

유입방식 변화에 따른 황 탈질조의 탈질효율 평가

유태경, 최용범, 권재혁*
강원대학교 지구환경시스템공학과

Evaluation of Denitrification Efficiency by Sulfur Denitrification Process according to Injection Type

Tae-Kyoung Yoo, Yong-Bum Choi, Jae-Hyoun Kwon*

Dept. of Earth and Environmental Engineering, Kangwon National University

요약 황 탈질조 유입수질은 회분식 실험을 통한 질산화된 유출수를 사용하였으며, 유입수 주입방향에 따라 상향류와 하향류식으로 운전하여 주입방식에 따른 탈질효율 성능을 평가하였다. 또한, 탈질효율 평가에 따라 선정된 주입방식의 최적 운전 조건을 산출하기 위해 EBCT(Empty bed contact time) 변화와 유입 질소농도를 증가시켜 유입부하 증가에 따른 질소 제거효율을 평가하였다.

유입방식 변화에 따른 황 탈질조의 탈질효율 평가결과, 상향류 방식이 탈리된 미생물과 유출 고형물의 재침전으로 인하여 하향류 방식보다 유출 유기물 농도가 낮은 것으로 조사되었다. 또한, 상향류 방식에서 T-N 제거 효율은 73.3~90.2%로 하향류 방식보다 약 10.0% 이상 높은 것으로 조사되어 질소제거 측면에서도 상향류 방식이 유리한 것으로 판단된다. EBCT 변화에 따른 질소제거 효율 검토결과, 1hr에서는 47.4%, 3hr에서는 88.1%, 5hr에서는 90.5%로 조사되어, 황 탈질 공정의 최적 EBCT는 3hr로 판단된다. 법 규정과 부하율에 따른 총질소 제거효율을 검토한 결과, T-N 법적 방류수질 20mg/L를 안정적으로 유지하기 위해서는 황 탈질조의 유입 T-N 부하율은 0.443kgT-N/m³·day 이하로 유지하여야 한다.

Abstract This study examined the influent of a sulfur denitrification reactor using nitrified effluent from a batch type reactor. The denitrification efficiency was compared according to the injection type. The nitrogen removal effects were compared with the changes in the EBCT and nitrogen concentration of the influent to determine the optimal operation conditions with the selected injection type.

A denitrification efficiency evaluation of a reactor according to the change in injection type and up-flow was performed using a lower organic concentration of the effluent than the down-flow because of the re-precipitation of desorbed microbes and spilled solids. In the up-flow type, organics were controlled by the low concentration than the down-flow type because of solid re-precipitation. The T-N removal efficiency of the up-flow type was 73.3~90.2%, which was more than 10% higher than down-flow type. This means that the up-flow type has a great advantage in removing T-N and organics. The T-N removal efficiency by EBCT at 1hr was 47.3%, and was 88.1% and 90.5% by EBCT 3hr and 5hr, respectively. Therefore, the optimal operation conditions to remove nitrogen was considered to be EBCT for 3hr. After careful consideration of rule of law and T-N removal effects, the T-N load factor in the reactor should remain below 0.443kgT-N/m³·day to maintain the legal total nitrogen concentration for discharge, which is 20mg/L.

Keywords : autotrophic denitrification, down-flow, nitrogen removal, sulfur denitrification, up-flow

2015년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음.(관리번호-201510017)

This study is supported by 2015 Research Grant from Kangwon National University(No. 201510017)

*Corresponding Author : Jae-Hyoun Kwon(Kangwon Univ.)

Tel: +82-33-570-6577 email: environ4@kangwon.ac.kr

Received August 16, 2016

Revised (1st September 8, 2016, 2nd September 26, 2016)

Accepted December 8, 2016

Published December 31, 2016

1. 서론

최근 생활용수 사용량 급증으로 인한 수자원 부족 및 부영양화로, 수질 오염에 대한 관심이 증가하고 있다. 또한 2008년부터 전 수역에서 강화된 방류수 수질 기준을 만족하기 위하여 하수처리시설에서 총 질소(T-N) 제거를 위한 많은 연구가 진행되고 있다[1]. 우리나라는 하수 특성상 C/N비가 낮기 때문에 질소제거 효율을 증가시키기 위해 내부탄소원이나 메탄올 등의 외부 탄소원 주입이 필요하며, 고농도 질소를 포함한 폐수에서는 높은 반응비를 유지해야하는 단점이 있다[2-4]. 따라서, 현재 생물학적 질소제거의 단점을 보완하기 위해서 후속공정으로 독립영향 탈질(Autotrophic denitrification)에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다[5-7].

독립영향 탈질공정에서 가장 대표적인 공정으로 황 탈질 공정(Sulfur denitrification)을 들 수 있는데, 황 탈질 공정은 전자수용체인 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)를 이용하여 황 화합물(S^2 , S^0 , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, SO_3^{2-} , $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$)을 황산염이온(SO_4^{2-})으로 산화시킴으로써 질소를 제거할 수 있는 공정이다[8]. 그러나 탈질시 수소이온(H^+)이 생성되어 알칼리도 소모에 따른 pH 저하로 질소 제거효율에 영향을 미치기 때문에 황 탈질 공정에는 적정 알칼리도를 유지하는 것이 매우 중요하다[4,8]. 일반적으로 황 탈질 공정에서 유입수의 주입은 상향류 방식과 하향류 방식으로 구분할 수 있는데, 최근까지 실제 처리시설에서는 하향류 방식이 많이 적용되었으며, 점차 상향류 방식으로 전환되고 있다. 이러한 유체 흐름 방식은 처리효율에 영향을 미칠 수 있으므로 유체흐름에 따른 황 탈질 공정의 탈질효율에 대한 연구가 필요하다.

본 연구는 유입방식 변화에 따른 황 탈질 공정의 질소 제거 효율을 검토함으로써, 황 탈질 공정의 최적 운전조건을 제시하고자 수행되었다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치 및 운전

황 탈질 공정의 성능을 검토하고자, Fig. 1에 제시한 바와 같이, 유입수 주입방식을 상향류와 하향류로 달리 하여 운전 하였으며, Fig. 2은 실험실 설치사진을 제시하였다. 상향류 하부의 유입 부분은 콘 모양으로 격인 관으

로 수직적으로 유입시킴으로써 편류 현상을 방지하였고, 하향류는 유출관의 높이를 조절하여 반응기 내부로 공기 유입 방식 및 수위를 조절하였다. 내부에 충전된 황과 석회석은 3:1(v/v)로 총 2L를 충전하였으며, 황 여재는 2.8~5.8mm, 석회석은 2~5mm의 크기를 사용하였다[9]. 본 연구에서는 황 탈질조의 식종을 하지 않고 자연적으로 황 탈질 미생물의 증식을 약 4주에 걸쳐 유도하였다. 본 실험은 황 탈질 미생물이 황 여재에 부착한 것을 육안으로 확인 후 실험을 수행 하였다. 따라서 초기 황 탈질 여재의 충전으로 인한 여과 및 부착에 대한 영향을 최소화 하였다. 또한 황 탈질 미생물 및 부유물질의 과다 부착으로 인해 유출수의 부유물질 농도가 급격히 높아질 경우 역세공정(back washing)을 수행하였다. 역세 공정은 Blower를 이용해 공기를 1분간 주입하여 여재 공극 사이의 질소가스 제거와 미생물 탈리를 유도한 후, 주입 공기를 50% 감소시켜 3.5L/min의 역세수와 함께 주입하여 충전된 여재의 공극 막힘 현상을 해결하였다. 역세 공정 후 2~3일간의 안정화 과정을 거친 후 실험을 수행 하였다.

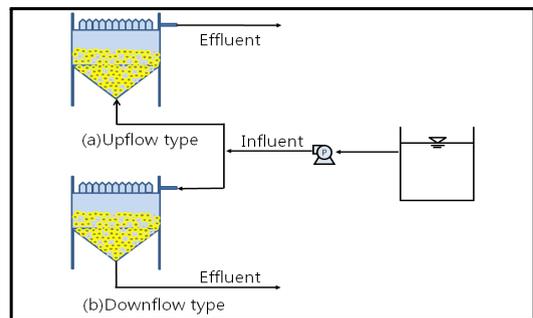


Fig. 1. Schematic diagram of sulfur denitrification reactor according to injection type.

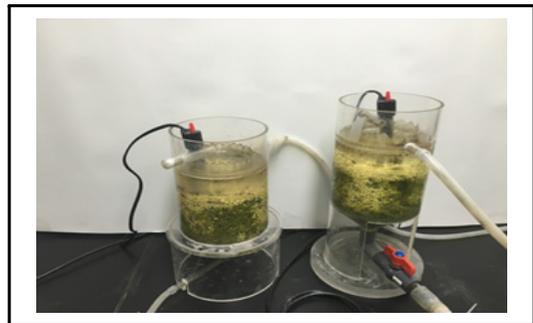


Fig. 2. Photo of lab-scale for sulfur denitrification reactor.

Table 1. Operation conditions of sulfur denitrification reactor.

Item		Sulfur	Lime stone
Volume ratio		3	1
Mass ratio	up-flow	2.74	1
	down-flow	2.82	1
Effective size(mm)		2.8~5.8	2~5
Total Charge(L)		2	

2.2 실험 재료

황 탈질 공정은 생물학적 공정에서 유기물 제거 후 유출수의 질산성 질소 제거를 위한 후속 공정이다. 본 실험의 유입수는 S시 하수종말처리시설의 유입 하수를 회분식 실험을 통하여 유기물 제거 후 질산화 공정을 거친 유출수를 사용하였다. 24hr 동안의 회분식 실험 결과, 최종 BOD 농도는 4.7mg/L로 93.9%의 제거율 보였으며, NH₃-N은 0.172mg/L, NO₃-N의 최종 농도는 17.9mg/L로 조사되었다.

Table 2. Organic matter and nitrogen concentrations of influent and effluent.

Item	Influent(mg/L)	Effluent(mg/L)
BOD	78.0	4.7
NH ₃ -N	16.0	0.172
NO ₂ -N	0.021	0.000
NO ₃ -N	0.29	17.9

3. 결과 및 고찰

3.1 운전 방식에 따른 공정 성능 비교

황 탈질 공정의 운전 방식을 상·하향류로 설정하여 유출수의 농도 변화를 조사하였으며, 황 탈질 공정의 역세는 하수도법의 공공하수처리시설 방류수 수질기준[10]

항목 중 SS 농도가 10mg/L를 초과하는 경우 수행하였다. 반응조 운전 기간은 총 81일간 연속 유입으로 운전하여 황 탈질공정의 성능을 파악하였다.

Table 3에는 운전기간동안의 유기물과 질소의 유입·유출수 농도 변화와 역세주기를 제시하였다. 운전기간동안 총 3회의 역세를 수행하였는데, 1, 2차 역세 기간은 각각 30, 32일 이었으며, 3차 역세주기는 19일로 감소되는 것으로 조사되었다. 이러한 원인은 운전기간이 길어 질수록 반응조내 충전 여재의 소모와 미생물이 증가하여 공극의 폐색현상이 발생하기 때문이다.

운전기간 동안 유입 SS는 0.4~10.2mg/L, 상향류 유출 SS는 0.4~7.5mg/L, 하향류 유출은 1.2~9.9mg/L로 조사되었다. 유입 BOD는 0.4~2.6mg/L 였으며 상향류 유출은 0.8~7.3mg/L, 하향류 유출은 1.4~10.2mg/L 였다. COD_{Mn}의 유입농도는 6.9~15.7mg/L, 상향류 유출은 1.5~13.0mg/L, 하향류 유출은 4.8~18.2mg/L로 조사되었다.

유입수 주입방식에 따른 유기물 제거효율 분석결과, 상·하향류 주입방식 모두 유출 농도가 증가한 것으로 조사되었다. 이러한 원인을 R Yamamoto-Ikemoto(2000) 등은 황을 이용하는 독립영양탈질균의 활성도는 2.9~5.0mgN/g Biomass·hr이 반면, 종속영양탈질균의 활성도는 1.4~5.4 mgN/gBiomass·hr로, 황 탈질균의 빠른 성장속도에 의해 황 표면으로부터 탈리되는 미생물에 의해 유출수의 유기물 농도가 높아진다고 보고하고 있다 [11]. 또한 반응조 내부의 충전 여재의 용출로 인하여 유출 유기물 증가한 것으로 판단된다. 그러나 이러한 유기물의 증가는 공공하수처리시설의 방류수수질기준 이하이며, 황 탈질 공정의 특성상 주기적인 역세공정을 통하여 유출농도의 증가를 예방할 수 있다.

주입방식에 따른 유기물 제거효율을 검토한 결과, 상향류 방식의 유출수가 하향류 방식보다 유출 유기물 농도가 낮은 것으로 조사되었다. 이러한 이유는 유체특성

Table 3. Operation results of sulfur denitrification reactor by injection type.

Item	Inf. Conc.	Eff. Conc.(mg/L)					
		1 Cycle(32day)		2 Cycle(30day)		3 Cycle(19day)	
		Up-flow	Down-flow	Up-flow	Down-flow	Up-flow	Down-flow
SS	0.4~10.2	0.5~4.0	2.3~7.5	0.4~2.7	1.2~6.7	0.4~3.4	1.8~9.9
BOD	0.4~2.6	3.3~7.3	5.6~10.2	0.8~5.9	1.4~9.0	0.5~3.5	1.4~8.6
COD _{Mn}	6.9~15.7	8.4~13.1	11.6~16.2	1.5~11.8	4.8~18.2	9.2~13.0	10.0~14.5
T-N	10.0~27.6	2.57~13.23	3.14~19.39	0.89~3.48	1.88~5.68	0.61~3.47	3.27~7.02

에 기인한 것으로 판단할 수 있는데, 상향류 방식은 탈리된 미생물이 반응조내에서 재침전이 발생하기 때문에 하향류 방식보다 유출수질에 미치는 영향이 적기 때문에 판단된다. 또한 일부 용출된 충진 여재 역시 상향류의 경우 재침전이 발생하나, 하향류의 경우 유출수에 포함되기 때문에 유출 수질농도에 영향을 미치지 않으므로 판단된다. Fig. 3은 운전기간 동안 주입방식에 따른 유출 SS 농도변화를 제시하였다.

유입수 주입방식에 따른 질소제거공정에서, 운전 초기 탈질이 원활하지 않아 유출수 T-N 농도가 높게 나타났으나, 운전기간이 길어질수록 질소제거가 이루어지는 것으로 조사되었다.

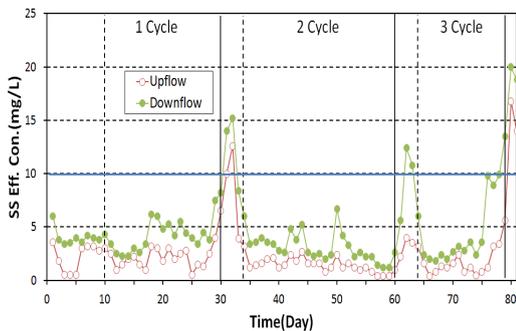


Fig. 3. Variations of effluent SS concentration according to injection type.

유입방식에 따른 T-N 제거율 검토한 결과, 유입 T-N은 10.0~27.6mg/L였으며 상향류 유출은 0.61~13.27mg/L로, 하향류 방식은 1.88~19.39 mg/L로, 상향류 주입방식이 성능이 우수한 것으로 조사되었다.

유입방식에 따른 성능평가 결과, 상향류 방식의 주기당 평균 T-N 제거율은 73.3~90.2%, 하향류 방식의 평균 제거율은 61.1~75.3%로, 상향류 운전방식이 10.0% 이상 높은 제거율을 나타냈다. 또한 탈질과 관계된 NO₃-N의 제거효율은 상향류는 주기당 평균 69.3~91.6%, 하향류는 63.5~72.9%로, 상향류 방식이 탈질효율이 우수하였다. 이러한 원인은 유출수 유기물 농도변화에서 언급한 바와 같이 황 여재에서 탈리된 미생물이 상향류 방식은 최종 유출 전 재침전 되기 때문에 유출수 내 탈리된 미생물량이 적기 때문이다. 또한 이렇게 축적된 반응조내 고형물은 역세과정에서 모두 제거되기 때문에 전체 처리효율에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다.

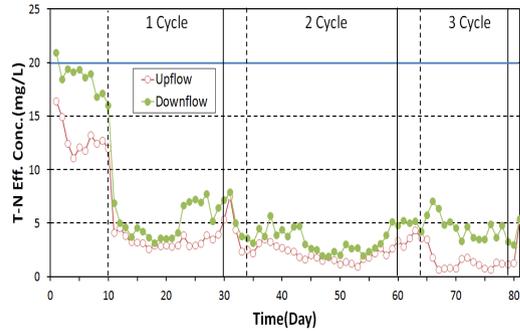


Fig. 4. Variations of effluent T-N concentration according to injection type.

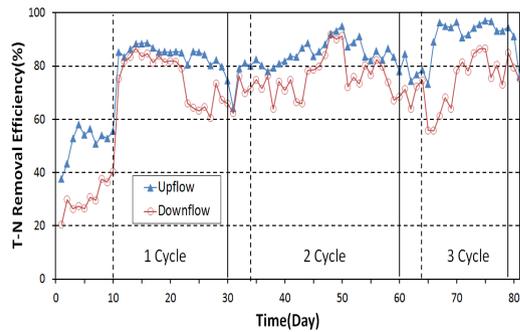


Fig. 5. T-N removal efficiency according to injection type.

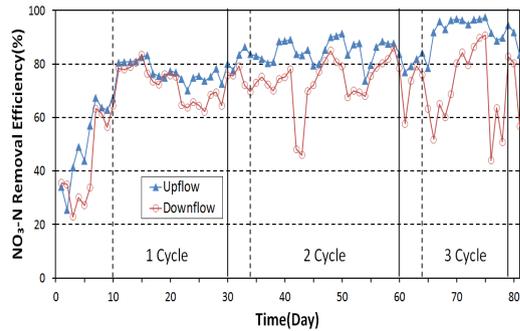


Fig. 6. NO₃-N removal efficiency according to injection type.

3.2 상향류 운전 방식에서 최적 EBCT

본 절에서는 3.1의 결과를 근거로 하여 상향류 운전 방식에서 최적 운전 조건을 산출하기 위하여 공탑 체류 시간(Empty Bed Contact Time : EBCT) 변화에 따른 황 탈질 공정의 실험을 수행하였다. 운전기간 동안 유입 T-N 농도는 10.17~25.68mg/L였으며, EBCT에 따른 유출수 농도는 1hr은 2.27~15.25mg/L, 3hr에서 0.61~

Table 4. Variations of nitrogen concentrations according to EBCT.

Items	Inf. conc.	Eff. conc.			Average rem.(%)		
		EBCT(hr)			EBCT(hr)		
		1hr	3hr	5hr	1hr	3hr	5hr
T-N	10.17~25.68	2.27~15.25	0.61~4.34	0.11~5.68	47.4	88.1	90.5
NO ₃ -N	4.061~18.778	1.125~7.302	0.387~2.086	0.016~1.214	57.5	88.7	95.4

4.34mg/L, 5hr이 0.11~5.68mg/L로 조사되었다. 또한 EBCT에 따른 평균 제거율은 각각 47.4%, 88.1%, 90.5%로 조사되어 EBCT가 증가에 따라 제거효율 또한 증가하였다.

유입수의 NO₃-N 농도는 4.061~18.778mg/L 였으며 EBCT에 따른 유출농도는 1hr는 1.125~7.302mg/L, 2hr는 0.387~2.086mg/L, 5hr에서는 0.016~1.214mg/L로 조사되었으며, EBCT에 따른 평균 제거효율은 57.5%, 88.7%, 95.4%로 조사되어 T-N의 경우와 마찬가지로 EBCT가 증가할 수록 제거효율이 높아졌다.

다양한 EBCT에 따른 상향류 운전 방식의 유출수 농도를 분석한 결과, EBCT 1hr에서는 짧은 체류시간으로 인해 황 탈질이 이루어지기 위한 황 여재와 유입수의 접촉시간 부족으로 제거효율이 낮게 나타났다. EBCT 3hr 이상에서는 탈질효율이 증가하는 것으로 조사되었는데, 3~5hr 에서의 탈질효율의 증가율이 미미한 것으로 조사되어, 상향류 운전방식 황 탈질조의 최적 EBCT는 3hr로 판단된다.

Shin(2002)은 EBCT 1.7~9.0hr에서는 질소 제거효율이 95% 이상으로, EBCT 변화에 따른 질소제거효율이 큰 차이가 없다고 보고하고 있다. 그러나 짧은 EBCT(0.9~1.4hr) 조건에서는 제거율이 63~83%로 조사되었으며, 그 원인으로 유입수와 황 탈질 미생물의 접촉시간 부족하기 때문이라고 보고하고 있어[8], 이러한 경향은 본 연구결과와 유사한 것으로 조사되었다.

Yoo(2012)는 100mg/L의 NO₃-N을 처리에 있어 수리학적 체류시간(HRT)이 1, 1.5, 2hr에서 질소 제거효율을 각각 39.3%, 43.8%, 61.7%라고 보고하고 있는데, 황 탈질 공정의 경우 공극사이로 유입수가 지나며 흐름 방향이 일정하게 유지되므로 체류 시간이 늘어나더라도 황 탈질 여재와 유입수사이의 접촉 면적이 동일하기 때문에 체류시간이 증가하더라도 처리효율에는 큰 차이가 없다고 보고하고 있다[2].

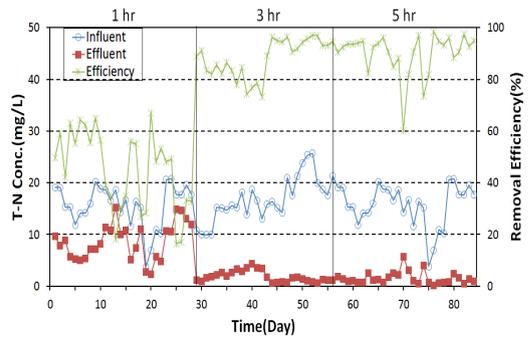


Fig. 7. Variations of T-N concentration and removal efficiency according to EBCT.

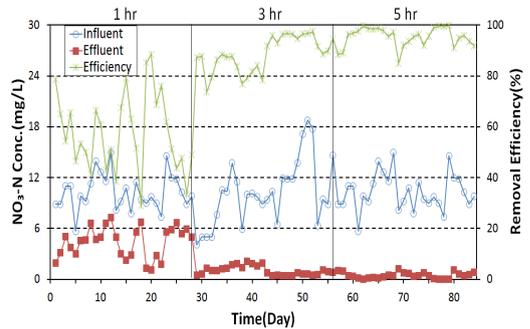


Fig. 8. Variations of NO₃-N concentration and removal efficiency according to EBCT.

3.3 질소 부하에 따른 탈질효율

본 절에서는 유입질소 농도 변화에 따른 황 탈질 공정의 성능을 평가하고자 수행되었다.

실험기간내 황 탈질조 유입수의 T-N은 10.17~25.68mg/L, NO₃-N는 4.061~18.778mg/L로 조사되었는데, 본 연구에서는 유입수에 KNO₃를 첨가하여 유입수 T-N 농도를 9.98~98.37mg/L로 증가시켰으며, 이에 따라 NO₃-N 농도는 4.061~74.820mg/L로 증가하였다. Fig. 9는 운전기간동안 질소부하 변화에 대하여 제시하였다.

Table 5. Variation of nitrogen concentration and the removal efficiency according to the nitrogen loading rate.

Item	T-N VLR(kgT-N/m ³ ·day)				NO ₃ -N VLR(kgNO ₃ -N/m ³ ·day)			
	0.064 ~0.164	0.193 ~0.312	0.373 ~0.443	0.575 ~0.630	0.026 ~0.120	0.158 ~0.242	0.270 ~0.396	0.407 ~0.479
Inf. conc.(mg/L)	9.98 ~25.68	30.22 ~48.79	58.21 ~69.20	89.85 ~98.37	4.061 ~18.778	24.726 ~37.800	42.167 ~61.798	63.571 ~74.820
Eff. conc.(mg/L)	0.61 ~3.20	5.21 ~9.44	9.97 ~15.43	17.47 ~37.21	0.387 ~1.508	1.910 ~3.676	5.519 ~10.974	11.756 ~26.386
Rem.(%)	88.6	81.8	79.2	71.7	89.2	90.0	82.3	73.2

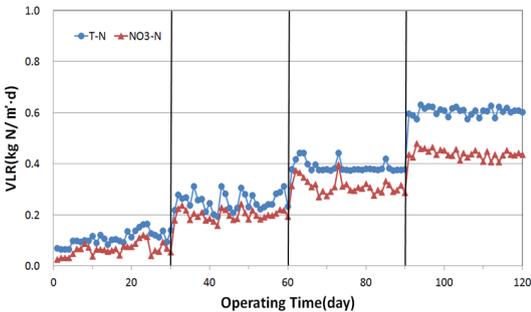


Fig. 9. Variations of VLR(N) according to operating Time.

Table 5는 유입질소 증가에 따른 질소부하와 유입·유출수 농도변화를 제시하였다. 유입 T-N 부하율이 0.064 ~ 0.312kgT-N/m³·day에서의 유출수 T-N 농도는 0.61 ~ 9.44mg/L로 조사되었으나, 0.373 ~ 0.630kgT-N/m³·day에서는 유출수 농도가 9.97 ~ 37.21mg/L로 증가하는 것으로 조사되었다. NO₃-N 농도는 0.026 ~ 0.396gNO₃-N/m³·day에서 유출 NO₃-N은 0.387 ~ 10.974mg/L 였으나, 0.407 ~ 0.479kgNO₃-N/m³·day에서는 유출농도는 11.756 ~ 26.386mg/L로 증가하는 것으로 조사되어, 유입 질소부하 증가에 따라 제거효율은 감소하는 것으로 조사되었다. 유입 질소 부하 증가에 따른 제거효율을 검토한 결과, 0.026 ~ 0.396kg NO₃-N/m³·day 범위에서는 질소 제거율이 79.2 ~ 88.6%로 조사되었으나, 그 이상의 질소부하에서는 71.7%이하로 감소되는 것으로 조사되었다. Yoo(2012)는 1hr 체류시간에서 NO₃-N의 용적 부하를 0.007 ~ 0.671kg/m³·day로 운전하였을 경우, 질소 제거효율이 32.4 ~ 64.7%라고 보고하고 있으며[2], Shin(2002)은 유입수의 농도를 20 ~ 60 mg/L로 변화시키고, 유입부하가 0.24 ~ 0.64kg NO₃-N/m³·day일 때, 질소 제거효율은 각각98%에서 69%로 감소한다고[8] 보고하였는데, 이러한 경향은 본 연구와 유사한 결과를 나타낸 것이다. 유입수 NO₃-N 부하가 증가할 경우 Shin(2002)은 알칼리도 부족으로 제거

효율이 감소한다고 보고하고 있는데, 알칼리도를 보충할 경우 질소 제거율은 다시 증가한다고 보고하고 있다[8].

현재 하수도법 시행규칙 별표 1의 공공하수처리시설·간이공공하수처리시설의 방류수수질기준(제3조 제1항 제1호 관련)에 의하면 1일 하수처리 용량 50m³이상의 경우 T-N의 방류수 수질기준을 20mg/L 이하로 명시하고 있다[10]. 위 규정을 본 연구의 질소부하에 따른 제거효율과 비교하여보면, T-N 방류수 수질기준 20mg/L를 안정적으로 유지하기 위해서는 황 탈질조의 유입 T-N 부하율은 0.443kgT-N/m³·day 이하로 유지하여야 하는 것으로 조사되었다. Fig. 10과 11은 질소부하 증가에 따른 T-N과 NO₃-N의 유입·유출 농도 변화를 제시하였다.

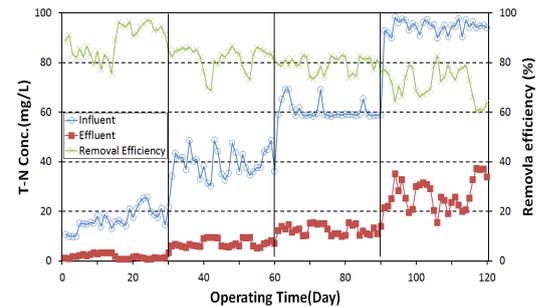


Fig. 10. Variations of T-N concentrations according to operating time.

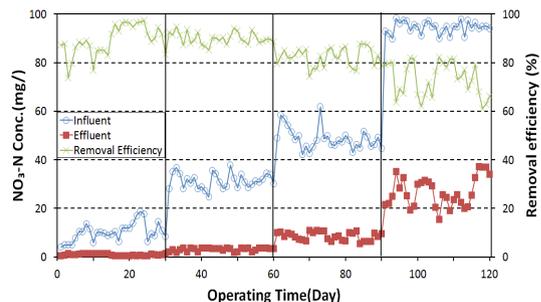


Fig. 11. Variations of NO₃-N concentrations according to operating time.

4. 결론

1. 유체흐름 특성상, 상향류 방식이 황 여재에서 탈리된 미생물의 재침전으로 하향류 방식보다 유출 유기물 농도가 적은 것으로 조사되어, 유기물 감소 측면에서 상향류 주입방식이 유리한 것으로 판단된다.
2. 유입방식에 따른 질소제거효율 조사결과, 상향류 방식의 T-N 제거율은 73.3~90.2%, 하향류는 61.1~75.3%로, 상향류 운전방식이 10.0% 이상 높은 질소 제거효율을 나타냈다.
3. 상향류식 방식에서 EBCT 변화에 따른 질소제거 효율 검토결과, 1hr에서는 47.4%, 3hr에서는 88.1%, 5hr에서는 90.5%로 조사되었다. 실험결과, EBCT 3hr 이상에서는 대부분의 질소가 제거되는 것으로 조사되어, 황 탈질 공정의 최적 EBCT는 3hr로 판단된다.
4. 법 규정과 부하율에 따른 총질소 제거효율을 검토한 결과, T-N 법적 방류수질 20mg/L를 을 안정적으로 유지하기 위해서는 황 탈질조의 유입 T-N 부하율은 0.443kgT-N/m³·day 이하로 유지하여야 한다.

References

- [1] Y.H. Kim, K.C. Chae, S.K. Yim, Y.M. Lee, W.K. Bae, "Evaluation of Design and Operation Parameters for a Spherical Sulfur Denitrification Reactor Treating High Strength Municipal Wastewater", *J. of Kor. Soc. Environ. Eng.*, 35(10), pp. 1087-1093, 2010.
- [2] Yoo. S. J., "A study on the removal of nitrogen and phosphorus in the recyclr water from waste water treatment system sulfur by denitrification", Department of environmental engineering the graduate school, Hansoo University of korea. pp. 1-3, pp. 40-43, 2012.
- [3] Park. N. Y., "Nitrogen and Phosphorous Removal in an Anoxic-Anaerobic-Aerobic BNR Process", Department of civil and environmental engineering the graduate school Yonsei University of korea, pp. 2-4, 2004.
- [4] Kim. M. S., "Denitrification of sulfur utilizing bacteria for the treatment of wastewaters with low C/N ratio", Department of environmental engineering graduate school, Industry Chonnam National University, pp. 1-2, 2002.
- [5] Kurt. M., Dunn, I. J., and Bourne, J. R., "Biological denitrification of drinking water using autotrophic organics with H₂ in a fluidized bed biofilm reactor", *Biotechnol Bioeng.*, 29, pp. 493-501, 1987.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/bit.260290414>

- [6] Brian, A. T., Lenly, J. W. and Alvarez, J. J., "Fe(0)-Supported autotrophic denitrification", *Environ. Sci. Technol.*, 32, pp. 634-639, 1998.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/es9707769>
- [7] Charles, T. D. and James, J. B., "The use of sulfur and sulfide in packed bed reactors for autotrophic denitrification", *J. WPCF.*, March, pp. 569-577, 1978.
- [8] Shin. B. S., "A Study on Nitrate Removal from Municipal Sewage Using Sulfur-Utilizing Autotrophic Denitrification", Department of environmental engineering the graduate school, Inha University of korea, pp. 6-9, pp. 24-27, pp. 48-52, 2002.
- [9] Koenig, A. and Liu, L. H., "autotrophic denitrification of landfill leachate using elemental sulfur", *Wat. Sci. Tech.*, 34(5-6), pp. 469-476, 1996.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0273-1223\(96\)00680-4](http://dx.doi.org/10.1016/0273-1223(96)00680-4)
- [10] The National Law Information Center(<http://www.law.go.kr>)
- [11] R Yamamoto-Ikemoto, T Komori, M Nomuri, Y Ide & T Matsukami., "Nitrogen removal from hydrophnic culture wastewater by autotrophic denitrification using thiosulfate", *Wat. Sci. Tech.*, 42(3-4), pp. 369-376, 2000.

유 태 경(Tak-Kyoung Yoo)

[정회원]



- 2014년 2월 : 강원대학교 환경공학(공학사)
- 2016년 8월 : 강원대학교 환경방재공학과(공학석사)
- 2016년 9월 ~ 현재 : 강원대학교 지구환경시스템공학과 연구원

<관심분야>

수질관리, 고도처리

최 용 범(Yong-Bum Choi)

[정회원]



- 1999년 2월 : 강원대학교 환경공학(공학석사)
- 2011년 2월 : 강원대학교 환경공학(공학박사)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 강원대학교 지구환경시스템공학과 겸임교수

<관심분야>

수질관리, 고도처리

권 재 혁(Jae-Hyouk Kwon)

[정회원]



- 1990년 8월 : 강원대학교 토목공학과(공학석사)
- 1994년 8월 : 강원대학교 토목공학과(환경공학 박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 지구환경시스템공학과 교수

<관심분야>

수질관리, 고도처리