



Pilot Scale Plant의 황 충전 MBR을 이용한 고효율의 질소제거 공법 개발 Development of High-rate Nitrogen Removal Process Using Submerged MBR Packed with Granular Sulfur of Pilot Scale Plant

문진영 · 황용우* · 조현정

Jin-young Moon · Yong-woo Hwang* · Hyun-jung Jo

인하대학교 환경공학과

(2011년 4월 11일 접수 ; 2011년 6월 10일 수정 ; 2011년 6월 14일 채택)

Abstract

In this study, a process combined biofiltration with sulfur-utilizing autotrophic denitrification and membrane separation was proposed to examine the efficiency of nitrogen removal. As an experimental device, hollow-fiber module was installed in the center of reactor to generate the flux forward sulfur layer in the cylinder packed with granular sulfur. In addition, a simple module was installed in activated sludge aeration tank which inside and outside of sulfur-using denitrification module was covered with microfilter and the module was considered as an alternative of clarifier.

The experiment for developing new MBR process was carried out for three years totally. As the results of first two-year experiment, successful nitrogen removal performance was revealed with lab-scale test and pilot scale plant using artificial wastewater and actual plating wastewater. In this year, pilot scale test using actual domestic wastewater was performed to prove field applicability. As the results, high-rate nitrogen removal performance was confirmed with about $0.19 \text{ kg NO}_3^- \text{-N/m}^3 \cdot \text{day}$ of rate. Also significant fouling and pressure increase were not found during the experiment. And, the production ratio of sulfate and the consumption ratio of alkalinity showed a slightly higher value about $311 \text{ mg SO}_4^{2-}/\text{L}$ and $369 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$, respectively.

In conclusion, the developed MBR process can be utilized as an alternative for retrofitting existing wastewater plants as well as new construction of advanced sewage wastewater treatment plants, with cost-effective merit.

Key words : Autotrophic denitrification, Submerged MBR, granular sulfur, pilot scale plant

주제어 : 독립영양탈질, 침지형 분리막 생물반응조, 입상황, 소규모설비

1. 서론

하천이나 호소의 부영양화 발생 등에 따라 최근 영양염류에 대한 방류수 규제 기준이 점차 강화되고 있으며, 이를

방지하기 위해서는 유기물뿐만 아니라, 질소와 인의 제거가 매우 중요하다. 그동안 생물학적 질산화 및 탈질 공법은 물리/화학적 처리공법에 비해 하폐수처리를 위한 친환경적이고 경제성을 갖춘 대안으로서 다양한 분야에 적용되어 많은

* Corresponding author Tel:+82-32-860-7501, Fax:+82-32-863-4267, E-mail: hwangyw@inha.ac.kr(Hwang, Y.)



Fig. 1. Submerged MBR Packed with Granular Sulfur of Pilot Scale



성과가 도출되었다.

일반적으로 기존 하수처리장에서는 경제적인 생물학적 수처리 방법으로 표준활성슬러지 공법을 이용하고 있다. 그러나 표준활성슬러지 공법은 유기물을 주 제거 물질로 하기 때문에 영양염류가 미처리된 채로 방류되어 상수원의 부영양화를 가중시키고 있는 실정이다. 표준활성슬러지 공법의 질소제거율은 20~40%(류, 1999)에 불과하며, 따라서 강화되고 있는 질소와 인의 규제치에 적합한 처리수질을 보장하기 위해서는 이를 고도 처리할 수 있도록 기존 하수처리 시설에 추가적인 시설의 설치 또는 기존 시설의 개조가 필연적으로 요구되고 있다.

본 연구에서는 기존 시설의 개조를 통한 고도처리 방법으로, 침지형 황 충전상 모듈을 결합시킨 황 충전 MBR을 이용한 질소제거 공정을 개발하여 기존 하수처리시설 내부에 간단한 모듈을 추가 설치함으로써 고도처리가 가능한 황 탈질 공정을 개발하고자 하였다.(환경부와 환경관리공단, 2004) 즉, 황 충전상 내부에 분리막 모듈을 설치함으로써 충전상 내부로의 질산화액의 강제 flux를 발생시켜 포기조 내 질소제거의 효율을 검토한 것이다.

황 탈질 공정은 독립영양탈질로서 생물학적 탈질공정 전자공여체로 유기물 대신 황을 이용하므로 낮은 C/N비를 갖는 국내 하수의 처리에 있어 매우 적합한 공정으로 다양한 연구(변 등, 2000; 이 등, 2000; 추 등, 2002)가 진행되어 왔다. 본 연구에서는 황 탈질 공정의 도입을 위한 구체적인 형태로서 기존 하수처리장의 포기조 내에 원통형 황 탈질 모듈을 침지시켜 중앙부분으로부터 유출시키는 공정을 개발하였다.

본 연구를 통해 국내의 일반 하수처리장 내에 설치가 간단하면서도 질소제거효율이 우수한 고도처리시설로서 하나의 모형을 제시하고자 하였고, 고농도의 질소함유 폐수를 적용시킨 실험을 통하여 실용화 가능한 고효율의 질소제거 공정을 개발하고자 하였다. 이는 타 공정에 비하여 경제적이고 콤팩트하게 적용가능하기 때문에 매우 광범위하게 활

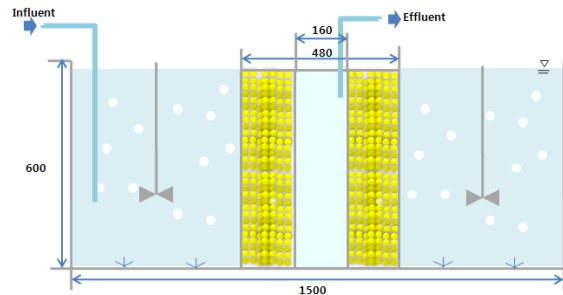


Fig. 2. Schematic Diagram of Submerged MBR Packed with Granular Sulfur of Pilot Scale.

용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

황 충전 MBR(microfilter bioreactor)반응기의 현장적용성 평가를 위해 인천 S하수처리장에 Pilot-Scale의 실험장치를 설치하여 실험을 수행하였다. 반응기 전경 및 공정도를 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. 스테인레스로 제작된 장방형 반응조 안에 다공성의 원통형 케이스를 설치하고 내외부에 최종침전지 대신 여과 기능을 수행할 수 있는 microfilter(pore size: 25, 50 μm)를 설치하였다. 두 개의 원통 사이 부분에 황이용 탈질 미생물을 부착시킨 입상황을 전체 반응조 부피의 약 15%로 충전 하였다. 황 탈질 모듈의 외부는 질산화조를 형성시키고, 황 탈질 모듈은 탈질조의 역할을 하였다. 유출방식은 유입수가 자연적인 수류에 의해 질산화 및 탈질 반응을 거치면서 황 탈질 모듈 중앙의 작은 원통 내로 이동하게 되고, 작은 원통에 모인 최종 유출수를 펌프를 이용하여 배출되도록 구성하였다. 원통형 반응조 아래에는 공기를 이용한 생물막의 역세를 위해 공기라인을 설치하였고, 밸브의 개폐를 통하여 역세를 조절할 수 있도록 구성하였다.

Table 2. Composition of the Influent Wastewater

Item	Influent	
	Range	Average
pH	7.1 ~ 8.3	7.8
Alkalinity (mg/L)	420 ~ 720	574
TBOD ₅ (mg/L)	61 ~ 142	105
SBOD ₅ (mg/L)	12.3 ~ 93	57
TCOD _{cr} (mg/L)	145 ~ 471	262
SCOD _{cr} (mg/L)	57 ~ 156	96
TKN (mg/L)	29 ~ 63	39
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	19 ~ 56	30
T-N (mg/L)	30 ~ 66	40
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	106 ~ 481	358

Table 3. Summary of Experimental Conditions

Phase	HRT(hr)	Q(m ³ /d)	Loading rate (kg NO ₃ ⁻ -N/m ³ -day)	F/M rate (kg SBOD/kg MLSS-day)
Phase 1	24	0.5	0.18	0.02
Phase 2	12	1.0	0.33	0.05
Phase 3	8	1.5	0.33	0.06
Phase 4	6	2.0	0.33	0.08

총 반응조의 크기는 W*H*L이 각각 70*60*150 cm 이며, 황 층진 MBR의 높이는 55 cm, 외부직경 48 cm이며, 내부 원통형 모듈의 직경은 16 cm이다. 입상황의 입경은 기존의 연구(Koenig와 Liu, 1997; Koenig와 Liu, 2001)에서 탈 질 효율이 입증된 3.4~5.7 mm의 것을 사용하였다.

2.2 실험 방법

본 실험의 유입수는 인천 S하수처리장의 1차 침전지에 유입되는 분배조에서 수중펌프를 이용하여 반응조에 유입시켰으며, 성상을 **Table 2**에 나타내었다. 유입수의 수질항목 중 알칼리도의 경우 실제 유입수의 성상은 평균 250 mg CaCO₃/L 정도로 나타났으나, 질산화 및 황 탈질 반응시 소모되는 알칼리도를 고려하여 중탄산나트륨으로 약 400 mg CaCO₃/L의 알칼리도를 보충해 주었다. 반응조 내의 MLSS 농도는 활성슬러지공정과 조건을 비슷하게 유지하기 위하여 2,500~3,000 mg/L를 유지하였다.

Table 3에 본 실험의 phase별 운전조건을 나타내었다. 실험은 총 4단계로 진행하였으며, 유기물부하로 phase를 결정하려는 초기 의도와는 달리, 유입수 성상이 일정하지 않아 HRT(Hydraulic retention time)를 기준으로 phase를 결정하였다. Phase 1에서는 HRT가 24 hr으로 유입수가 0.5 m³/d의 유량으로 유입되었으며, Phase 2에서는

HRT 12 hr, 유량 1.0 m³/d, Phase 3에서는 HRT 8 hr, 유량 1.5 m³/d, Phase 4에서는 HRT 6 hr, 유량 2.0 m³/d로 유입하였다.

유입수 및 유출수의 시료분석은 Standard Methods (APHA 등, 1998)와 수질오염 공정시험법(환경부, 2004)에 준하여 실시하였다. pH는 pH meter(Orion Model 250A)로, 알칼리도는 적정법을 이용하였으며, pH 4.3까지 적정함으로써 측정하였다. NO₃⁻-N, NO₂⁻-N 그리고 SO₄²⁻ 등의 음이온 분석은 0.45 μm membrane으로 여과한 후 음이온분석용 column(Transgenomic, ICsep ANSC)과 conductivity detector(Waters, 432 Conductivity Detector)가 부착된 Ion chromatography(Dionex, DX-500)로 분석하였다. 각각의 실험 항목 및 분석방법을 **Table 4**에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유기물

Pilot-Scale 반응조에서 유입·유출수의 BOD농도 변화를 TBOD와 SBOD로 구분하여 **Fig. 3**, **Fig. 4**에 나타내었다. TBOD의 유입평균농도는 phase별로 각각 106.8 mg/L, 109.2 mg/L, 103.8 mg/L 및 97.5 mg/L로 나타났으며,

Table 4. Analytical Methods

Item	Analytical Methods
TKN	Macro Kjeldahl Method of Standard Methods
NH ₄ ⁺ -N	
COD _{Cr}	Dichromate Reflux Method of Standard Methods
BOD	5-day BOD Test of Standard Methods
Alkalinity	Titration Method of Standard Methods
DO	DO meter (YSI Model 58)
pH	pH meter (ORION 720A)
NO ₂ ⁻ -N	Ion Chromatography(Dionex, DX-500)
NO ₃ ⁻ -N	
SO ₄ ²⁻	

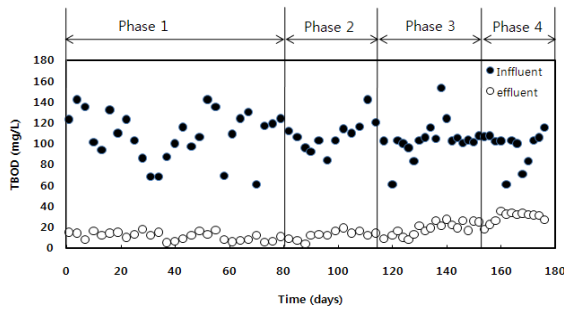


Fig. 3. Variation of TBOD in the influent and effluent of the reactor.

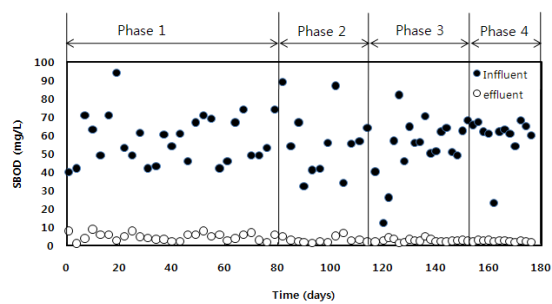


Fig. 4. Variation of SBOD in the influent and effluent of the reactor.

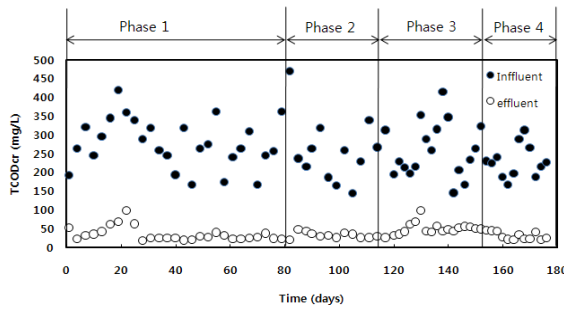


Fig. 5. Variation of TCOD in the influent and effluent of the reactor.

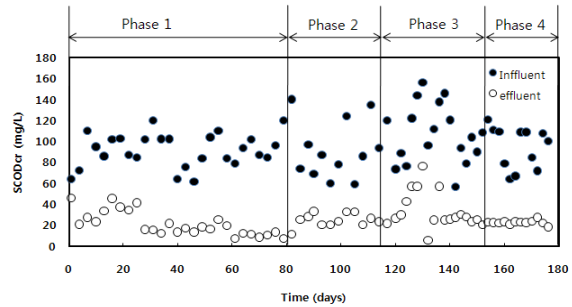


Fig. 6. Variation of SCOD in the influent and effluent of the reactor.

그에 따른 TBOD용적부하는 0.06 kg TBOD/m³-d, 0.11 kg TBOD/m³-d, 0.16 kg TBOD/m³-d 및 0.24 kg TBOD/m³-d로 나타났다. 이때 유출수의 평균농도는 각각 12.4 mg/L, 10.6 mg/L, 18.6 mg/L 및 29.1 mg/L으로 나타났는데, 따라서 TBOD의 제거효율은 phase별로 89%, 90%, 82% 및 70%로 나타나 부하에 관계없이 70%이상의 제거효율을 나타내었다. 침전조가 존재하지 않는 반응조 내에서 유출수의 TBOD농도는 평균 18 mg/L 정도로 나타는

것은 원통형모듈에 설치한 microfilter 및 충전된 입상황에 의한 여과작용에 인한 것으로 판단된다.

SBOD의 경우 TBOD의 약 50%정도 수준으로 유입되었으며, 유출수의 SBOD농도는 모든 phase에서 약 3.5 mg/L 정도의 농도로 안정되게 유출되었다.

Pilot-Scale 반응조에서 유입-유출수의 COD농도 변화를 TCOD와 SCOD로 구분하여 Fig. 5, Fig. 6에 나타내었다. TCOD의 유입평균농도는 모든 phase에서 약 250

mg/L정도의 농도로 유입되었으며, 유출수는 약 38 mg/L로 일정하게 유출되었다. SCOD의 경우는 TCOD의 약 40%의 수준의 농도로 유입되었으며, 유출수의 농도는 약 26 mg/L로 일정하게 유출되었다.

3.2 질소

질산화를 파악하기 위해 유입·유출수의 암모니아 농도를 Fig. 7에 나타내었다. 암모니아의 유입 평균농도는 phase별로 각각 29.6 mg/L, 29.2 mg/L, 30.6 mg/L 및 29.9 mg/L로 나타났으며, 이때 암모니아 유출 평균농도는 각각 0.9 mg/L, 1.4 mg/L, 12.6 mg/L 및 16.4 mg/L로 나타나 phase가 높아짐에 따라 질산화의 변화가 발생하였다. Phase 1, phase 2에서는 질산화율이 90%이상으로 유지되었으나 phase 3에서부터 질산화율이 점차 저하되어 phase 4에서는 약 45%정도의 질산화율을 나타내었다.

Fig. 8에 황 충전 모듈의 질산성질소 유입부하 및 질소 제거 속도를 나타내었다. 여기서 질산성질소 유입부하는 질산화율이 100% 황 충전 모듈에 유입된다고 가정하고 유입부하를 계산하였다. 황 충전 모듈로의 질산성질소 유입부하는 phase 1에서 0.18 kg NO₃⁻-N/m³-d, phase 2~4에서는 모두 0.33 kg NO₃⁻-N/m³-d로 나타났다. 이는 유입부하

가 증가함에 따라 질산화율이 낮아짐으로서 황 충전 모듈내로의 질산성질소 유입농도가 낮아졌기 때문으로 판단된다. 이때 질소제거속도는 phase별로 각각 0.13 kg NO₃⁻-N/m³-d, 0.23 kg NO₃⁻-N/m³-d, 0.14 kg NO₃⁻-N/m³-d 및 0.26 kg NO₃⁻-N/m³-d로 나타났다.

전체 반응조에 대한 T-N유입부하 및 탈질속도와의 상관관계를 Fig. 9에 나타내었다. T-N의 유입질소 부하는 평균 0.09 kg N/m³-d로 나타났으며 그에 따른 제거속도는 평균 0.044 kg N/m³-d로 나타났다.

3.3 알칼리도

황 탈질 반응이 유기물을 이용하는 종속영양 탈질과 다른 큰 특징 중의 하나는 수소이온의 생성으로 인해 알칼리도를 소모한다는 사실이다. 따라서 황 탈질에서는 알칼리도의 소모에 의한 pH저하를 방지하기 위해 충분한 양의 알칼리도를 첨가해 주어야 한다. 여러 연구자들(Zhang과 Shan, 1999, Mann 등, 1972)에 의해 황 탈질 미생물 성장의 최적 pH에 대한 연구가 수행되었으며, 대부분 pH 6.5~7.5를 최적 pH로 제시하였다. 본 연구에서의 유입·유출수 알칼리도 거동을 Fig. 10에 나타내었다. 실제 유입수의 성상은 평균 250 mg CaCO₃/L 정도로 나타났으나, 질산화 및 황탈

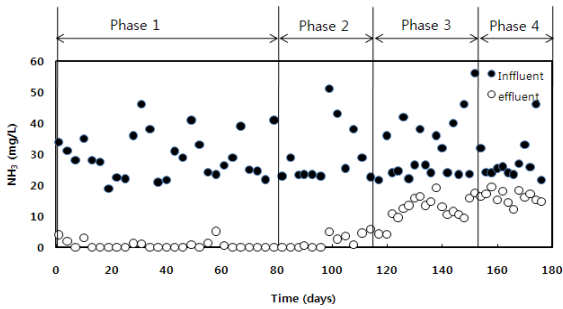


Fig. 7. Variation of NH₄⁺-N in the influent and effluent of the reactor.

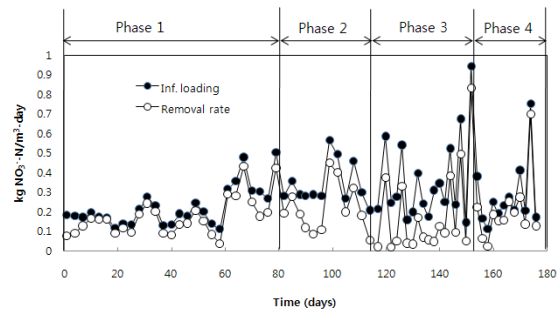


Fig. 8. NO₃⁻-N loading rate and denitrification rate in MBR packed with granular sulfur.

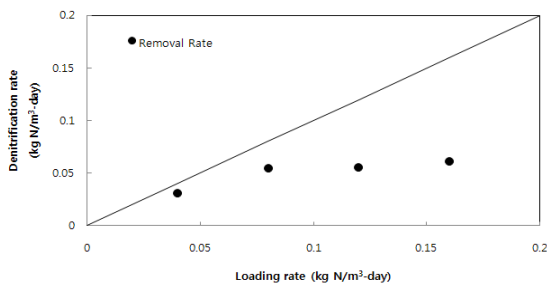


Fig. 9. Effects of loading rate on sulfur-utilizing denitrification rate in MBR packed with granular sulfur.

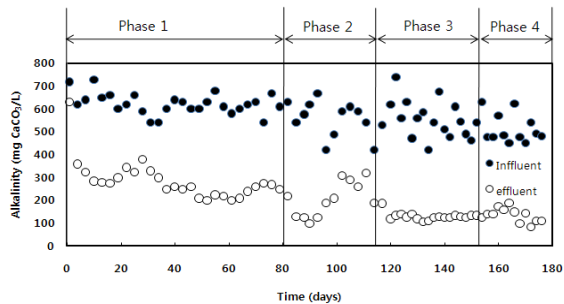
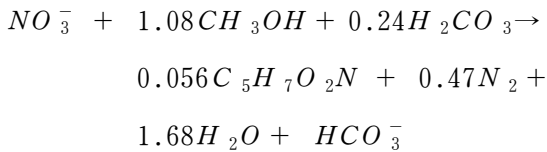


Fig. 10. Changes in influent and effluent alkalinity.

질 반응시 소모되는 알칼리도를 고려하여 중탄산 나트륨으로 약 400 mg CaCO₃/L의 알칼리도를 보충해 주었다. 따라서 유입수의 알칼리도는 운전기간 중 평균 574 mg CaCO₃/L로 측정되었으며, 유출수의 알칼리도는 평균 205 mg CaCO₃/L로 나타났다.

Fig. 11에 본 실험에서 실제로 소모된 알칼리도와 질산화 탈질시 소모되는 이론적 알칼리도를 비교하여 나타내었다. 실제로 소모된 알칼리도는 평균 369 mg CaCO₃/L로 나타났으며, 아래의 화학양론식을 이용하여 질산화에 소모되는 알칼리도를 7.14 g CaCO₃/g NH₄⁺-N(Villaverds 등, 1997)로, 황이용 탈질에 필요한 알칼리도를 4.57 g CaCO₃/g NO₃⁻-N(Driscoll과 Bisogni, 1978)로 산정하여 계산된 이론적 알칼리도 소모량은 평균 232 mg CaCO₃/L로 나타나 약 137 mg CaCO₃/L정도의 차이를 나타내었다. 알칼리도의 소모량은 계산된 이론적인 양보다 다소 높게 측정되었는데 이는 질산화를 위해 필요한 산소의 영향에 의해 알칼리도의 소모가 증가한 것으로 판단된다.



3.4 황산이온

황이용 탈질 공법에서는 양론식에 따라 제거된 질소에 비례하여 황산이온이 생성된다. Fig. 12에 황이용 탈질시 유입-유출수의 황산이온 변화 나타내었다. 그 결과, 유입수의 황산이온 농도는 평균 358 mg SO₄²⁻/L로 나타났으며, 유출수의 평균 황산이온 농도는 670 mg SO₄²⁻/L정도로 나타났다.

Fig. 13에 황이용 탈질시 생성되는 황산이온의 농도를 이론값과 실제 측정값을 비교하여 나타내었다. 황산이온이 생

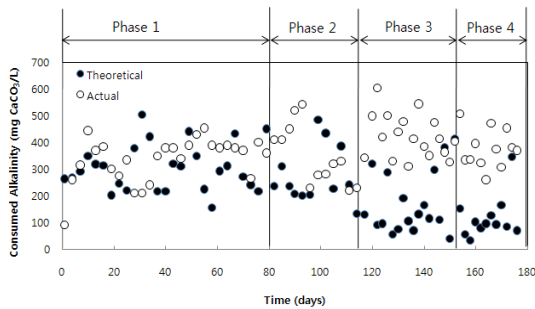
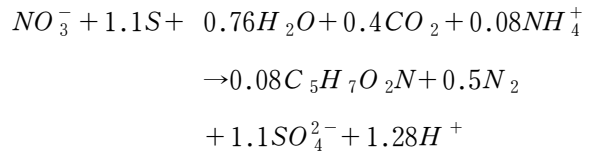


Fig. 11. Comparison of theoretical required alkalinity and measured alkalinity.

성되는 이론값은 Batchelor와 Lawrence(1978)의 실험을 통해 제시된 아래의 식을 이용하여 구할 수 있는데 이 양론식을 통해 황산이온 생성비를 구해보면 1 g의 질산성질소가 제거되는데 7.54 g의 황산이온이 생성된다.



실제 황산이온의 생성량은 평균 311 mg SO₄²⁻/L로 나타났으며, 이론적인 황산이온의 생성량은 168 mg SO₄²⁻/L로 나타나 실제 생성량이 약 143 mg SO₄²⁻/L정도 높게 나타났다. 이는 포기조에 존재하는 *T. thooxidans* 등의 황산화 미생물들이 황을 이용하면서 발생하는 현상으로 판단된다.

3.5 기타 운전사항

본 Pilot-Scale의 황충진 모듈을 이용한 반응조를 약 6개월간 운전한 결과 생물막의 폐색으로 인하여 약간의 유량

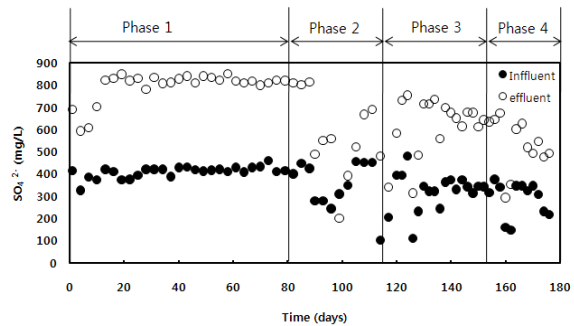


Fig. 12. Changes in influent and effluent sulfate.

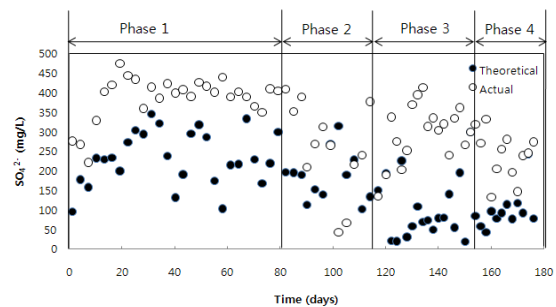


Fig. 13. Variation of sulfate in the reactor and theoretical sulfate production.

에 변동이 생길 경우 역세장치를 통하여 생물막에 대한 공기역세를 실시하였으며 역세 후에는 바로 안정한 상태로 운전이 진행되었다. 이는 원통형 모듈에 설치되어 있는 microfilter의 SS 및 활성슬러지에 대한 여과작용으로 인하여 운전기간 중 생물막이 폐색되어 여과저항을 일으키는 현상이 나타나지 않은 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 실제 하수를 이용하여 Pilot scale의 황충진 MBR 공정의 질소제거성능을 파악하고, 질소제거에 동반되는 알칼리소비 등과 같은 반응물질 생성, 소비량의 확인 등을 검토하였다. 결론은 다음과 같다.

- 1) TBOD의 유입평균농도는 105.1 mg/L로 나타났으며, 이때 유출수의 평균농도는 16.5 mg/L로 나타났는데, 따라서 TBOD의 제거효율은 부하에 관계없이 70% 이상의 제거효율을 나타내는 것으로 나타났다. SBOD의 경우 TBOD의 약 50%정도 수준으로 유입되었으며, 유출수의 SBOD농도는 모든 phase에서 약 3.5 mg/L 정도의 농도로 안정되게 유출되었다. TCOD의 유입평균농도는 모든 phase에서 약 250 mg/L 정도의 농도로 유입되었으며, 유출수는 약 38 mg/L로 일정하게 유출되었다. SCOD의 경우는 TCOD의 약 40%의 수준의 농도로 유입되었으며, 유출수의 농도는 약 26 mg/L로 일정하게 유출되었다. 황충진 모듈의 침지로 인하여 실질적인 호기조의 용적이 줄어들었음에도 불구하고 유기물에 대한 제거효율은 기존 하수처리장과 비교하여 큰 차이가 나타나지 않았으므로 본 공정을 통한 유기물 제거는 현장적용성에도 큰 문제가 발생하지 않을 것으로 판단된다.
- 2) 황충진 모듈로의 질산성질소 유입부하는 phase 1에서 0.18 kg NO₃⁻-N/m³-d, phase 2~4에서는 모두 0.33 kg NO₃⁻-N/m³-d로 나타났다. 이때 질소제거속도는 phase별로 각각 0.13 kg NO₃⁻-N/m³-d, 0.23 kg NO₃⁻-N/m³-d, 0.14 kg NO₃⁻-N/m³-d 및 0.26 kg NO₃⁻-N/m³-d로 나타났다.
- 3) 황이온 생성량 및 알칼리소비량은 각각 311 mg SO₄²⁻/L, 368 mg CaCO₃/L로 이론치인 168 mg SO₄²⁻/L, 232 mg CaCO₃/L보다 다소 높게 나타났다. 이는 탈질에 관여하지 않는 황산화 미생물의 존재에 기인한 것으로 추정된다.

- 4) 침지형 황충진 모듈을 이용한 황충진 MBR을 운전한 결과, 황 모듈의 막힘으로 인한 운전 저해현상은 관찰할 수 없었다.

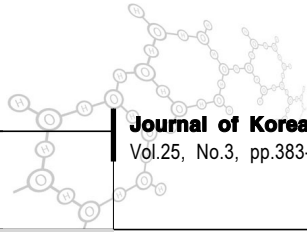
결론적으로 황충진 MBR을 이용하여 하수에 대하여 높은 질소 제거효율을 얻을 수 있었으며, 이를 통해 기존의 처리장에 대한 개조는 물론 신규 고도처리장 건설에도 크기가 작고 설치비 부담이 적은 공정으로 이용 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 인하대학교 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 인하대학교에 감사의 뜻을 포함합니다.

참고 문헌

- 류희정, 신광식, 신진환, 신형우, 이원호, 강성환 (1999) 기초 상하수도, p. 404. 신광문화사
- 변정섭, 범봉수, 조광명 (2000) 황을 이용한 독립영양탈질에서의 체류시간과 온도의 영향, *대한환경공학회지*, 22(3), pp. 405-415.
- 이동욱, 박재홍, 배재호 (2000) 황-이용 독립영양 탈질시 알칼리도 저감을 위한 종속영양 탈질의 이용방안, *대한환경공학회지*, 22(11), pp. 1995-2005.
- 추인준, 황용우, 김창균, 이시진 (2002) 황충진 섬모상 담체를 이용한 질산화 탈질 동시수행, *대한환경공학회지*, 24(2), pp. 185-194.
- 환경부, 환경관리공단 (2004), 하수처리장 운전개선방식 우수사례집, 11-1480000-000736-01, pp. 29-35.
- 환경부 (2004), 수질환경오염공정시험법, 환경부 고시 제 2004-188호.
- APHA AWWA, and WEF (1998), Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Ed..
- Batchelor, B. and Lawrence, A. W. (1978) A kinetic model for autotrophic denitrification using elemental sulfur, *Wat. Res.*, 12, pp. 1075-1084.
- Batchelor, B. and Lawrence, A. W. (1978) Autotrophic denitrification using elemental sulfur, *J. WPCF*, 50(8), pp. 1986-2001.
- Batchelor, B. and Lawrence, A. W. (1978) Stoichiometry of autotrophic denitrification using elemental sulfur, *Chemistry of Wastewater Technology*, pp. 421-440.



- Driscoll, T. C. and Bisogni, J. J. (1978) The Use of Sulfur and Sulfide in Packed Bed Reactors for Autotrophic Denitrification, *J. WPCF., March*, pp. 569-577.
- Villaverds S, Encina PAG, Polanco F. F. (1997) Influence of pH over Nitrifying Biofilm Activity in Submerged Biofilters, *Wat. Res.*, **31**, pp. 1180-1186.
- Koenig, A. and Liu, L. H. (1997) Autotrophic denitrification of nitrified landfill leachate by thiobacillus denitrificans, *Proceedings of the 8th International Conference of Anaerobic Digestion*, 1, Sendai Japan, May 25~29, pp. 299-306.
- Koenig, A. and Liu, L. H. (2001) Kinetic model of autotrophic denitrification in sulphur packed-bed reactors, *Wat. Res.*, **35**(8), pp. 1969-1978.
- Mann, L. D., Focht, D. D., Josep, H.A. and Stolzy, L.H. (1972) Increased denitrification in soils by addition of sulfur as an energy source, *J. Environ. Qual.*, **1**, p. 329.
- Zhang, T. C. and Shan, J. (1999) In situ septic tank effluent denitrification using a sulfur limestone process, *Wat. Env. Res.*, **71**, pp. 1283-1291.