

RO 농축수 처리를 위한 SBR과 MLE 공정의 비교 평가

A comparative study on SBR and MLE Process for RO Retentate Treatment

김일희* · 이상일

Il-Whee Kim* · Sang-Il Lee

동국대학교 토목환경공학과

(2011년 10월25일 접수; 2011년 12월9일 수정; 2011년 12월12일 채택)

Abstract

In this study, the SBR and MLE process was performed for a removal of the RO retentate and the nitrogen removal efficiency was evaluated. The inflow-rate of two processes was set a 10 L/day. The SBR process was operated a two cycle as HRT per one cycle was 12hr and the HRT of the anoxic and aerobic tank was respectively 7.5 hr and 16.5 hr. The methanol was injected for an effective denitrification owing to a low C/N ratio of the RO retentate. The two processes were effectively performed for nitrogen removal, but the average removal efficiency of the SBR process was about 94.93% better performance than the MLE process. Therefore, the SBR process demonstrated a good performance more than the MLE process for nitrogen removal of the RO retentate. The kinetic of SNR and SDNR was observed respectively 0.051 kg NH₃-N/kg MLVSS · day and 0.287 kg NO₃⁻-N/kg MLVSS · day, which will be useful to design for the wastewater treatment system with a RO retentate.

Keywords : SBR, MLE, RO retentate, Nitrogen removal, SNR, SDNR

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(최주술 등, 2009). 이러한 물 부족 현상의 대안으로서 수자원의 보존과 친환경적인 측면, 안정적인 용수의 확보 측면에서 하수처리수의 재이용이 대두되고 있으며, 최근 들어서 재이용을 위한 막을 이용한 기술적용이 증가되고 있는 추세이다(현승훈 등, 2005). 하수처리수의 재활용 분야나 산업단지에서의 하천수를 공

업용수로 이용하는 분야에서 역삼투(Reverse osmosis, RO)막의 적용은 해수담수화 공정에서 파생된 형태로 국내·외에서 활발한 연구가 진행 중에 있으며 매우 빠르게 발전하고 있는 실정이다. 해수담수화는 물이 부족한 전 세계 많은 지역에 신선한 물을 공급하기 위한 일반적인 해결책으로 점점 증가하고 있으며, 해수담수화 기술중에 RO가 가장 광범위한 국제적인 기술이다(Baltasar Peñate et al, 2011).

지금까지 RO를 적용한 하·폐수 및 기타 유사 수자원 재이용 공정의 가장 큰 문제점 가운데 하나는 농축수의 처분으로 가열 증발과 같이 비교적 부담이 큰 방법으로 처리를 하거나 RO 전단계 공정으로의 반송 등

*Corresponding author M.P:010-5331-9085, E-mail: hohan0507@hanmail.net (I.W Kim)

과 같이 제한적이기 때문에 보다 근본적인 농축수 처리 공정이 요구된다(김진호 등, 2007). RO를 이용한 시설에서 필연적으로 RO 농축수가 발생하게 되며, 고농도의 질소 제거를 위한 적절한 처리공정의 연구가 필요한 시점이다. 본 연구는 고도수처리 시스템에서 발생하는 RO 농축수의 처리 특성을 평가하기 위하여 회분식과 연속식 반응의 대표적인 고도처리 공정인 Sequencing Batch Reactor(SBR)과 Modified Ludzack Ettinger(MLE)의 공정운전을 실시하여 비교평가를 수행하였다.

2. 연구 방법

2.1. 실험 장치

본 연구에 사용된 Lab. scale SBR과 MLE 공정을 Fig. 1과 Fig. 2에 각각 나타내었다. SBR 공정은 부하 변동에 대한 처리 성능이 안정적이기 때문에 선정을 하였고, MLE 공정은 연속식 공정 중 질소제거를 위해 특화된 공법으로 RO 농축수의 고농도 질소 제거에 초점을 맞추었기 때문에 선정을 하였다. 두 반응기 모두 아크릴을 사용하여 제작하였고, SBR의 경우 PLC 제어프로그램을 통해 공정시간을 제어하였다. 탈질을 위한 외부 탄소원으로 메탄올을 사용하였고, SBR의 경우 포기시간 종료 후 무산소가 시작될 때 자동으로 주입되도록 하였으며, MLE는 무산소조에 메탄올을 24시간 일정하게 주입하였다. SBR과 MLE 공정 모두 공기량 설계를 통해 250 ml/min으로 산소공급을 일정하게 유지해 주었다.

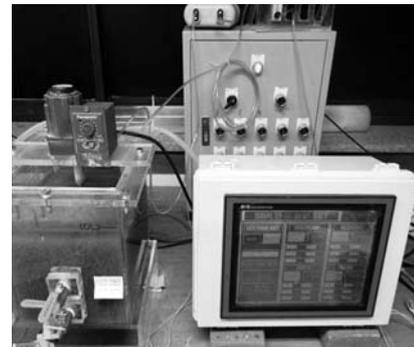
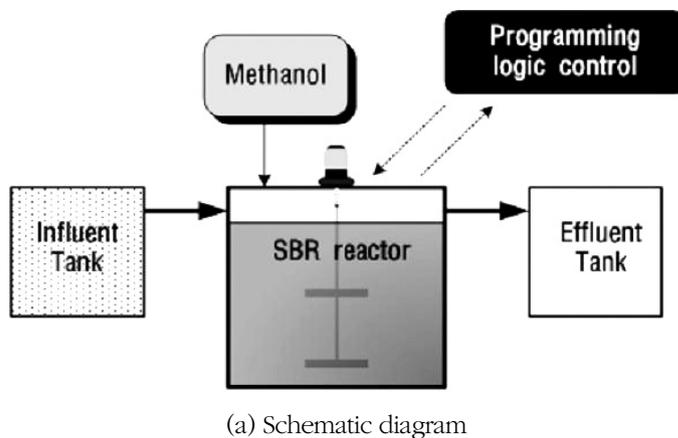


Fig. 1. Lab. scale reactor of SBR process.

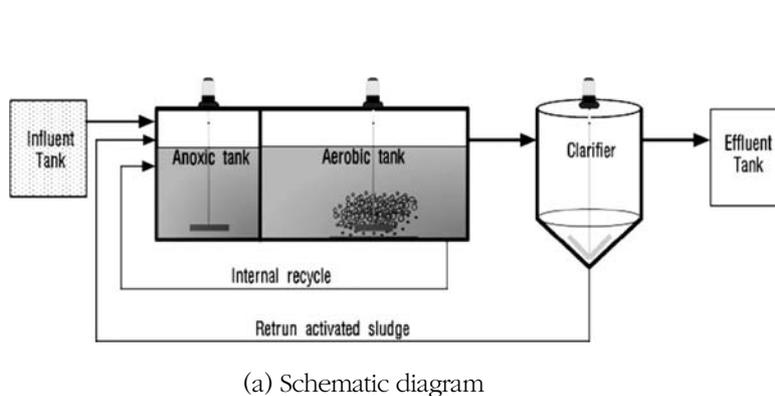


Fig. 2. Lab. scale reactor of MLE process.

Table 1. Operating conditions of lab. scale reactors

Items	Q _{in} (L/day)	Volume (L)	HRT (hr)	Recycle ratio**	SRT (day)	DO (L/day)	Temp. (°C)
SBR	10	10	2cycle/day*	-/-	30	150	20
MLE	10	10	24	1Q/2Q	30	248	20

* 1 Cycle → Q=5L, ** External recycle/Internal recycle

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

Items	Concentration (mg/L)		
	Min.	Max.	Avg.
pH	7.46	8.51	7.94
Alkalinity	390.00	615.91	487.60
TBOD ₅	48.00	64.00	54.73
SBOD ₅	538.00	58.00	46.92
TCOD _{Cr}	89.75	132.25	110.03
SCOD _{Cr}	82.25	122.25	100.73
TCOD _{Mn}	48.00	66.00	57.55
SCOD _{Mn}	40.00	61.20	51.36
TN	107.5	150.00	122.27
TKN	48.50	75.20	60.18
NH ₃ -N	42.00	68.60	55.93
NO ₃ ⁻ -N	43.20	70.00	56.46
TP	1.74	4.60	2.92
PO ₄ ³⁻ -P	1.24	3.70	2.43
TSS	7.00	15.00	10.09
VSS	4.2	11.40	8.00

2.2. 운전 조건

RO 농축수 처리를 위한 SBR과 MLE 공정의 운전 조건을 Table 1에 나타내었다. 하루 처리유량 10 L/일을 바탕으로 생물반응조 용량은 10L이며, SBR은 5 L씩 2 cycle을 처리하고 MLE 공정은 무산소조와 포기조의 HRT가 각각 7.5 hr와 16.5 hr로 설계하였다. SBR 공정은 2 cycle/일 로서 포기 5시간, 비포기(무산소 부분)5시간, 잔류 COD성분의 산화를 위한 재포기 30분, 침전 1시간 방류 및 휴지시간을 30분으로 총 12시간이 1 cycle로 구성하였다. MLE 공정은 내부반송과 외부반송을 각각 1Q_{in}, 2Q_{in}로 고정하였으며, SRT는 두 공정 모두 안정적인 질산화를 위해 30일로 유지하였다. 또한 온도는 20°C, DO는 유기물 분해와 질산화를 위한

산소량을 고려하여 공기량을 250 ml/min로 고정하여 충분히 주입하였다.

본 실험에 사용된 RO 농축수는 H 산업폐수처리장의 용수 재이용 설비에서 채수하여 사용하였으며 성상은 Table 2에 나타내었다. TN이 높고 BOD가 낮기 때문에 탈질에 반드시 외부탄소원이 필요한 것으로 나타났다. TN농도가 최소 107.5 mg/L에서 최대 150 mg/L로 평균 122.27 mg/L로 높은 농도를 보였다.

Table 3은 RO 농축수의 중금속 농도를 나타낸 것이다. 대부분의 중금속 농도가 하수나 오수보다 높은 것으로 나타났으나, 미생물의 성장이나 활동에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 김금용 등(2007)은 Zn과 Cu의 경우 SRT에 따라서 미생물 활성 저해농도를

Table 3. Characteristic of mineral concentrations

Item	Ca	Mg	Si	Na	K	Pb	Ba	Sr	Ni	Zn	Cu	Mn	Fe	F	Br	Cr ⁶⁺	Hg
Conc. (mg/L)	324	69.8	9.45	386.4	68.3	0.0019	0.0087	0.165	0.0074	0.068	0.014	0.055	0.14	2,185	3.34	<0.001	0.0678 (ppb)

Table 4. 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)

SRT 5일과 9일에 각각 IC₅₀(half maximal inhibitory concentration)농도를 각각 15, 17.8 mg/L로 제시하고 있다. 또한 Alberto Cabrero et al. (1998)은 Zn 농도 1 mg/L가 유입되었을 경우 미생물 성장계수 Y 값이 0.469로 Zn를 주입하지 않은 실험군 Y값 0.448과 거의 차이가 없는 것으로 나타났으며, 미생물 성장과는 관계가 없는 것으로 보고하였다. Suntut Sirianuntapiboon et al. (2009)는 SBR 공정에서 Pb를 0.3-5 mg/L 주입한 실험결과 공정의 COD, BOD, TN 제거효율에 큰 변화가 없다는 것을 확인하였다.

2.3. 수질분석 방법

수질분석 방법 및 기구는 Table 4에 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 Nitrogen로 방법으로 하였으며, 암모니아와 질산성 질소는 Standard Methods 방법에 준하여 Hach사 흡광도 기기를 사용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유기물 제거 평가

본 연구는 RO 농축수 처리를 위해서 대표적인 고도 처리공정인 SBR과 MLE 공정을 적용하여 농축수 처리 평가를 비교 평가한 것이며, Table 5는 유기물질에 대한 공정 제거효율을 나타낸 것이다. COD_{Cr}과 COD_{Mn}의 모두 SBR 보다 MLE 공정의 방류수 농도가 다소 높은 것으로 나타났다. 유입수의 TCOD_{Cr}은 111.57 mg/L이고 SBR의 방류수는 77.97 mg/L로 30.11%의 낮은 제거효율을 보였으며, MLE 공정의 방류수는 평균 83.71 mg/L로 SBR 공정보다 높은 농도를 나타내었다. TCOD_{Mn}의 유입수 농도는 56.57 mg/L이며 방류수는 SBR과 MLE 공정에서 각각 34.27, 37.63 mg/L로 COD_{Cr}의 제거율과 비슷한 경향으로 MLE 공정이 다소 높은 것을 확인 할 수 있었다. RO 농축수의 유기물중에 난분해성 유기물이 상당부분 존재하는 것으로 나타났으며, 안정적으로 방류수 수질을 확보하기 위해서는 생물학적 처리공정 후단에 난분해성COD를 제거할 수 있는 시스템이 필요할 것으로 사료된다.

Fig. 3에 SBR과 MLE 공정의 COD 제거효율을 나타

Table 5. Performance of organic matters removal

Item	Influent (mg/L)	SBR process		MLE process	
		Effluent (mg/L)	Removal efficiency (%)	Effluent (mg/L)	Removal efficiency (%)
pH	8.19	8.2	-	7.79	-
TCOD _{Cr}	111.57	77.97	30.11	83.71	24.97
SCOD _{Cr}	101.95	70.14	31.20	76.19	25.26
TCOD _{Mn}	56.57	34.27	39.42	37.63	33.48
SCOD _{Mn}	51.71	31.17	39.73	32.68	36.80
TSS	10.42	6.92	33.5	66.14	41.09
VSS	8.02	5.06	36.8	74.37	45.51

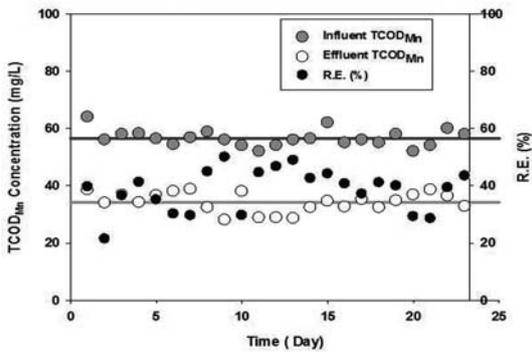
냈으며, 두 공정의 COD 제거효율이 큰 차이는 나지 않았지만 MLE 공정이 약간 낮은 것을 확인 할 수 있었다. RO 농축수의 특성상 유입수 질소 농도가 높지만 질소제거를 위한 탄소원으로 가용할 수 있는 생분해성 유기물이 부족하기 때문에 반드시 적절한 C/N 비를 맞춰주기 위해서 외부탄소원이 필요할 것이다. 본 연구에서는 외부 탄소원으로 메탄올을 사용하여 탈질에 필요한 탄소원으로 아래의 식을 통해 메탄올 양을 결정하여 보충하였다.

$$\text{CH}_3\text{OH (mg/L)} = 2.47 \text{NO}_3^- \text{N} + 1.53 \text{NO}_2^- \text{N} + 0.87 \text{DO} \quad (1)$$

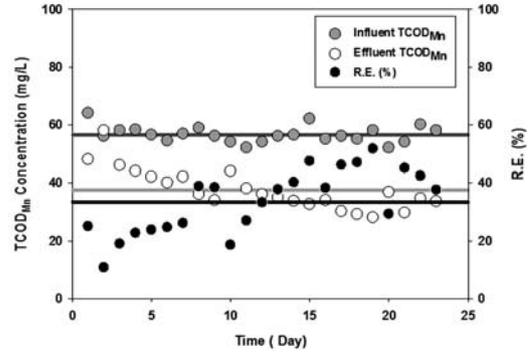
$\text{NO}_2^- \text{N}$ 과 DO 농도는 없다고 가정하고 탈질해야 할 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 농도를 120 mg/L로 가정하여 메탄올 주입량을 결정하였다. SBR과 MLE 반응기 모두 메탄올 296 mg/L가 하루동안 주입되도록 하여 탄소원 부족으로 인해 탈질 반응이 저해되지 않도록 하였다.

3.2 질소 제거 평가

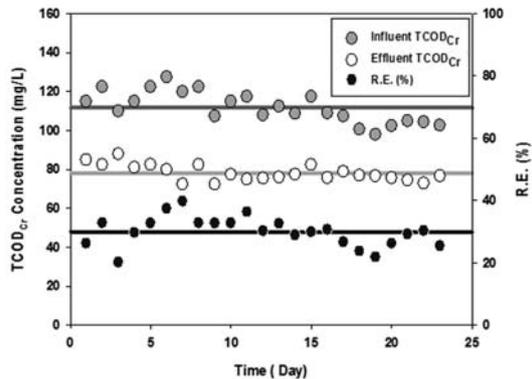
RO 농축수의 질소성분은 $\text{NH}_3\text{-N}$ 과 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 이 각각 50% 정도의 비율로 구성되어 있으며, 본 연구에서 사용된 농축수는 $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3^- \text{N}$ 의 농도가 각각 평균 57.23, 57.99 mg/L로 나타났다. 비교적 고농도의 질소 함유 폐수이며, 128.68 mg/L의 TN 농도를 나타내고 있다. 고농도의 질소제거에 효과적인 SBR 공정과 일반적으로 질소제거 효율이 좋은 연속 흐름식 공정인 MLE 공법을 적용하여 질소 제거 특성에 대하여 평가를 하였다. Table 6은 SBR과 MLE 공정의 질소와 인 제거에 대한 운전결과를 나타낸 것이다. 질소에 비해 인 농도는 TP 2.99 mg/L로 하수의 특성과 비슷한 농도를 나타내었으며, 미생물 합성분에 사용되는 인의 양으로도 방류수 수질기준 2 mg/L 이하를 달성할 수 있었기 때문에 생물학적 처리공정에서 인 제거 기작



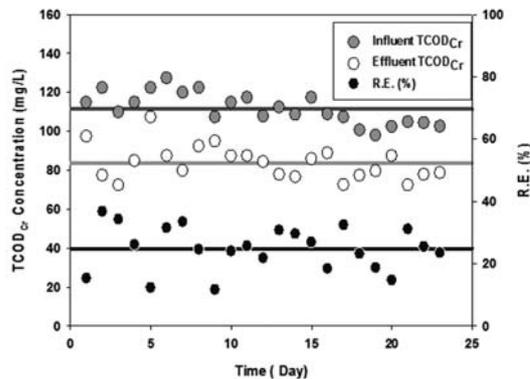
(a) COD_{Mn} (SBR)



(b) COD_{Mn} (MLE)



(c) COD_{Cr} (SBR)



(d) COD_{Cr} (MLE)

Fig. 3. Performance of organic matters removal in SBR and MLE.

Table 6. Performance of nutrient removal

Item	Influent (mg/L)	SBR		MLE	
		Effluent (mg/L)	Removal efficiency (%)	Effluent (mg/L)	Removal efficiency (%)
T-N	128.68	6.52	94.93	28.98	77.48
TKN	63.99	1.28	98.00	1.39	97.83
NH ₃ -N	57.23	0.85	98.51	1.06	98.15
NO ₃ ⁻ -N	57.99	3.68	93.662	6.69	56.33
T-P	2.99	1.66	44.52	1.59	46.93
PO ₄ ³⁻ -P	2.48	1.2	49.39	1.25	49.72

을 위한 공정은 고려하지 않았다. 인 제거에 대해서 SBR과 MLE 공정 모두 비슷한 제거효율을 나타내었으며, SRT 30일의 긴 운전조건에서도 미생물 합성에 사용된 양 만큼 인 제거가 이루어져 방류수 수질 기준을 만족할 수 있었다.

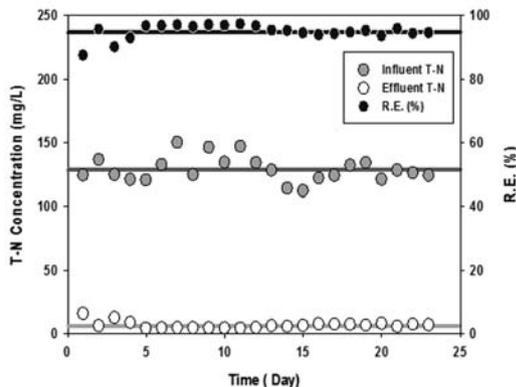
유기물 및 인 제거와는 달리 질소 제거에 대해서는

SBR과 MLE 공정이 서로 다른 제거특성을 나타내었다. 두 공정 모두 NH₃-N의 NO₃⁻-N으로의 질산화는 98% 이상의 효율을 보였으며, 질산화를 위한 충분한 SRT가 유지되었기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 탈질에 대해서는 TN성분으로 SBR의 방류수가 6.52 mg/L로 MLE의 28.98 mg/L보다 같은 운전조건에서 더 뛰어난 제거성능을 보여줌을 확인하였다. Fig. 4에서도 SBR의 TN 제거효율이 더 좋은 것을 확인할 수 있으며, Fig. 4는 각각의 공정의 NH₃-N과 NO₃⁻-N의 profile 분석 결과를 나타낸 것으로서, Fig. 5(c), (d)에 보는 바와 같이 포기과 무산소 시간이 순차적으로 있는 SBR의 무산소 시간에서의 NO₃⁻-N 농도가 MLE 공정의 무산소조에서의 NO₃⁻-N 농도보다 훨씬 낮은 것을 확인할 수 있었다.

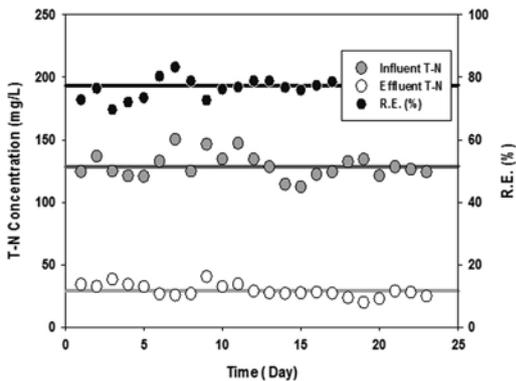
동일한 유량과 반응조 용량으로는 SBR 공정의 질소 제거 성능이 좋은 것으로 나타났지만, MLE 공정의 경우 무산소조의 용량을 늘려 충분한 HRT를 확보한다면 질소제거 효율이 향상될 것으로 판단된다. SBR의 운전이 다소 어렵지만 경제적인 측면에서 SBR공정이 연속 흐름식 공정보다 더 경쟁력이 있을 것으로 사료된다.

3.3 SNR과 SDNR의 동력학적인자 평가

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



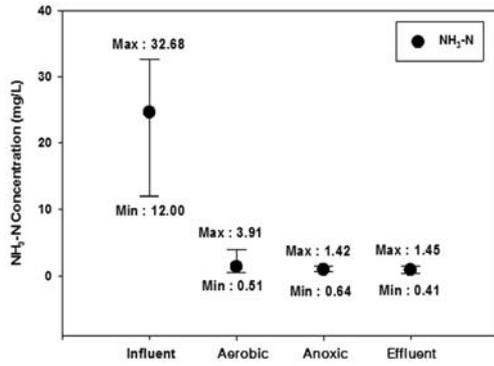
(c) SBR



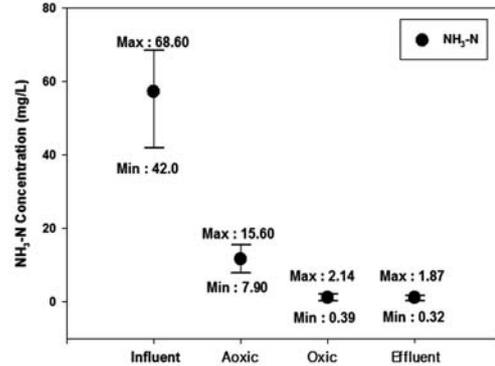
(d) MLE

Fig. 4. Comparison of effluent TN in SBR and MLE process.

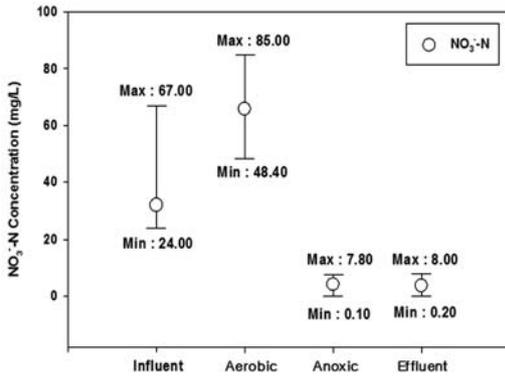
$$SNR = \frac{Q \times [(NH_3-N)_{inf.} - (NH_3-N)_{eff.}] \times 1000}{V_{aerobic} \times X_{aerobic} \times 24} \quad (2)$$



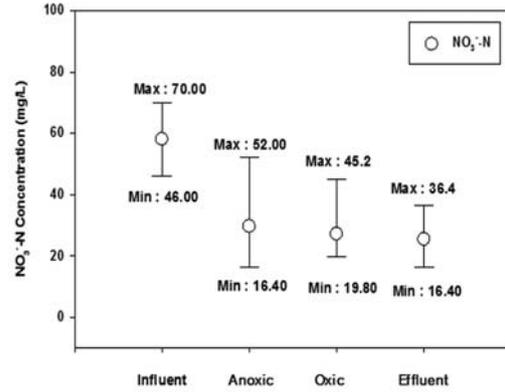
(a) NH₃-N (SBR)



(b) NH₃-N (MLE)



(c) NO₃⁻-N (SBR)



(d) NO₃⁻-N (MLE)

Fig. 5. Profile of NH₃-N, NO₃⁻-N in SBR and MLE process.

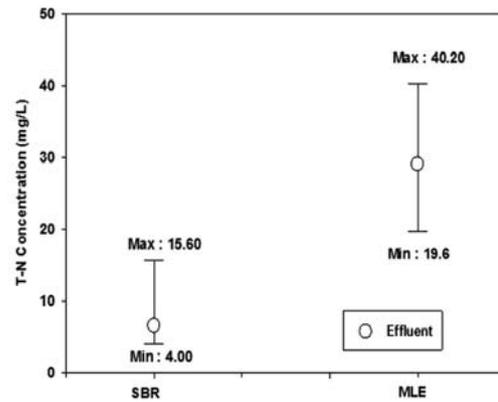
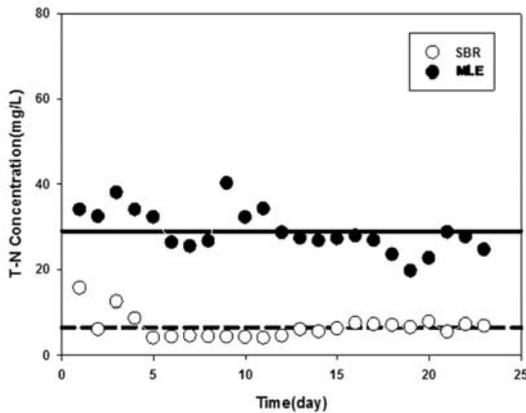


Fig. 6. Comparison of effluent TN in SBR and MLE process.

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(EPA, 1993). 탈질산화 속도는 C/N비에 따라 지수 함수식으로 나타낼 수 있으며 단위는 mg N/g MLVSS · hr 이다. SDNR의 영향인자로는 SRT, 온도, pH, 미생물 농도와 초기

$$SDNR = \frac{Q \times [(NO_3^- - N)_{inf.} - (NO_3^- - N)_{eff.}] \times 1000}{V_{anoxic} \times X_{anoxic} \times 24} \quad (3)$$

NO₃-N 농도 등 이다. SRT가 높아질수록 SDNR은 낮아지는 것으로 보고되고 있다(EPA, 1993).

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)

(NO₃⁻-N)_{eff.} = 유출 질산성질소 농도 (mg/L)

V_{anoxic} = 무산소조 용량 (m³)

X_{anoxic} = 무산소조의 MLVSS 농도 (mg/L)

본 연구를 SBR 공정에서 SNR 0.051 kg NH₃-N/ kg MLVSS · day, SDNR 0.287 kg NO₃⁻-N/ kg MLVSS · day의 동역학적 인자를 도출하였다. MLE 공정에서는

SNR 0.053 kg NH₃-N/ kg MLVSS · day, SDNR 0.043 kg NO₃⁻-N/ kg MLVSS · day를 도출하였다. SNR의 경우 두 공정 모두 비슷한 값을 나타내었으며, SDNR은 SBR 공정이 MLE 보다 훨씬 높은 값으로 도출되었다. Baeza et al. (2004)의 연구에 따르면 합성폐수를 이용한 A²/O 공정 운전에서 SNR이 0.03-0.05 g NH₄⁺-N/g VSS-day로 나타났다고 보고하고 있으며, 유입수의 TKN 농도는 26.3-41.8 mg/L의 범위로 나타났다.

Henze(1986, 1989, 1991)는 질소 제거 공정을 통해 SDNR을 0.036-0.401, 0.06-0.144, 0.024-0.12 kg NO₃⁻-N/kg MLVSS · day 각각 도출하였다. Henze and Harremoës(1990)는 영양염류 제거를 위해 화학적, 생물학적 처리 병행을 통해 SDNR을 0.014-0.072 kg NO₃⁻-N/kg MLVSS · day 도출하였다. 본 연구의 SBR 공정에서 도출된 SDNR 값은 Table 7에서 보는 바와 같이 다른 연구자들이 도출한 값보다 훨씬 큰 것으로 나타났다. RO 농축수의 특성과 기질로 메탄을 사용으로 인해 슬러지의 성상이 일반 하수슬러지와는 다른 제거 및 침전특성을 나타내었는데, 슬러지의 특성에 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 도출된 동역학적인자는 RO 농축수 처리를 위한 공정 설계시 적용공정에 따른 포기조 및 무산소조의 용량을 설계하는데 유용한 자료가 될 것으로 판단된다.

4. 결론

RO 농축수 처리를 위한 SBR과 MLE 공정의 비교 평가 연구에서 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 동일한 유량과 반응조 용량으로는 SBR 공정의 질소제거 성능이 좋은 것으로 나타났지만, MLE 공정의 경우 무산소조의 용량을 늘려 충분한 HRT를 확보한다면 질소제거 효율이 향상될 것으로 판단된다. SBR의 운전이 다소 어렵지만 경

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

Parameter	This study		Lee (2009)	Baeza et al. (2004)	Henze (1986)
	SBR	MLE	A ² /O	A ² /O	MLE, A ² /O
SNR (kg NH ₃ -N/ kg MLVSS · day)	0.051	0.053	0.018-0.082	0.030-0.050	-
SDNR (kg NO ₃ ⁻ -N/ kg MLVSS · day)	0.287	0.043	0.074-0.0348	-	0.036-0.401

제적인 측면에서 SBR공정이 연속 흐름식 공정보다 더 경쟁력이 있을 것으로 사료된다.

- 2) SBR과 MLE 공정에서 도출된 SNR과 SDNR은 RO 농축수 처리를 위한 고도처리공정 설계시 유용한 자료로 활용이 가능할 것이며, 특히 SBR 공정의 SDNR 값이 0.287 kg NO₃-N/ kg MLVSS · day로 높게 나타났는데 이는 슬러지의 성장 변화에 따른 것으로 판단되며, 경제적인 측면에서 SBR 공정의 무산소 HRT를 결정하는데 있어서 중요한 설계인자로 활용이 가능할 것으로 사료된다.
- 3) RO 농축수의 특성 중 중금속 농도가 일반적인 하수보다 높은 것으로 나타났지만, 미생물의 성장과 활성도 큰 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다. RO 농축수의 특성과 기질로 메탄올 사용으로 인해 슬러지의 성장이 일반 하수슬러지와는 다른 제거 및 침전특성을 나타내었는데, 슬러지의 특성에 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 도출된 동역학적인자는 RO 농축수 처리를 위한 공정 설계시 적용공정에 따른 포기조 및 무산소조의 용량을 설계하는데 유용한 자료가 될 것으로 판단된다.

참고문헌

김금용, 조영철, 이상일 (2007). "연속회분식반응조 공정에서 슬러지 체류시간과 중금속 독성의 관계". 대한환경공학회지, 29권 3호, pp.283-288.

김진호, 박민수, 이지웅, 장문석, 황병국, 이정학(2007). 하수 재이용을 위한 MBR-역삼투막 조합 공정(MBR-RO)의 적용. 공동추계학술발표회 논문집, 한국물환경학회 · 대한상하수도학회, pp. 234-239.

이광현(2009). A₂/O 공정을 이용한 고속도로 휴게소 오수처리시설의 최적 설계 및 운전특성에 관한 연구. 박사학위논문, 경기대학교.

최주술, 박순호, 윤제용(2009). 하수 재이용 시설에서 RO 농축수 처리를 위한 적정 오존주입량 평가. 공동추계학술발표회 논문집, 대한상하수도학회 · 문환경학회, pp. 845-846

현승훈, 김응도, 홍승관, 안원영, 임성균, 김검태(2005). 침지형 MF 중공사막을 이용한 하수 2차 처리수의 재이용 연구. 상하수도학회지, 19(1), pp. 47-52.

Alberto Cabrero, Sara Fernandez, Fernando Mirada and Julian Garcia (1998). "Effects of copper and zinc on the activated sludge bacteria growth kinetics". Wat. Res., Vol. 32, No. 5, pp. 1355-1362.

APHA, AWWA, WEF, 2005. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 21sted, APHA, AWWA and WEF, Washington.

Baltasar Penate, Lourdes Garcia-Rodriguez (2011). Current trends and future prospects in the desing of seawater reverse osmosis desalination technology. Desalination, DES-11028

Baeza, J. A., Gabriel, D. and Lafunte, J. (2004). 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.

Henze, M. (1986). Nitrate vs oxygen utilisation rates in wastewater and activated sludge systems. Water Sci. Tech., 18.

Henze, M. (1989). The influence of raw wastewater biomass on activated sludge oxygen respiration rates and denitrification rates. Water Sci. Tech., 21, pp. 603-607.

Henze, M. (1991). Capabilities of biological nitrogen removal processes from wastewater. Water Sci. Tech., 23, pp. 669-679.

Henze, M and Harremo s, P. (1990). Chemical-biological nutrient removal: the HYPRO concept. Proceedingd of the 4th Gothenburg Symposium Chemical water and wastewater treatment, Madrid.

Suntud and Methinee Boonchupleing (2009), " Effect of bio-sludge concentration on the efficincy of sequencing batch reactor (SBR) system to treat wastewater containing Pb²⁺ and Ni²⁺ ". Journal of Hazardous Materials, Vol(166), pp. 356-364.

US EPA, Process design manual of nitrogen control, EPA 625/r-93/010, Cincinnati, Ohio, 1993.