



## 하수처리수 재이용을 위한 실규모 입상항 생물막여과 시설의 효율증대 방안에 관한 연구

### A Study by Proposal of Efficiency Increase for a Full-scale Wastewater Reclamation Facility using a Biofilter Packed with Granular Sulfur

문진영 · 황용우\* · 백승륜

Jin-young Moon · Yong-woo Hwang\* · Seung-ryun Baek

인하대학교 환경공학과

(2009년 12월 7일 접수, 2010년 2월 10일 수정, 2010년 2월 12일 채택)

#### Abstract

This study was performed to increase the removal efficiency of the biofilter packed with granular sulfur in municipal wastewater reclamation facility. Constituent units were influent water tank, denitrification tank, BOD reduction tank and outlet. And, the major operation factor is a biofilter packed with submerged granular sulfur. Actual wastewater and synthetic wastewater were used as influent wastewater. Experimental condition was divided into two phases according to the amount of a phosphorus coagulant. Total phosphorus removal efficiency was insignificant at mode I that phosphorus coagulant was not injected. The average influent and effluent total phosphorus concentrations at mode II were 0.5 ~ 1.0 mg/L and 0.27 mg/L, respectively. As for COD and BOD effluent concentrations, COD was 3.0 mg/L and BOD was 1.0 mg/L. Additionally, nitrogen removal rates were high at low influent DO concentration. In conclusion, a new process, biofilter packed with granular sulfur is expected to treat high-rate nitrogen wastewater and expected to be utilized as an alternative of technological innovation for the nitrogen treatment.

**Key words :** Denitrification, Reclamation, granular sulfur, Biofilter Packed with Granular Sulfur

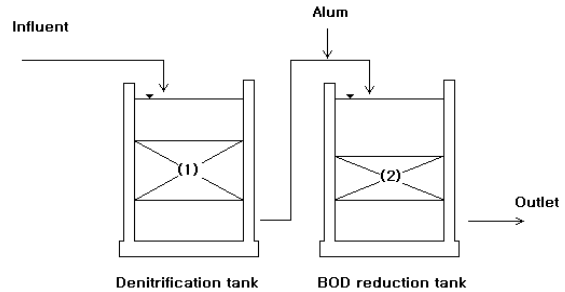
**주제어 :** 탈질반응, 재이용, 입상항, 입상항생물막여과시설

#### 1. 서론

현재 우리나라에서는 인구의 도시 집중 및 생활수준의 향상으로 인한 생활용수의 부족 현상과 일부 산업지역에서의 공업용수 부족 현상이 나타나고 있다. 이와 같은 배경으로 수자원 관리 및 개발을 위한 하수의 재이용이 확산되고 있는 추세이다. 현재 법적으로도 일정 기준 이상의 건물에서는 재이용수의 활용을 적극적으로 권장하거나 혹은 사용을 의무화하도록 하는 단계에 있다.

하수처리수의 재이용을 통해 주민들의 친수공간을 확보하고, 정부의 추진정책의 일환으로 전국 최초로 실규모 재이용시설인 입상항생물막여과(Biofilter Packed with Granular Sulfur)시설이 설치되었고, 현재 운전 중에 있다. 입상항생물막여과시설은 황을 이용한 독립영양 탈질(Batchelor와 Lawrence, 1989)을 통하여 유기탄소원 없이 질소를 제거하는 것이 가장 큰 특징이라 할 수 있다. 국내에서도 이미 황을 이용한 독립영양 탈질에 대한 여러 연구(변 등, 2000; 이 등, 2000; 추 등, 2002; Oh 등, 2002;

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



(1) Granular sulfur 80%+Limestone 20%  
(2) Anthracite

Fig. 1. The Foreground and Schematic of the facilities for Biofilter Packed with Granular Sulfur

이 등, 2003; 이 등, 2004)가 활발히 진행되어 왔다. 황이 용 독립영양 탈질에 미치는 주요 영향인자로는 pH, DO 및 저해물질 등이 있다. 황이용 탈질시 최대효율을 얻기 위한 최적의 pH는 Claus와 Kutzner(1985)의 실험에서는 7.5~8.0으로 나타났으며 Zhang과 Shan(1999), Mann 등(1972)에 의해 수행된 연구에서는 대부분 pH 6.5~7.5를 최적 pH로 제시하였다. 또한, Justin과 Kelly(1978)는 DO 농도가 12  $\mu\text{mol/L}$ 일 때, *T.denitrificans*의 증식계수(Y)가 최대라고 보고하였다. 그 외 황이용탈질의 저해물질 중 질산화 반응물인  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 는 10 g/L, 최종생성물인  $\text{SO}_4^{2-}$ 는 5 g/L 그리고 중간생성물인  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 는 0.2 g/L의 저농도에서도 강한 억제 효과가 나타난다고 보고되었다(Claus와 Kutzner, 1985).

입상황생물막여과시설은 유입수조, 탈질조분배조, BOD저감분배조, 최종방류구로 구성되어 있으며, 4stage BNR의 최종방류수를 유입수로 하여 가동되고 있다.

본 연구에서는 시험운전 중에 있는 재이용시설인 입상황생물막여과시설의 효율증대를 위하여 질소제거 성능평가 및 유기물, 부유물질의 제거 성능 평가를 하였으며, 이를 바탕

으로 실규모 시설의 운영을 통한 성능평가를 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 입상황생물막여과(Biofilter Packed with Granular Sulfur)시설

실규모 재이용시설에 건설된 입상황생물막여과시설의 전경 및 공정도를 Fig. 1에 나타내었다. 입상황생물막여과시설은 입상 황과 석회석이 8:2의 비율로 충전된 W8.4 m × L8.0 m × H8.0 m(여재높이 3.0 m)의 탈질조 10지와 안트라사이트가 충전된 W8.4 m × L8.0 m × H8.0 m(여재높이 2.0 m)의 BOD저감조 6지로 구성되어 있다. 입상황생물막여과시설은 4stage BNR의 최종방류수를 유입수로 하여 가동하였으며, 탈질조와 BOD저감조를 거치면서 잔류하고 있는 유기물, 질소 및 인의 제거를 목적으로 설계되었다.

### 2.2. 조사항목

#### 2.2.1 수질분석

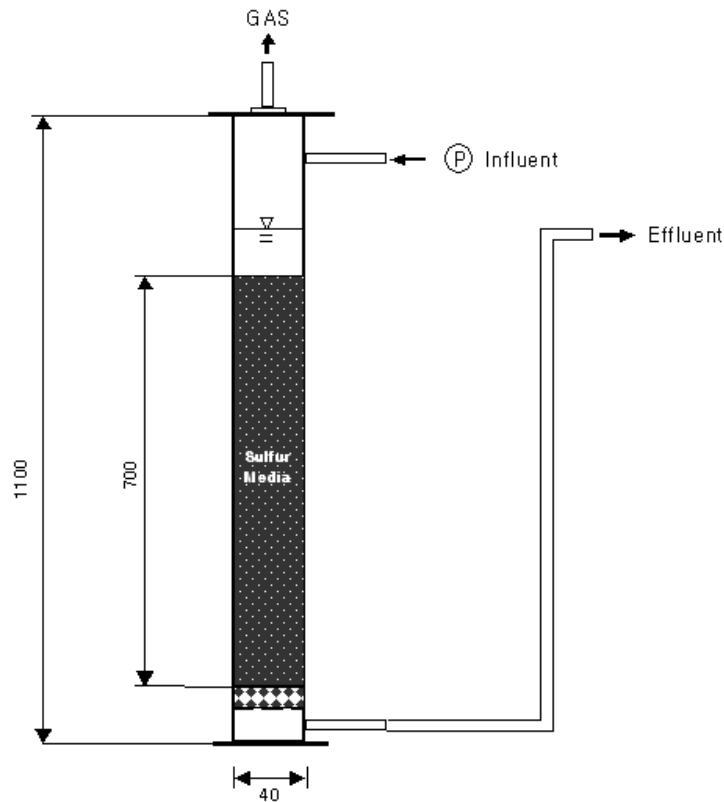
본 조사에서 실시한 분석항목 및 분석방법을 Table 1에

Table 1. Analytical Methods

Item	Analytical Methods
pH	pH meter (ORION 720A)
DO	DO meter (YSI Model 58)
Alkalinity	Titration Method of Standard Methods
SS	Gravimetric
BOD	5-day BOD test of Standard Methods
COD	KMnO <sub>4</sub> Methods
TKN	Macro Kjeldahl Method of Standard Methods
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	Ion Chromatography (Young Lin Instrument, Water 432 Conductivity Detector)
T-P	Ascorbic acid Colorimetric

**Table 2.** Characteristics of the granular sulfur used in the experiment

Effective size(mm)	Uniformity coefficient	Porosity(%)	Packing density(kg·media/L)
3.36	1.25	35.0	1.1



**Fig. 2.** Experimental apparatus of biofilter packed with granular sulfur

나타내었다. 시료의 분석은 전 항목에 대하여 수질오염공정 시험법(환경부, 2004) 및 Standard Method(APHA 등, 1998)에 준하여 분석을 수행하였다. 시료의 채취는 총 5개 지점에서 실시하였으며 분석항목 중 pH, DO 및 수온은 현장 시료채취 시 현장에서 측정하였으며, 실험실 분석이 필요한 항목은 적정 전처리 후 운반하였다.

2.1.2 탈질조 유입수의 최적 DO농도 조사

탈질조 유입수 DO농도에 따른 탈질 효율 변화를 검토하기 위해 사용된 황 충전상 생물막 여과 반응기를 Fig. 2에 나타내었다. 아크릴로 제작된 원통형 반응기로 황 충전층 높이가 70 cm, 내경 4 cm이며, 탈질조의 총 부피는 0.88 L이고 하향류로 운전하였다. 전 실험은 20℃를 유지하는 항온실에서 실시하였다.

황이용 탈질 미생물의 부착성장을 위한 황입자의 적정 크

기에 관련된 기존의 연구(Koenig와 Liu, 1997; Koenig와 Liu, 2001)에서는 2.8~5.6 mm로 하였을 때 탈질효율이 가장 높았다고 보고하였다. 본 연구에서는 기존연구에 비해 균등계수가 낮은 3.0~5.0 mm 입경의 입상황을 충전하였으며 그 물리적 특성을 Table 2에 나타내었다.

실험은 Table 3에 나타낸 바와 같이 유입수의 DO농도를 세 단계(A: 3.0~5.0 mg/L, B: 1.0~3.0 mg/L, C: 1.0 mg/L 이하)로 구분하여 진행하였다. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 유입부하는 입상황생물막여과시설과 동일한 0.28 kg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/m<sup>3</sup>-d 로 설정하였다. 이때 유입수의 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N의 농도는 10 mg/L로 유입하였으며, 황 탈질에 필요한 알칼리도를 4.57 g CaCO<sub>3</sub>/g NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N(Driscoll과 Bisogni, 1978)로 산정하여 약 50 mg CaCO<sub>3</sub>/L의 알칼리도를 공급하였다.

Table 3. Summary of Experimental Conditions

Phase	A	B	C
Q (L/d)	25.0	25.0	25.0
HRT (hr)	1	1	1
DO (mg/L)	3.0~5.0	1.0~3.0	< 1.0

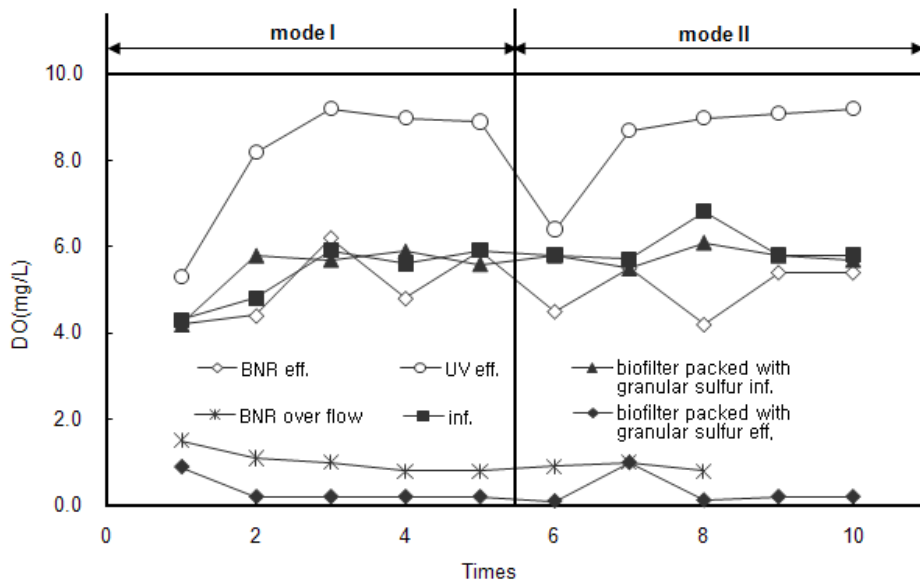


Fig. 3. Variations of DO concentration in Biofilter Packed with Granular Sulfur

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 유입조건에 따른 실험결과

본 조사에서는 운전모드를 2가지로 변경하면서 실험을 수행하였다. 운전모드 I에서는 응집제를 투여하지 않은 조건에서 조사가 진행되었으며, 운전모드 II에서는 응집제를 투여하여 T-P 및 잔류 COD 제거 성능에 대해 조사를 진행하였다.

##### 3.1.1 DO농도의 변화

시료채취지점 각 부분의 DO농도 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 탈질조로 유입되는 유입수조의 DO농도는 약 5 mg/L 이상의 농도로 다소 높게 나타났는데, 그 이유는 4stage BNR 최종침전지 월류수 DO농도는 평균 1 mg/L 이하이지만, BNR 방류관거와의 낙차(약 2 m)에 의해 최종방류수의 DO농도가 5 mg/L 정도로 증가하였기 때문이다. 따라서 4stage BNR 방류수의 낙차를 줄일 수 있다면 자연포기에 의한 DO농도 상승의 역제가 가능할 것으로 판단된다. 탈질조를 거친 BOD저감조 분배조에서는 0.2 mg/L의 농도로

급격히 감소함을 볼 수 있었다.

##### 3.1.2 pH 변화

Zhang과 Shan(1999), Mann 등(1972)의 실험에 의해 제시된 황 탈질 미생물 성장의 최적 pH는 6.5~7.5로 나타났다. Claus와 Kuzner(1985)의 실험에서는 7.5~8.0으로 나타났다. pH는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 응집제를 투여하지 않은 운전모드 I에서는 유입수 및 처리수에서 급격한 변화 없이 거의 6.5 부근에서 유지되었다. 화학적 인체거를 위해 응집제를 투여한 운전모드 II에서는 탈질조 분배조 pH가 약 6.2 정도로 약간의 저하 현상을 나타내었지만, 탈질조의 석회석이 용해되어 pH의 평형을 유지시켜 줌으로써 최종유출수의 pH에는 큰 영향을 주지 않았다.

##### 3.1.3 Alkalinity 변화

황 탈질 반응이 유기물을 이용하는 종속영양 탈질과 다른 큰 특징 중의 하나는 수소이온의 생성으로 인해 알칼리도를 소모한다는 사실이다. 따라서 황 탈질에서는 알칼리도 소모

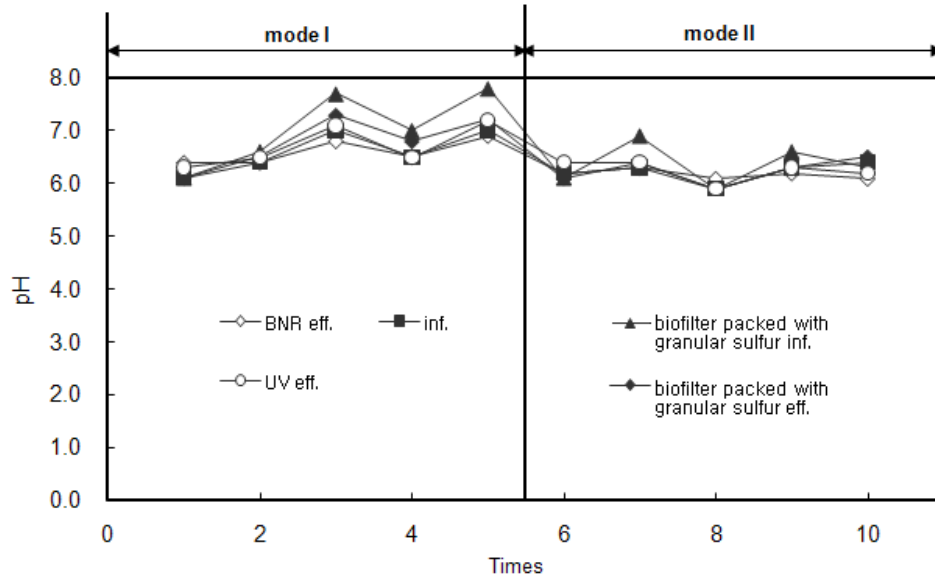


Fig. 4. Variations of pH in Biofilter Packed with Granular Sulfur

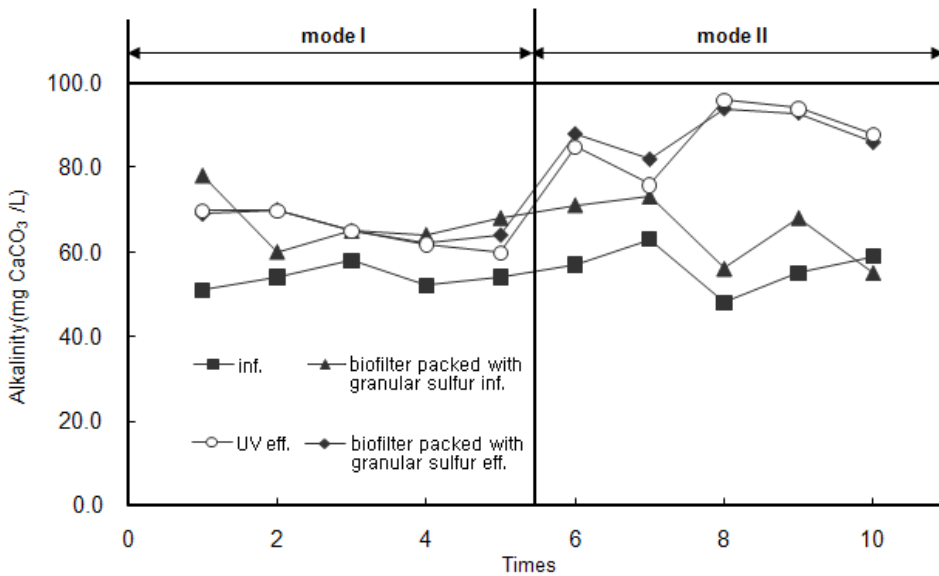


Fig. 5. Variations of alkalinity in Biofilter Packed with Granular Sulfur

에 의한 pH저하를 방지하기 위해 충분한 양의 알칼리도를 첨가해 주어야 한다. 실험기간 동안의 알칼리도 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 유입수조의 알칼리도는 50~60 mg CaCO<sub>3</sub>/L, 최종유출수의 알칼리도는 70~90 mg CaCO<sub>3</sub>/L의 범위 내에서 변화하였다. 단, 실험기간 중 설계에서 계획된 알칼리원을 20 mg CaCO<sub>3</sub>/L로 투입하였으며, 그로 인하여 탈질조 분배조의 알칼리도가 유입수에 비해 약 10 mg CaCO<sub>3</sub>/L 정도로 증가하였다.

### 3.2 처리성능 평가결과

#### 3.2.1 유기물

Fig. 6에 BOD의 농도변화를 나타내었다. 운전모드 I에서는 2~3 mg/L, 운전모드 II에서는 3.5~4.5 mg/L 정도의 유입수질을 보였다. 운전모드 I, II 모두에서 탈질조와 BOD저감조를 거치면서 1 mg/L이하의 수준으로 낮아져 수질보증치인 3 mg/L를 만족하는 것을 확인할 수 있었다.

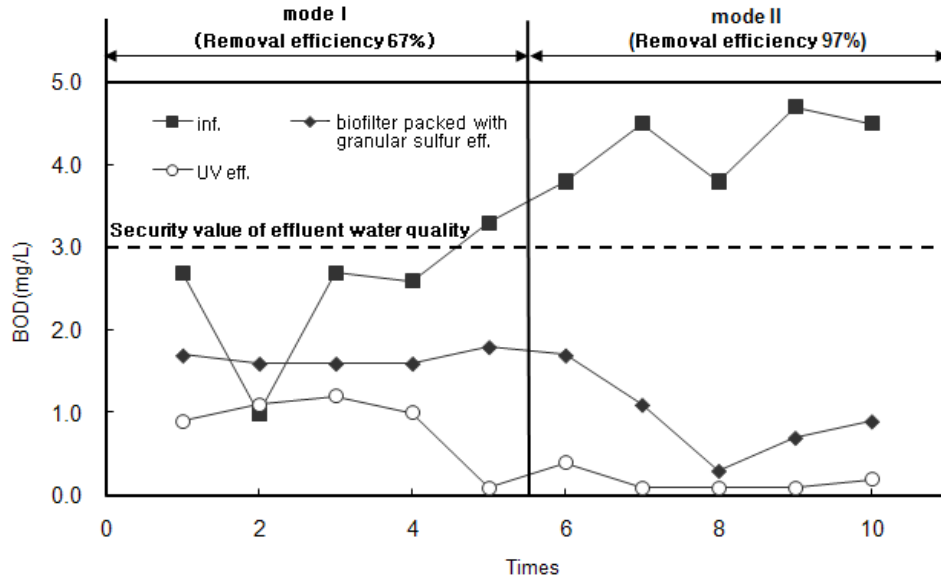


Fig. 6. Variations of BOD concentration in Biofilter Packed with Granular Sulfur

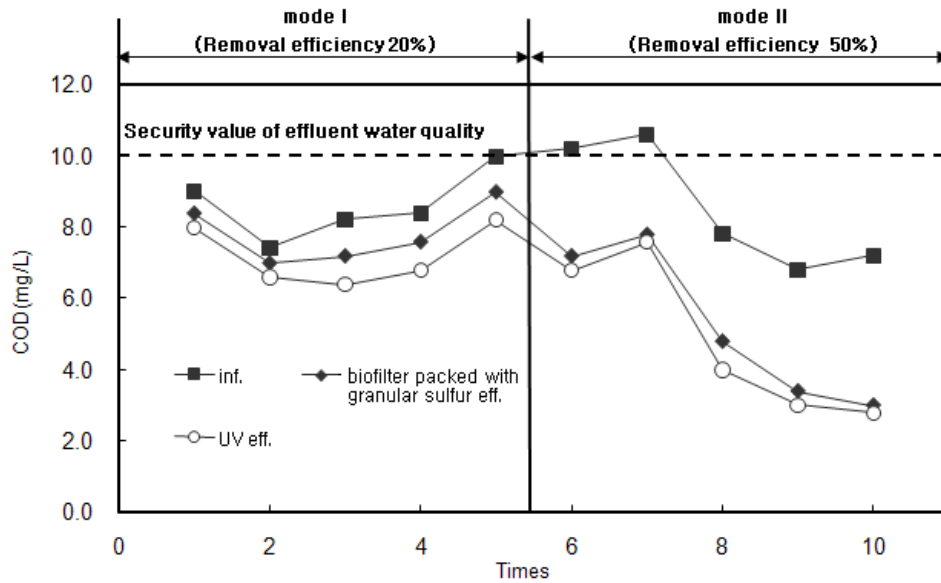


Fig. 7. Variations of COD concentration in Biofilter Packed with Granular Sulfur

Fig. 7에 COD의 농도변화를 나타내었다. COD는 조사기간 내에 유입수의 수질이 거의 10 mg/L이하를 유지하여 별다른 처리 없이도 유출수의 수질보증치를 만족시킬 수 있었다. 운전모드 I에서는 유입수 COD의 약 20%가 제거되어 방류되었지만, 운전모드 II에서는 응집효과에 의한 COD의 저하로 제거효율이 50%까지 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 응집제 24 mg/L (17% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기준)를 투입한 결과 인 제거와 더불어 COD가 제거됨으로써 약 3 mg/L의 농도로 방류

되어 수질보증에 문제가 없는 것으로 판단된다.

### 3.2.2 질소

Fig. 8에 본 조사기간 중의 T-N농도 변화를 나타내었다. 유입수의 T-N 농도는 7~12 mg/L 정도였으며 대부분은 질산화가 이루어진 질산성질소의 형태로 유입되었다. 최종 유출수의 T-N농도는 약 1.2 mg/L정도의 수준으로 수질보증치인 8 mg/L를 충분히 만족시킬 수 있었다.

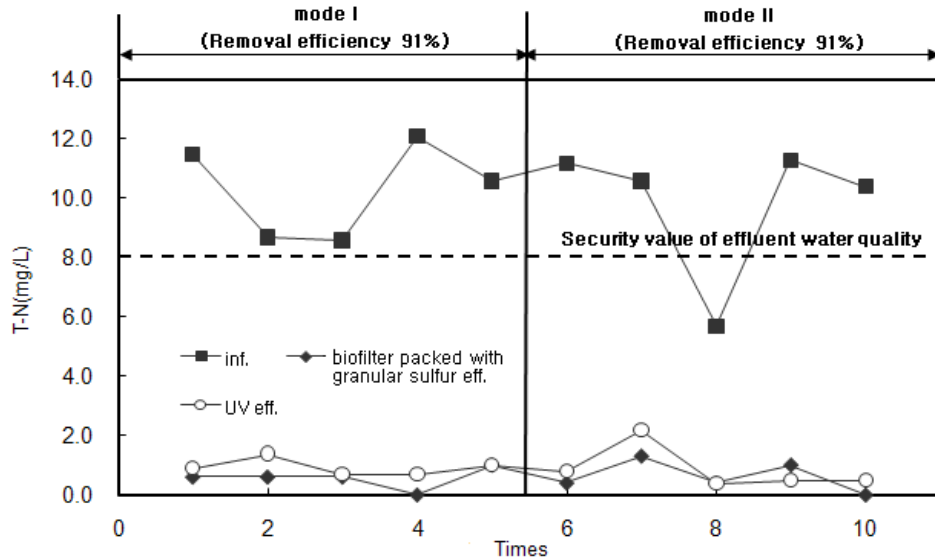


Fig. 8. Variations of T-N concentration in Biofilter Packed with Granular Sulfur

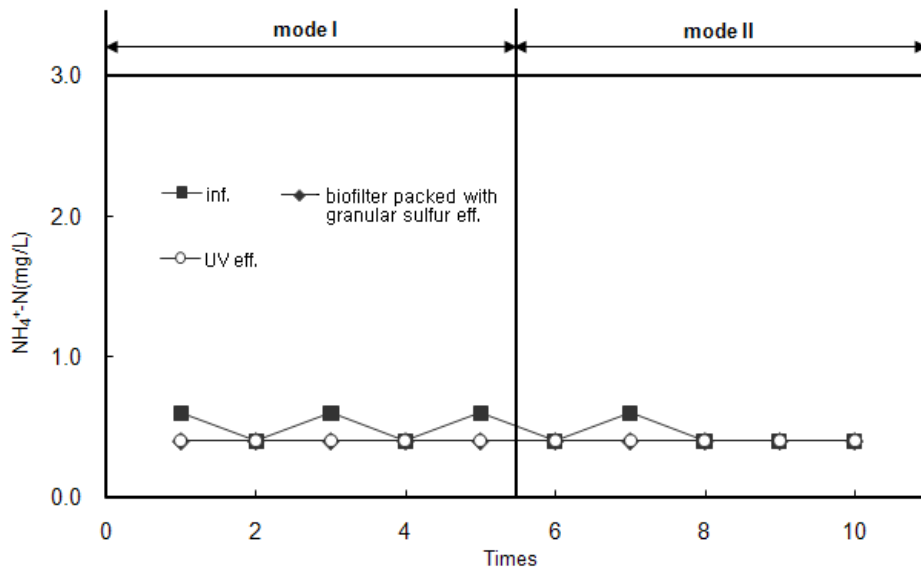


Fig. 9. Variations of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N concentration in Biofilter Packed with Granular Sulfur

Fig. 9에 조사기간 중 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 변화를 나타내었다. 실험기간 중에는 전 단계인 4stage BNR에서 질산화반응이 원활히 이루어져 유입수의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N농도는 1 mg/L이하로 유지되었다. 미량 잔류하는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N은 BOD저감조에서 모두 질산화가 이루어져 유출수의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 농도는 0.4 mg/L 이하의 농도로 안정된 유출수질을 나타내었다.

Fig. 10에 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N의 변화를 나타내었는데, 유입수 대부분의 질소는 질산화가 이루어진 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N의 형태로 유입되

었다. 유입수의 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도는 7~10 mg/L 정도였으며 황 탈질조를 거친 방류수에서는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N가 거의 나타나지 않았다. 반면 BOD저감조를 지난 최종 방류수에는 0.5~1.0 mg/L 정도의 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N가 검출되었는데, 이는 미량 잔류한 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N가 BOD저감조를 거치면서 질산화가 이루어졌음을 보여주는 것으로 BOD저감조의 활성상태도 양호한 것으로 판단된다.

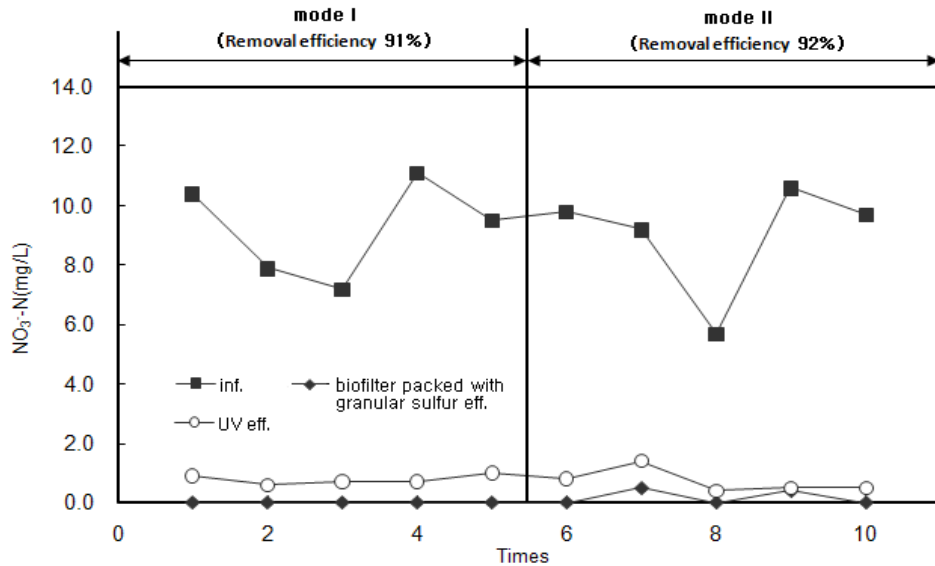


Fig. 10. Variations of NO<sub>3</sub>-N concentration in Biofilter Packed with Granular Sulfur

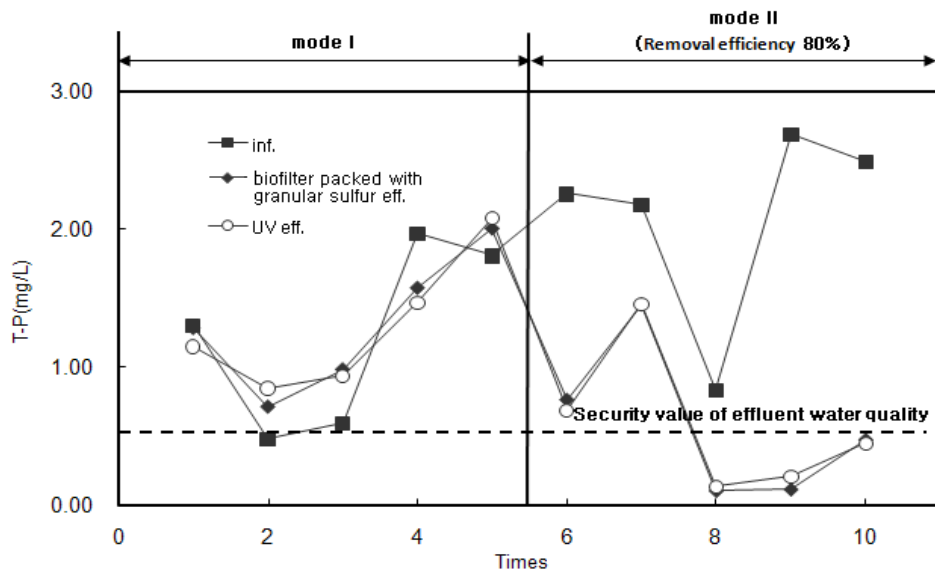


Fig. 11. Variations of T-P concentration in Biofilter Packed with Granular Sulfur

### 3.2.3 인

Fig. 11에 T-P의 농도 변화를 나타내었다. 입상황생물막 여과공법에서 인의 제거는 응집제를 투여하여 침전 제거하는 화학적인 원리를 이용하고 있다. 따라서 운전모드 I에서는 특별한 인의 제거가 이루어지지 않았다. 운전모드 II에서 유입수의 T-P 농도는 1~2 mg/L 정도였으며 응집제를 설계치 이하인 15 mg/L (17% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기준)를 투여한 두 차례의 분석결과에서는 유출수의 T-P 농도가 평균 1.0 mg/L로

수질보증치를 만족시키지 못하고 방류되었으나, 응집제를 설계치인 24 mg/L (17% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기준)를 투여한 후부터는 약 0.27 mg/L의 농도로 수질보증치인 0.5 mg/L이하를 충분히 만족시키며 최종방류 되었다.

### 3.3 탈질조 유입수 DO농도 영향검토

Fig. 2에 나타낸 Lab-Scale 반응기를 이용하여 탈질조 유입수 DO농도에 따른 탈질효율의 변화를 검토하였으며,



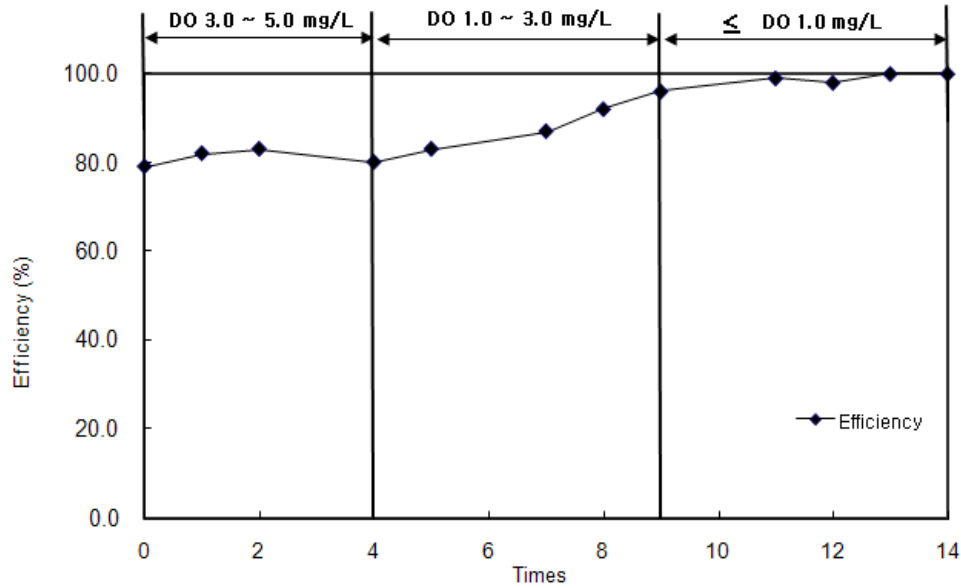


Fig. 12. Nitrogen removal rate of a influent DO concentration

Table 4. Consumption of granular sulfur

Date	point 1	point 2
Start	3,580 mm	3,500 mm
A week later	3,580 mm	3,500 mm
2 weeks later	3,585 mm	3,510 mm
3 weeks later	3,595 mm	3,520 mm
Consumption for 3 weeks	3,595 mm(△15)	3,520 mm(△20)
Average consumption for 3weeks	△17.5 mm	

※ Reactor upside slab is reference point of measurement heights(media roading height = 3.0m)

그 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 탈질효율은 유입수의 DO 농도가 가장 높은 A구간에서는 약 81%, 가장 낮은 C구간에서 거의 100%로 나타나 약 19%정도의 효율차이를 보였다. 이 결과로부터 탈질반응이 일어나는 데는 낮은 DO농도를 유지하는 것이 더 유리함을 확인할 수 있었다.

### 3.4 입상 황 소모율 및 유실율

황 탈질균은 탈질반응을 일으키기 위한 전자공여체로서 황을 이용한다. 이러한 이유로 탈질반응이 일어날수록 황의 소모 현상이 일어나게 되는데 적절한 운영비 산정이나 유지 관리 방안을 수립하기 위해서는 황 소모량과 유실량을 정확히 파악할 필요가 있다.

본 조사기간 동안에 탈질조의 두 지점에서 3주간 입상 황의 소모율 측정하였으며, 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

1주경과 후 소모율을 측정한 결과 가시적인 변화가 없었으나, 이후 탈질반응이 원활히 진행됨에 따라 소모율이 확인되었다. 입상 황의 소모율은 본 시설의 실시설계보고서 내용을 근거로 산출하였다.

#### ① 이론적 입상 황 소비량

$$= \text{일일유입유량} \times \text{제거된 질산성 질소농도} \times \text{단위질소 당 이론적 황소모량} \div 1000$$

$$= 45,000 \times 9.1 \times 2.51 \div 1,000 = 1,027.8 \text{ kg-S/일}$$

#### ② 단위여지 당 이론적 입상 황 소모량

$$= 1,027.8 \text{ kg-S/일} \times 21 \text{일} \div (1.25 \times 1000 \times 10 \text{지})$$

$$= 1.727 \text{ m}^3/21 \text{일-지 (입상황 겉보기 비중 = 1.25)}$$

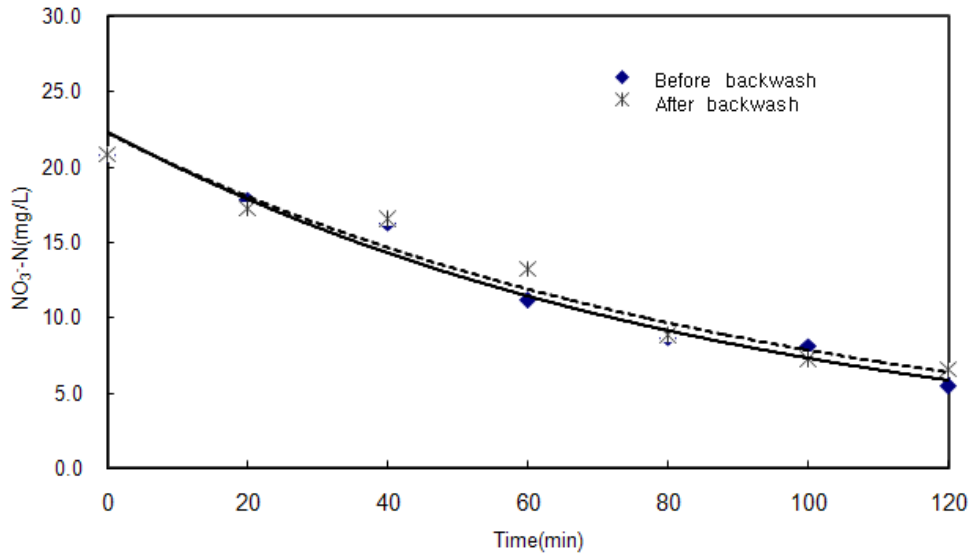


Fig. 13. Nitrogen removal using granular sulfur on before backwash and after backwash at Lab Scale Test (Variations of  $\text{NO}_3^-$ -N concentration)

③ ②항에 의한 이론적 여상감소분 계산

$$= 1.727 \div (8.4 \times 8.0) = 0.026 \text{ m}$$

(반응조 규격 =  $8.4\text{W} \times 8.0\text{L}$ )

$$= 26 \text{ mm}$$

④ 이론치와 측정치의 차

$$= \text{이론적 감소분} - \text{측정치 감소분}$$

$$= 26 \text{ mm} - 17.5 \text{ mm} = 8.5 \text{ mm}$$

⑤ 입상 황 소모량 비교

$$\text{이론 소모량} = 1,027.8 \text{ kg-S/일} \times 21 \text{ 일} \div 10 \text{ 지}$$

$$= 2,158.4 \text{ kg-S/21일지}$$

$$\text{실측 소모량} = 8.4 \times 8.0 \times 0.0175 \times 0.8$$

$$= 0.94 \text{ m}^3/21 \text{ 일지 (입상황의 충전비 80\% 반영)}$$

이론 소모량과 실측 소모량 비교를 위해 단위 환산 시

$$0.94 \text{ m}^3/21 \text{ 일지} \times 1.25 \times 1,000$$

$$= 1,176 \text{ kg-S/21일지}$$

따라서, 이론적 황의 소모량을 100%로 가정하였을 때 실제 소모량은 약 55%로 측정되었다. 단기간 측정으로 인한 오차를 감안하더라도 이론보다 더 많은 양의 황이 운전 중에 소모되지는 않을 것으로 사료된다.

### 3.5 미생물 유출

생물막여과지는 일정한 시간 동안 운전하면 여상 내 미생물이 증식하거나 부유물질이 포착됨으로 인해 여과저항이 발생하게 되고, 이를 해소시키기 위해 주기적인 역세척을 실시한다. 역세척을 실시하는 주된 이유는 과잉으로 증식된 미생물 및 포착된 부유물질을 배출하는 것이므로 역세척시 미생물이 유출되는 것은 당연한 현상이며, 이로 인해 여상의 탈질효율이 설계시 반영한 탈질속도에 비하여 저하되는 경우는 없을 것으로 판단된다.

역세 전후의 여과조에서 채취한 입상 황 여재를 사용하여 탈질성능을 실험한 결과 (Fig. 13)를 살펴보면 역세로 인한 탈질성능의 저하는 관찰할 수 없었다.

## 4. 결론

이상에서 수행한 “재이용시설 효율증대 방안 연구”에 대한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) BOD와 COD는 유기물의 지표를 나타내는 것으로서, BOD의 경우 운전모드 I 과 운전모드 II에 관계없이 BOD 저감조를 거치면서 1 mg/L 정도의 수준으로 방류되었다. COD의 경우 운전모드 I 에서는 약 20%가 제거되었고, 응집제를 투여한 운전모드 II 에서는 처리효율이 약 50%정도로 증가하여 수질보충치를 충분히 만족시키며 방류되었다.

- 2) 유입수의 T-N농도는 7~12 mg/L 정도로 유입되었으며, 최종유출수의 T-N농도는 운전모드 I 과 운전모드 II 에 관계없이 조사기간 동안 약 1.2 mg/L정도의 수준으로 수질보증치인 8 mg/L를 충분히 만족시킬 수 있었다.
- 3) 본 입상황생물막여과(Biofilter Packed with Granular Sulfur)공법에서의 T-P제거는 응집제를 이용한 화학적 처리로 이루어진다. 따라서 T-P는 응집제를 투여하지 않은 운전모드 I에서는 특별한 제거성능을 보이지 않았지만 운전모드 II에서 응집제를 설계치(Alum 24 mg/L, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 17%기준)로 투입한 이후부터는 수질보증치 0.5 mg/L 이하를 충분히 만족시킬 수 있었다.
- 4) 유입수의 DO농도에 따른 탈질조의 탈질효율 변화를 검토한 실험에서 유입수의 DO농도가 3~5 mg/L 정도로 가장 높게 유입이 된 경우 81%, DO농도가 1 mg/L 이하로 낮게 유입되는 경우 거의 100%의 탈질효율이 나타나 DO농도가 낮을수록 탈질에 유리한 것으로 나타났다.
- 5) 입상 황의 실제 측정 소모율은 이론적 소모량이 2,158.4 kg-S/21일지인데 반해 실제 소모량은 1,176 kg-S/21 일·지로 이론적 황의 소모량을 100%로 가정하였을 때 실제 소비량은 약 55% 수준으로 측정되었으며 단기간 측정으로 인한 오차를 감안하더라도 이론치보다 많이 소모되지는 않는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

- Batchelor, B. and Lawrence, A. W. (1989) Autotrophic Denitrification using Elemental Sulfur, *JWPCF*, **50**(8), 1986~2001.
- 변정섭, 범봉수, 조광명 (2000) 황을 이용한 독립영양탈질에서의 체류시간과 온도의 영향, *대한환경공학회지*, **22**(3), 405~415.
- 이동욱, 박재홍, 배재호 (2000) 황-이용 독립영양 탈질시 알칼리도 저감을 위한 종속영양 탈질의 이용방안, *대한환경공학회지*, **22**(11), 1995~2005.
- 추인준, 황용우, 김창균, 이시진 (2002) 황 충전 섬모상 담체를 이용한 질산화탈질 동시수행, *대한환경공학회지*, **24**(2), 185~194.
- Oh, S. E., Bum, M. S., Yoo, Y. B., Zubair, A. and Kim, I. S. (2002) Nitrate Removal by Simultaneous Sulfur utilizing Autotrophic and Heterotrophic Denitrification under Different Organics and Alkalinity Conditions: Batch Experiments, *Water Sci. Tech.*, **47**(1), 237~244.
- 이진우, 이한웅, 이수연, 권수열, 최의소, 박용근 (2003) 독립영양 탈질특성을 고려한 질소제거와 미생물의 분포특성비교, *대한환경공학회지*, **25**(11), 1352~1358.
- 이수원, 김규동, 최영균, 김동환, 정태학 (2004) 미생물 성장 특성에 기초한 독립영양탈질의 화학양론식 연구, *대한상하수도학회지*, **18**(2) 121~127.
- Claus, G. and Kutzner, H. J. (1985) Physiology and Kinetics of Autotrophic Denitrification by *Thiobacillus Denitrificans*, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **22**, 283~288.
- Justin, P. and Kelly, D. P. (1978) Metabolic changes in *Thiobacillus Denitrificans* accompanying the transition from aerobic to anaerobic growth in continuous chemostat culture, *J. Gen. Microbiol.*, **107**, 131~137.
- 환경부 (2004) 수질환경오염공정시험법, 환경부고시 제 2004-188호.
- APHA, AWWA and WEF (1998) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, *20<sup>th</sup> edition*, Washington DC, USA.
- 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*, Sendai Japan, 299~306.
- Koenig, A. and Liu, L. H. (2001) Kinetic Model of Autotrophic Denitrification in Sulfur Packed-Bed Reactor, *Water Res.*, **35**(8), 1969~1978.
- Discroll, T. C. and Bisogni, J. J. (1978) The Use of Sulfur and Sulfide in Packed Bed Reactors for Autotrophic Denitrification, *J. WPCF.*, March, 569~577.
- Zhang, T. C. and Shan, J. (1999) In situ septic tank effluent denitrification using a sulfur/limestone process, *Wat Env. Res.*, **71**, 1283~1291.
- 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**, 329