.52	94.93	119.18	15.18	87.26
TKN	63.99	1.28	98.00	57.99	5.51	90.5
NH ₃ -N	57.23	0.85	98.51	55.76	4.81	91.35
NO ₃ ⁻ -N	57.99	3.68	93.66	57.43	7.61	86.75
TP	2.99	1.66	44.52	2.86	1.65	42.39
PO ₄ ³⁻ -P	2.48	1.2	49.39	2.36	1.08	54.14
TSS	10.42	6.92	33.56	10.26	7.30	28.78
VSS	8.02	5.06	36.87	8.19	6.18	24.58

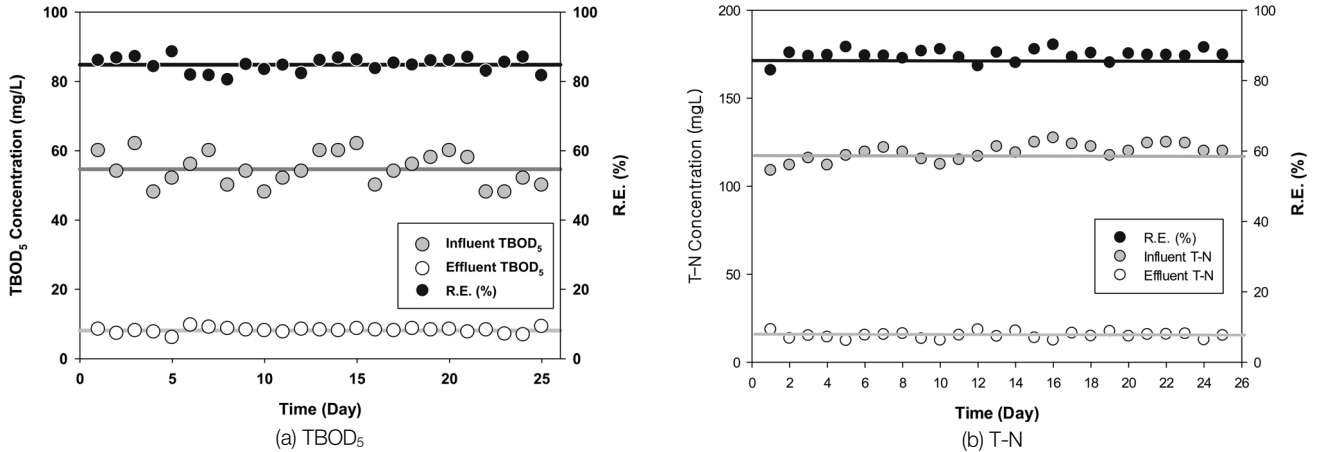


Fig. 7. Removal efficiencies of TBOD₅ and TN in the case 3.

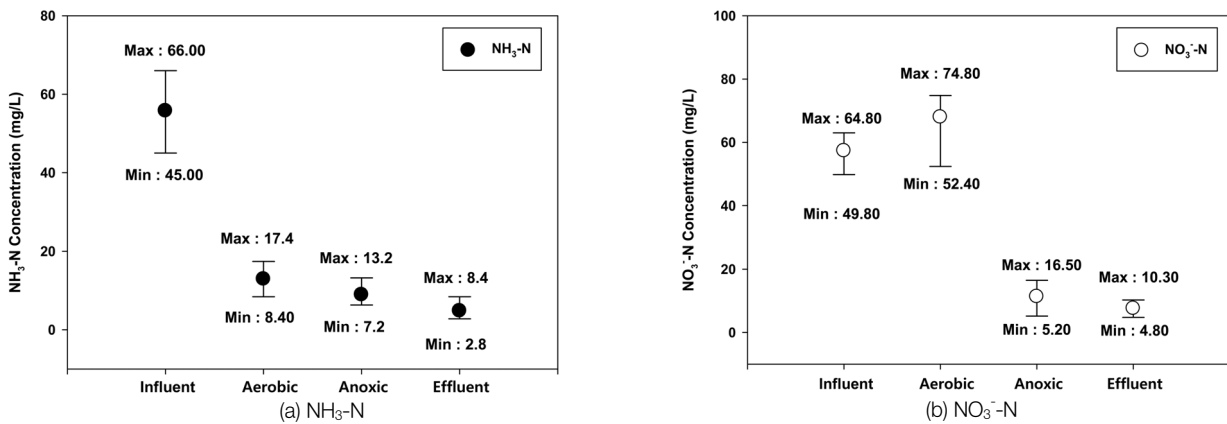


Fig. 8. Profiles of NH₃-N and NO₃⁻-N in the case 3.

로 감소함으로 인해 활성도가 저하되었기 때문이라고 판단되며, 질산화 반응은 저온에서 반응속도가 저하되며 이는 미생물 내의 생화학반응의 촉매 역할을 하는 효소가 피해를 받기 때문인 것으로 판단된다. 수온에 따라 질산화에 영향을 받는 것은 미생물의 활성화 에너지가 수온에 따라 변하기 때문이며, 통상 질산화 반응은 5~32°C의 제한된 범위 내에서 적용되는 되는 것으로 나타났다.⁸⁾

3.5. SNR과 SDNR의 동력학적인자 평가

질산화 속도와 탈질산화속도는 생물학적 질소제거에 있어서 반응조의 필요용량을 결정할 뿐만 아니라 질소제거율을 좌우하는 중요한 인자로 질산화속도는 0차 반응이며 암모니아성질소의 감소속도 또한 아질산성질소(NO₂⁻-N) + 질산성질소(NO₃⁻-N)의 증가속도로 표현되는 경우가 많다.

$$SNR = \frac{Q \times [(NH_3-N)_{inf.} - (NH_3-N)_{eff.}] \times 1000}{V_{aerobic} \times X_{aerobic} \times 24}$$

여기서 SNR = 질산화속도(mg N/g MLVSS · hr, kg N/kg MLVSS · day)
Q = 유량 (m³/day)

(NH₃-N)_{inf.} = 유입 암모니아성질소 농도(mg/L)
(NH₃-N)_{eff.} = 유출 암모니아성질소 농도(mg/L)
V_{aerobic} = 포기조 용량(m³)
X_{aerobic} = 포기조의 MLVSS 농도(mg/L)

질산화 속도는 수온, MLSS, DO, SRT, pH, Alkalinity, 저해물질 등의 영향을 받는 것이 일반적이며, 질소제거의 척도인 SNR과 SDNR은 수온, C/N비, BOD 부하량 등이 주요인자로 보고되고 있다.⁸⁾ 탈질산화 속도는 C/N비에 따라 지수 함수식으로 나타낼 수 있으며 단위는 mg N/g MLVSS · hr이다. SDNR의 영향인자로는 SRT, 온도, pH, 미생물 농도와 초기 NO₃⁻-N 농도 등이다. SRT가 높아질수록 SDNR은 낮아지는 것으로 보고되고 있다.⁸⁾

$$SDNR = \frac{Q \times [(NO_3-N)_{inf.} - (NO_3-N)_{eff.}] \times 1000}{V_{anoxic} \times X_{anoxic} \times 24}$$

여기서 SDNR = 탈질산화속도(mg N/g MLVSS · hr, kg N/kg MLVSS · day)
Q = 유입유량 (m³/d)
(NO₃-N)_{inf.} = 유입 질산성질소 농도(mg/L)

$$(NO_3-N)_{eff.} = \text{유출 질산성질소 농도(mg/L)}$$

$$V_{anoxic} = \text{무산소조 용량(m}^3\text{)}$$

$$X_{anoxic} = \text{무산소조의 MLVSS 농도(mg/L)}$$

Table 7. Comparison of reported kinetics (SNR, SDNR)

Author	SNR (kg N/kg MLVSS·day)	SDNR (kg N/kg MLVSS·day)
This study	0.043-0.066	0.096-0.287
Randall et al. ¹²⁾	0.032-0.048	-
Baeza et al. ⁶⁾	0.03-0.05	-
Chiu et al. ⁸⁾	0.012-0.046	-
Henze ¹⁰⁾	-	0.066-0.144
Kujawa and Klapwijk ¹¹⁾	-	0.024-0.144
K. H. Lee ⁴⁾	0.018-0.082	0.074-0.348

본 연구에서 도출된 동역학적 인자 SNR과 SDNR 값을 Table 7에 나타내었으며, 도출된 SNR은 다른 연구자들의 결과와 비슷한 수준의 값을 보여주고 있다. Baeza et al.의 연구⁶⁾에 따르면 합성폐수를 이용한 A²/O 공정 운전에서 SNR이 0.03-0.05 g NH₄⁺-N/g VSS·day로 나타났다고 보고하고 있으며, Randall et al.은 도시하수처리에 있어서 BNR과 활성슬러지 공정에서 SRT와 온도 등의 조건에 따라 SNR을 도출하였다.¹²⁾ SRT 15일에 온도는 10~15°C에서 BNR과 재래식 공정에서 SNR이 각각 0.043~0.048, 0.032~0.048 g N/g MLVSS·day로 나타났다. Chiu et al.⁸⁾과 Barnes et al.⁷⁾은 합성폐수를 이용하여 각각 SBR과 활성슬러지 공정에서 SNR을 0.012~0.046, 0.024~0.072 kg TKN/kg MLVSS·day로 도출하였다.

SDNR의 경우 0.096~0.287 kg NO₃⁻-N/ kg MLVSS·day로 비교적 높게 나타났으며, 높은 질소농도와 탄소원으로 메탄올을 사용하였기 때문에 SDNR 값이 다소 높게 도출된 것으로 사료된다. 본 연구에서 도출된 SDNR값의 변화폭이 큰 것으로 나타났으며, 고농도의 질소를 함유한 오수처리시설에서 도출된 SDNR 값⁴⁾과 비슷한 경향을 보여주고 있다.

4. 결론

본 연구는 공업용수 고도 수처리 시설에서 발생하는 RO 농축수 처리를 위한 SBR 공정의 적용 평가로서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 유량과 온도의 변화에도 SBR공정의 질소제거 효율은 비교적 안정적인 것으로 나타났으며, RO 농축수 처리를 위한 공정으로서 충분히 활용가능 할 것으로 판단되지만, 난분해성 COD를 처리하기 위한 보조공정이 수반되어야 할 것으로 사료된다.

2) SBR공정의 최적 time cycle은 2 cycle/day이며 유입수의 유량이 증가할 경우 3 cycle/day로 운전조건을 변경하여

도 방류수 수질기준 이하로 TN이 제거되는 것으로 나타났기 때문에 부하변동이 있더라도 안정적인 공정 효율을 구현할 수 있을 것으로 사료된다.

3) 도출된 SNR 0.043~0.066 kg NH₃-N/kg MLVSS·day와 SDNR 0.096~0.287 kg NO₃⁻-N/kg MLVSS·day는 RO 농축수 처리를 위한 포기조 및 무산소조 설계시 활용이 가능할 것으로 판단되며, 다양한 공정의 추가적인 연구를 통해 SBR 공정과의 공정효율 및 동역학적인자의 비교평가가 필요할 것으로 판단된다.

KSEE

참고문헌

1. 최주술, 박순호, 윤제용, “하수 재이용 시설에서 RO 농축수 처리를 위한 적정 오존주입량 평가,” 공동추계학술발표회 논문집, 대한상하수도학회·물환경학회지, 845~846(2009).
2. 현승훈, 김응도, 홍승관, 안원영, 임성균, 김검태, “침지형 MF 중공사막을 이용한 하수 2차 처리수의 재이용 연구,” 상하수도학회지, **19**(1), 47~52(2005).
3. 김진호, 박민수, 이지웅, 장문석, 황병국, 이정학, “하수 재이용을 위한 MBR-역삼투막 조합 공정(MBR-RO)의 적용,” 공동추계학술발표회 논문집, 한국물환경학회·대한상하수도학회지, 234~239(2007).
4. 이광현, “A²/O 공정을 이용한 고속도로 휴게소 오수처리시설의 최적 설계 및 운전특성에 관한 연구,” 박사학위논문, 경기대학교(2010).
5. APHA, AWWA and WEF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th Ed., Washington D. C. USA(2005).
6. Baeza, J. A., Gabriel, D. and Lafunte, J., “Effect of internal recycle on the nitrogen removal efficiency of an anaerobic/anoxic/oxic (A²/O)wastewater treatment plant (WWTP),” *Process Biochemistry*, **39**, pp. 1615-1624(2004).
7. Barnes. D. and P. J. Bliss, “Biological control of nitrogen in wastewater treatment,” *Water Res.*, **17**(12), p. 1947(1983).
8. Chiu, Y. C., Lee, L. L., Chang, N. C. and Chao, A. C., “Control of carbon and ammonium ratio for simultaneous nitrification and denitrification in a sequencing batch bioreactor,” *International Biodeterioration & Biodegradation*, **59**, pp. 1~7(2007).
9. EPA, Manual of Nitrogen Control. EPA/625/R-93/010. Washington, USA: US Environmental Protection Agency(1993).
10. Henze, M., “The influence of raw wastewater biomass on activated sludge oxygen respiration rates and denitrification rates,” *Water Sci. Technol.*, **21**, pp. 603~607(1989).
11. Kujawa, K. and Klapwijk, B., “A method to estimate denitrification potential for predenitrification system using nur batch test,” *Wat. Res.*, **33**(10), pp. 2291~2300(1999).
12. Randall, C. W., Barnard, J. L. and Stensel, H. D., “Design and retrofit fo wastewater treatment plants for biological nutrient removal. Water Quality Management Library,” **5**, Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, PA(1992).