

부직포 및 황 충전 MBR을 이용한 포기조내 동시 질산화/탈질에 관한 연구

Simultaneous Nitrification and Denitrification using Submerged MBR packed with Granular Sulfur and Non-woven Fabric

문진영 · 황용우* · 박지형

Jin-Young Moon · Yong-Woo Hwang* · Ji-Hyoung Park

인하대학교 사회기반시스템공학부

(2009년 1월14일 접수 ; 2009년7월10일 1차수정 ; 2009년8월12일 채택)

Abstract

This study was performed to evaluate SND(simultaneous nitrification and denitrification)efficiency, nitrogen removal efficiency and filtration function of non-woven fabric by using submerging MBR packed with granular sulfur covered with non-woven fabric filter. Synthetic wastewater was used as influent wastewater. Concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in influent was maintained about 40 mg/L and the experiment was performed in four phases according to the flow rate. Nitrogen loading rate divided four phases ranging from 0.04 kg $\text{NH}_4^+\text{-N/m}^3\text{-day}$ to 0.16 kg $\text{NH}_4^+\text{-N/m}^3\text{-day}$. As a result, the maximum $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal rate was accomplished at 0.142 kg $\text{NH}_4^+\text{-N/m}^3\text{-day}$ in nitrogen loading of 0.147 kg $\text{NH}_4^+\text{-N/m}^3\text{-day}$. Nitrification efficiency was higher than 95% in all phases. $\text{NO}_3^-\text{-N}$ loading rate was adjusted ranging from 0.22 kg $\text{NO}_3^-\text{-N/m}^3\text{-day}$ to 0.89 kg $\text{NO}_3^-\text{-N/m}^3\text{-day}$. The maximum $\text{NO}_3^-\text{-N}$ removal rate was accomplished up to 0.71 kg $\text{NO}_3^-\text{-N/m}^3\text{-day}$ in $\text{NO}_3^-\text{-N}$ loading of 0.89 kg $\text{NO}_3^-\text{-N/m}^3\text{-day}$. The maximum $\text{NO}_3^-\text{-N}$ removal efficiency was 95% in $\text{NO}_3^-\text{-N}$ loading of 0.22 kg $\text{NO}_3^-\text{-N/m}^3\text{-day}$. T-N removal rate was 90% and concentration of T-N in effluent was 3.7 mg/L in T-N loading rate of 0.039 kg $\text{N/m}^3\text{-day}$. In this study, TMP in reactor with and without non-woven fabric filter were observed to define fouling of hollow-fiber membrane module. Reaching time to standard washing pressure(22 cm Hg) of two reactors were 29 days with non-woven fabric But the reactor without non-woven fabric reached standard washing pressure only after 4 days. Accordingly, non-woven fabric was demonstrated the superiority as a filtration ability. With high nitrogen removal rate and decreasing of fouling of membrane, MBR packed with granular sulfur covered with non-woven fabric filter submerging in activated sludge aeration tank can be used as an advanced treatment process.

Key words : denitrification, Non-woven Fabric, MBR

주제어 : 탈질, 부직포, MBR

1. 서론

우리나라의 생물학적 고도처리 공법은 활성슬러지법을

변형한 종속영양균에 의한 탈질공법이 주로 이용되고 있다. 그러나 우리나라의 하수는 C/N비가 매우 낮은 특성을 지니고 있어, 활성슬러지를 이용한 종속영양탈질 수행 시 일반적

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

으로 외부 탄소원을 주입하고 있다. 또한 탄소원이 충분한 경우에도 제거효율 향상을 위해 후탈질 및 반송비 증가를 고려해야 하는 등의 문제점이 있다. 따라서 유기물이 부족하·폐수의 질소 제거를 위한 대안으로 황을 전자공여체로 이용하여 외부 탄소원의 투입이 필요 없는 독립영양탈질공법을 고려할 수 있다.

황이용 독립영양 탈질에 미치는 주요 영향인자로는 pH, DO 및 저해물질 등이 있다. 황이용 탈질시 최대 효율을 얻기 위한 최적의 pH는 Claus와 Kutzner(1985)의 실험에서 7.5~8.0으로 나타났다. 또한, Justin과 Kelly(1978)는 DO 농도가 12 $\mu\text{mol/L}$ 일때 T. denitrificans의 증식계수(Y)가 최대라고 보고하였다. 그 외 황이용 탈질의 저해 물질 중 질산화 반응물인 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 은 10 g/L, 최종생성물인 SO_4^{2-} 는 5 g/L 그리고 중간생성물인 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 은 0.2 g/L의 저농도에서도 강한 억제 효과가 나타난다고 보고되었다(Claus와 Kutzner : 1985).

기존의 황을 전자공여체로 이용한 백(2004)의 연구에서는, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 의 농도가 높고 TKN이 검출되지 않은 도금폐수를 황충진상 내부로 유입시켜 질소제거 효율, 즉 질산화 과정을 포함하지 않은 탈질성능만을 관찰하였다. 따라서 본 연구에서는 외부탄소원이 필요 없는 황-이용 독립영양 탈질과 황성슬러지 공정을 조합한 황충진 MBR(Membrane BioReactor), 즉 황이 충전된 모듈을 표준황성슬러지법의 포기조내 침지시킴으로써 포기조 내에서의 동시 질산화탈질(simultaneous nitrification and denitrification) 성능을 관찰하였다. 황 충전 모듈은 탈질조의 역할로 이용되었고, membrane은 침전조의 기능을 대신할 수 있는 역할로서 이용되었다. 동시 질산화탈질공정은 전통적인 하폐수 처리 공정이 호기 조건과 무산소 조건으로 구분한 것과 달리, 단일 반응조 내에서 질산화 및 탈질반응을 동시에 진행하는 방법이다. 이 때 중요인자로 DO농도가 1 mg/L이하로 충분히 낮으면 탈질은 물론 질산화 및 BOD 산화와 같은 호기성 반응도 동시에 일어날 수 있다(Rittman 과 McCarty, 2002). 동시 질산화탈질 공정은 전통적인 생물학적 공정과 비교하였을 경우 반응기의 부피 감소, 에너지 절약 등의 장점을(Choo 등, 2007) 가지고 있어, 운영 중인 기존의 표준 황성슬러지 공정을 고도처리 공정으로 전환 시 실제 처리장에 적용되기도 한다.

또한 본 연구에서 황 충전 MBR을 운전한 결과, 4일 만에 포기조의 황성슬러지에 의한 중공사막의 막힘현상(fouling)이 발생하여, 이를 방지하고자 황충진 MBR 외부에 부직포를 추가한 형태로 반응기를 개조하여 실험을 진행하였다. 부직포는 일반 membrane에 비해 경제적이며, 막힘현상이 적다는 장점을 가지고 있다. 이에 부직포를 설치하지

않은 황 충전 MBR과 부직포를 추가한 황 충전 MBR의 중공사막 막간차압(Trans-Membrane Pressure, TMP)의 변화를 비교·관찰하였다.

2. 실험재료 및 방법

본 연구에 사용된 실험장치의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치는 포기조 내 황 충전 MBR을 침지시킴으로써 중앙부분의 중공사막으로 처리수를 유출시키는 과정을 통해 질소제거 및 유기물 제거가 가능하도록 하였다. 황성슬러지 및 SS 등의 유입으로 인한 생물막 폐색을 방지하고, 중공사막의 파울링(fouling)을 감소시키기 위해 부직포를 외부의 원통형 황충진 모듈 외부에 추가하여 여과기능을 수행하도록 하였다.

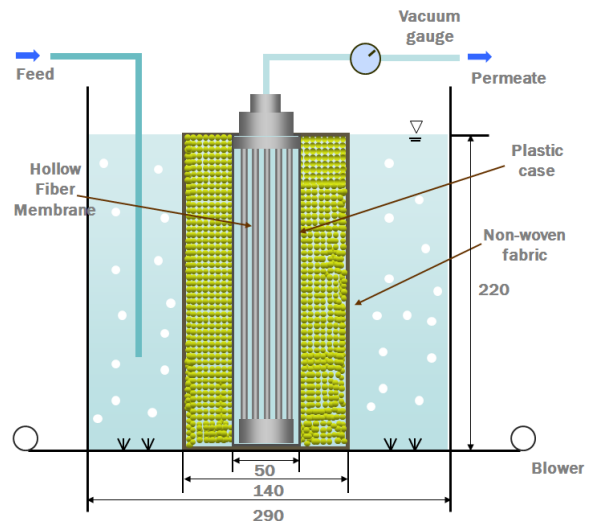


Fig. 1. Experimental apparatus of submerged MBR packed with granular sulfur and non-woven fabric

실험에 사용된 반응기는 가로, 세로 및 높이가 각각 29.0 cm인 정방형 반응기를 사용하였으며, 유효수심은 22.0 cm, 유효용량이 18.5 cm^3 이었다. 원통형 황 탈질 모듈은 플라스틱 케이싱으로 형태를 만들었으며, 내·외 직경은 각각 5, 14 cm로 하였다. 두 개의 원통 사이 부분에 입상 황을 전체 반응조 부피의 약 16%가 되도록 충전시켜, 황이용 독립영양 탈질이 이루어지도록 하였다. 입상황은 기존의 연구(Koenig과 Liu, 1997; Koenig과 Liu, 2001)에서 탈질효율이 입증된 3~5 mm 정도의 크기를 사용하였다. 원통형 황 탈질 모듈 외부에 설치한 부직포는 PET(polyester)와 PP(polypropylene)의 비가 약 65:35로 제작되었으며, 두께 6 mm, 단위중량은 1.06 kg/m^2 이며, 섬유가닥이 불규칙

하게 배열된 구조를 가지고 있다. 본 연구의 membrane 운전 방식으로는 흡입식을 사용하였으며, 실험기간동안 각 phase마다 일정한 유량을 유지하는 정유량 운전제어방식으로 운전하였다. 운전시간이 경과함에 따른 TMP를 관찰하기 위하여 펌프와 막 모듈 중간에 압력계를 설치하였다. 증공사막 모듈은 재질이 PE(polyethylene), 막 면적은 0.2 m², 평균 Pore size는 0.4 μm인 수직형 모듈을 사용하였다. 또한 일정한 환경에서 실험을 진행하고자 20℃의 항온실에서 실험으로 진행하였으며, 동시 질산화 탈질 시에 질소제거를 위한 최적의 DO농도를 제시한 기존연구(문, 2004)를 바탕으로 반응조 내 DO농도를 1.0~2.0 mg/L로 유지하였다. 초기 운전 시 미생물의 식중은 기존에 운전되고 있던 황이용 탈질 반응기로부터 공급받아 사용하였으며, 약 열흘간 NO₃⁻-N 등의 영양분을 공급하며 추가적인 미생물 성장과 동시에 안정화 기간을 두었다.

Table 1. Composition of the Wastewater.

| Item | Influent |
|-------------------|----------------------|
| | Synthetic wastewater |
| Temperature(℃) | 20~21 |
| pH | 7.7~8.5 |
| SS (mg/L) | < 5 |
| Alkalinity (mg/L) | 470~500 |
| BOD5 (mg/L) | 80~90 |

Table 2. Summary of Experimental Conditions.

| | Phase | | | |
|---|-------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Influent flow rate(L/d) | 18.5 | 37 | 55.5 | 74 |
| HRT(hr) | 24 | 12 | 8 | 6 |
| Loading Rate (kg N/m ³ -day) | 0.04 | 0.08 | 0.12 | 0.16 |

Table 3. Analytical Methods

| Item | Analytical Method | Item | Analytical Method |
|------------------|--------------------------------------|---------------------------------|--|
| pH | pH meter(ORION 720A) | COD _{cr} | Dichromate Reflux Method of Standard Methods |
| DO | DO meter(YSI Model 58) | TKN | Macro Kjeldahl Method of Standard Methods |
| SS | 수질오염 공정시험법 | NH ₄ ⁺ -N | IC (Ion Chromatography) |
| Alkalinity | Titration method of Standard Methods | NO ₃ ⁻ -N | |
| | | NO ₂ ⁻ -N | |
| BOD ₅ | 5-day BOD Test of Standard Methods | SO ₄ ²⁻ | |

2.1 실험방법

2.2.1 유입수

본 연구에서는 유입수로서 부하를 증가시키며 인공하수를 사용하였으며, 하수의 성상은 Table 1에 나타내었다.

질소부하 변동에 따른 처리효율을 알아보기 위해 인공하수의 부하를 증가시키면서 실험을 진행하였다. 유입수의 NH₄⁺-N의 농도는 일정하게 유지하고, 유량은 각 phase 별로 18.5, 37, 55 L/d 및 74 L/d 로 증가시키며 유입하여 단계 별 부하가 증가도록 하였으며, 이에 대한 내용은 Table 2에 정리하였다.

기타 미생물 성장에 필요한 미량의 영양물질을 적량 주입하였다. 알칼리도 공급은 주입되는 질소가 100% 제거 된다고 가정하여 질산화에 소모되는 알칼리도를 7.14 g CaCO₃/g NH₄⁺-N 및 황을 이용한 독립영양탈질시 필요한 알칼리도를 4.57 g CaCO₃/g NO₃⁻-N로 산정하여 약 480 mg CaCO₃/L의 알칼리도를 중탄산나트륨(NaHCO₃)을 사용하여 공급해 주었다.

2.2.2 분석방법

본 연구에서 반응조의 유입수 및 유출수 분석은 Standard Methods(APHA 등, 1998)와 수질오염 공정시험법(환경부, 2004)에 준하여 실시하였다. 각각의 실험 항목을 Table 3에 정리하여 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

본 실험은 황 탈질 모듈을 포기조에 침지시킨 Lab-scale 반응조에서 실시하였으며, 포기조 내의 pH는 7.3~7.7 정도를 나타내었다. 본 연구는 표준활성슬러지 공법에 황충진 모듈을 설치함으로써 활성슬러지공법의 간단한 개조만으로 동시 질산화탈질을 수행하는데 목적이 있으므로, 그 중 하나의 조건으로 포기조 MLSS(Mixed Liquor Suspended Solids)농도와 슬러지를 seeding한 하수처리장 포기조의 MLSS농도를 동일하게 유지하도록 하였다. 따라서, 포기조의 초기 MLSS농도는 약 2,500 mg/L 였으며, 약 74일의 운전기간 동안 MLSS농도를 약 2,500~3,000 mg/L로 유지하였다.

3.1 질소제거 성능

Table 4에 phase 별 평균 암모니아성 질소(NH_4^+-N)의 농도와 NH_4^+-N 의 제거에 대한 결과를 정리하여 나타내었다. 유입수의 NH_4^+-N 의 농도는 30~40 mg/L정도로 일정하게 유지하였으며, 유출수는 모든 phase에서 평균 2 mg/L 이하의 농도를 유지하였다. 질산화율은 유입 NH_4^+-N 와 유출 NH_4^+-N 의 농도로부터 계산하였으며, NH_4^+-N 의 질산화율은 모든 Phase에서 약 95% 이상의 높은 효율을 나타냈다. 이는 부직포 표면에 활성슬러지가 부착하게 됨으로써 미생물이 포기조 내에 머무는 시간이 길어지게 될 것으로 예상되며, 따라서 비교적 긴 SRT가 요구되는 독립영양균인 질산화균이 고농도로 부착되어 질산화균 증식에 유리한 환경이 조성되었기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 2에 운전기간 동안 탈질조로 유입되는 질산성 질소(NO_3^--N)의 유입부하와 제거속도를 나타내었다. 원통형 황탈질 모듈에 충전된 황입자는 전체 반응조 부피의 약 16%(2.95 L)이었다. NO_3^--N 의 유입부하는 질산화된 NH_4^+-N 이 모두 황탈질 모듈로 유입된다고 가정 하에 계산

하였다. 그 결과 phase 1에서 0.22 kg $\text{NO}_3^--\text{N}/\text{m}^3\text{-day}$ 의 유입부하가 계산되었으며, 제거속도는 약 0.21 kg $\text{NO}_3^--\text{N}/\text{m}^3\text{-day}$ 로 나타났으며, 최고 탈질속도는 유입부하가 0.89 kg $\text{NO}_3^--\text{N}/\text{m}^3\text{-day}$ 인 phase 4에서 약 0.71 kg $\text{NO}_3^--\text{N}/\text{m}^3\text{-day}$ 의 제거속도를 얻을 수 있었다. 수리학적 부하가 증가함에 따라 점차 질소제거효율은 저하되었다. 그 결과 phase 1, 2, 3 및 4에서 각각 95%, 87%, 86% 및 80%의 질소제거효율을 나타내었다. 각 phase 별 NO_3^--N 의 황탈질 모듈과 전체 반응조의 유입부하 및 제거효율을 정리하여 Table 5에 나타내었다.

Fig. 3에 운전기간 74일 동안의 유입·유출수의 T-N농도를 나타내었다. 운전조건이 변하는 각 Phase의 초기에는 순간적인 충격부하에 의해 유출수의 T-N 농도가 10.0 mg/L이상으로 측정되었으나, 안정화가 진행됨에 따라 10.0 mg/L이하의 농도를 나타내었다. 각 phase별 유출수의 평균 T-N농도는 각각 3.7 mg/L, 6.0 mg/L, 6.7 mg/L 및 9.0 mg/L로 측정되었으며, 이는 2012년부터 강화되는 방류수 수질기준 T-N 20.0 mg/L보다 낮은 수치로서 황 탈질 모듈

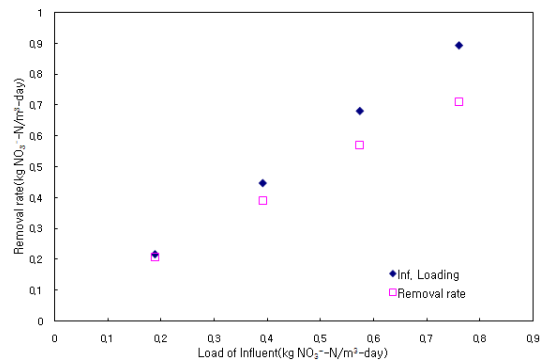


Fig. 2. Relationships between NO_3^--N loading rate and removal rate.

Table 4. Result of NH_4^+-N Removal

| | | Phase 1 | Phase 2 | Phase 3 | Phase 4 |
|----------------|--|---------|---------|---------|---------|
| Flow rate(L/d) | | 18.5 | 37 | 55 | 74 |
| Inf.(Avg.) | Conc.(mg/L) | 36.8 | 37.5 | 37.0 | 36.8 |
| | Load(kg $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{m}^3\text{-day}$) | 0.036 | 0.073 | 0.110 | 0.147 |
| Eff.(Avg.) | Conc.(mg/L) | 1.9 | 1.5 | 1.7 | 1.4 |
| | rate(kg $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{m}^3\text{-day}$) | 0.035 | 0.070 | 0.106 | 0.142 |
| Removal(Avg.) | Efficiency(%) | 94.9 | 96.0 | 95.4 | 96.4 |

Table 5. Result of NO₃⁻-N Removal.

| | | Phase 1 | Phase 2 | Phase 3 | Phase 4 |
|-------------------|--|---------|---------|---------|---------|
| Flow rate(L/d) | | 18.5 | 37 | 55 | 74 |
| Inf.(Avg.) | Load(Cylinder parked with granular sulfur) (kg NO ₃ ⁻ -N/m ³ -day) | 0.22 | 0.45 | 0.68 | 0.89 |
| | Load(Whole reactor) (kg NO ₃ ⁻ -N/m ³ -day) | 0.04 | 0.07 | 0.11 | 0.14 |
| Eff.(Avg.) | Conc.(mg/L) | 1.7 | 4.6 | 5.0 | 7.2 |
| Removal (Avg.) | Rate(Cylinder parked with granular sulfur) (kg NO ₃ ⁻ -N/m ³ -day) | 0.21 | 0.39 | 0.57 | 0.71 |
| | Efficiency(%) | 95.1 | 87.1 | 85.9 | 79.5 |
| | Rate(Whole reactor) (kg NO ₃ ⁻ -N/m ³ -day) | 0.03 | 0.06 | 0.09 | 0.11 |

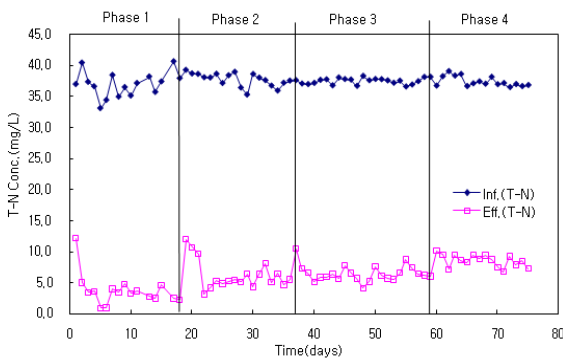


Fig. 3. Variation of T-N concentration

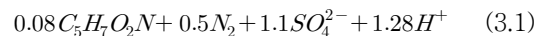
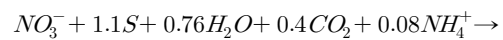
에 의한 우수한 질소 제거 효과를 확인할 수 있었다. T-N의 제거 효율은 phase 1에서 89.9%를 나타내었으며 부하가 증가함에 따라 phase 2, 3, 4에서는 각각 84.1%, 82%, 76%로 효율이 점차 감소하였다.

3.2 알칼리도 및 황산이온

유입수의 알칼리도는 화학 양론식을 통해 질산화에 소모되는 알칼리도 7.14 g CaCO₃/g NH₄⁺-N(Villaverd 등, 1997), 탈질에 소모되는 알칼리도 4.57 g CaCO₃/g NO₃⁻-N(Discroll과 Bisogni, 1978)을 동시에 고려(Park 등, 2002) 이론적인 알칼리도 소모량을 계산하여 유입수에 약 480 mg CaCO₃/L의 농도로 첨가하였으며, 이때 알칼리 원으로는 중탄산나트륨(순도: 99%)을 사용하였다. 유출수의 평균 알칼리도 농도는 phase 별로 각각 34.4 mg CaCO₃/L, 33.9 mg CaCO₃/L, 47.4 mg CaCO₃/L 및 71.25 mg CaCO₃/L로 측정되었는데, 이는 phase 별로 수리학적

부하가 점차 증가하면서 탈질 효율이 점차 감소되었고, 이에 따라 알칼리도의 소모도 점차 감소한 것으로 판단된다. 전체적으로 실험기간 중 실제 알칼리도의 소모량이 이론적인 알칼리도 소모량에 비해 높게 나타났다. 질소 1 g당 실제 소비되었던 알칼리도는 각각의 phase에서 12.6 g CaCO₃/g N, 14.2 g CaCO₃/g N, 14.2 g CaCO₃/g N 및 14.6 g CaCO₃/g N로 계산되었으며, 이 값들은 이론적인 총 알칼리도 소모량은 11.71 g CaCO₃/g N보다 높은 것으로 관찰되었다.

황 탈질에서는 양론식에 따라 제거된 NO₃⁻-N에 비례하여 황산이온이 생성된다. Batchelor과 Lawrence(1978)에 의해 제시된 양론식을 통해 계산된 황산이온 생성비는 7.54 g SO₄²⁻/g NO₃⁻-N이다.



실험기간 동안의 황산이온(SO₄²⁻)의 생성과 양론식을 통한 계산값을 Fig. 4에 나타내었다. 모든 phase에서 실제 측정된 SO₄²⁻의 농도가 375.8 mg/L로 양론식을 통한 이론적인 계산값인 233.4 mg/L 보다 상대적으로 높게 나타났다. 이와 같은 원인은 호기성 조건인 폭기조에 존재하는 비탈질균의 일종인 T. thooxidans(Lampe 와 Zhang, 1999) 등의 황을 이용하는 미생물의 존재에 기인한 것으로 사료되며, 이와 같은 현상은 알칼리도 소비에도 영향을 미쳤으며, 본 실험에서 이론값에 비하여 많은 양의 알칼리도가 소모된 것을 확인할 수 있었다.

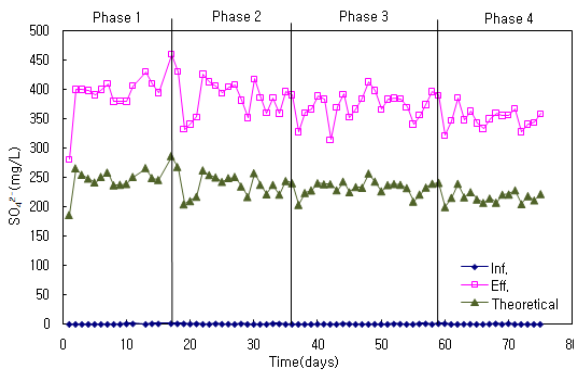


Fig. 4. Variation of sulfate at the reactor and theoretical sulfate production

3.3 유기물 제거

실험기간 동안의 유입수와 유출수의 SCODcr 농도는 모든 phase에서 유입수의 SCODcr 농도는 약 95 mg/L 정도로 비교적 일정하게 유지하였으며, 이때 각 phase 1, 2, 3 및 4에서의 유출수 SCODcr 농도는 각각 1.4 mg/L, 3.5 mg/L, 2.4 mg/L, 3.5 mg/L로 나타나 모든 phase에서 96% 이상의 제거효율을 나타냈으며, 최대제거효율은 phase 1에서 약 99%로 나타났다.

3.4 Membrane 압력 변화와 세정

Fig. 5에 실험기간동안 변화한 압력을 나타내었다. 막 세정은 압력이 22 cm Hg에 도달하였을 경우 실시하였다. 이는 22 cm Hg 이상의 압력에 도달하였을 경우, 유출수 유량의 감소가 나타났기 때문이었다. 본 연구에서 막 세정을 수세정과 화학세정을 병행하였으며, 수세정, 화학세정의 순서로 시행하였다. 백(2004)의 연구에서는 화학세정만을 진행하였는데, 이는 도금폐수에 대한 탈질효율만을 연구한 실험이었으므로 활성슬러지에 의한 저해현상은 나타나지 않았다. 본 실험에서는 황충진 모듈로 활성슬러지가 유입되어 membrane 표면에 부착하는 현상이 발생하였는데, 이를 해결하기 위한 방안으로 수세정을 추가하였다.

세정방법은 수세정의 경우 중공사막을 분리하여 포기용 산기관에 의해 폭기가 되고 있는 수돗물 수조에 6시간 동안 침지시킴으로써, 공기방울에 의한 진동으로 막 표면의 오염을 제거하였으며, 화학 세정액은 1M 염산에 약 6 시간 동안 침지시키는 방법을 사용하였다.

실험 결과, 최초 운전에서부터 압력이 22 cm Hg 까지 도달하는데 29일이 경과하였으나, 최초 세정 후에는 그 기간이 25일, 16일로 그 주기가 점차 짧아지는 추세를 나타냈다. 이는 실험이 진행됨에 따라서, 유량이 증가하게 되며,

이에 따라서 flux가 상승하여 활성슬러지 혼합액 및 부유물질이 막 표면으로의 이송(convection)이 증가하며, 이로 인해 막 표면에 오염물질의 층의 퇴적이 증가하였기 때문인 것으로 사료된다.

황탈질 모듈 외부에 추가한 부직포가 중공사막 파울링에 미치는 영향을 파악하고자, 황탈질 반응조의 부직포를 제거한 후, 앞선 실험과 동일한 조건에서 실험을 시행하였다. Fig. 6에서 부직포를 제거한 반응조의 압력변화를 나타내었다. 실험결과 최초 운전일 부터 약 48시간 동안은 압력변화는 완만한 증가추세를 보이며 약 10 cm Hg의 압력을 나타냈으나, 약 48시간 이후부터 압력이 급격하게 증가하여 약 32시간 만에 10 cm Hg에서 세척 기준압력인 22 cm Hg에 도달하였다.

부직포를 추가하지 않은 반응기와 추가한 반응기를 각각 4일간 운전한 후, 황 충전조와 중공사막의 모습을 Fig. 7

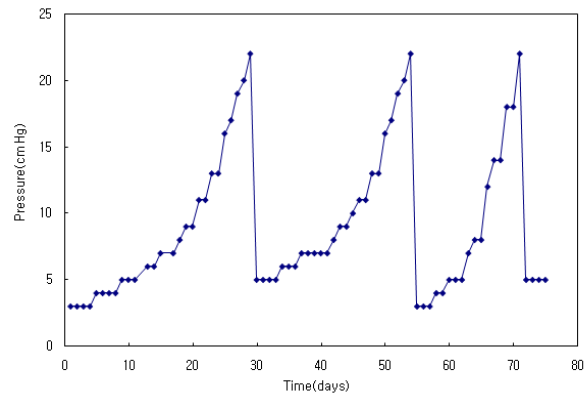


Fig. 5. Variation on pressure during operation time of MBR with non-woven fabric filter

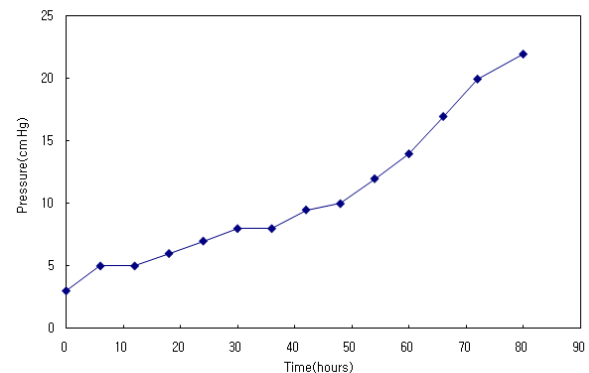


Fig. 6. Variation on pressure during operation time of MBR without non-woven fabric filter

및 Fig. 8에 나타내었다. 부직포를 추가하지 않은 반응기에서는 활성슬러지에 의해 황 충전조와 중공사막 모듈에 활성슬러지에 의한 케이크 층이 형성된 모습을 볼 수 있으나, 부직포를 추가한 반응기의 황 충전조와 중공사막은 활성슬러지에 의한 오염이 진행되지 않은 모습을 확인할 수 있었다. 이는 황 충전조 외부에 추가한 부직포의 여과기능에 의해 활성슬러지, 유기물 및 황입자에 의한 중공사막 및 황 충전조의 오염이 감소되었기 때문으로 사료된다.



Fig. 7. MBR without non-woven fabric after 4 days of operation

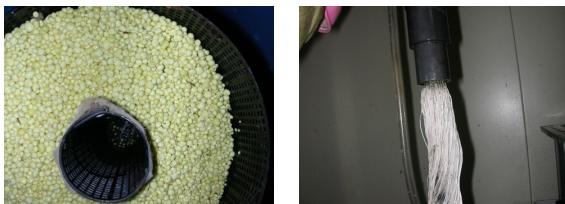


Fig. 8. MBR with non-woven fabric after 4 days of operation

4. 결 론

본 연구에서는 포기조 내 부직포를 추가한 황 충전 MBR을 침지시켜, 동시 질산화 및 탈질이 가능하도록 하였다. 또한 최종적으로 탈질된 처리수를 중앙부분의 중공사막으로 유출시키는 과정을 통해 질소 제거 및 유기물 제거가 가능하도록 하였으며, 본 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

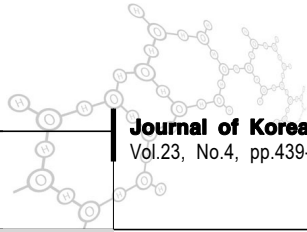
1) 본 실험에서 암모니아성 질소의 유입부하를 0.036 kg NH₄⁺-N/m³-day부터 0.147 kg NH₄⁺-N/m³-day까지 단계별로 부하를 증가시키면서 실험을 진행하였으며, 이에 따른 유출수의 NH₄⁺-N의 최대 제거속도는 0.142 kg NH₄⁺-N/m³-day(phase 4)이었으며, 모든 phase에서 약 95% 이상의 높은 질산화율을 보였다. 또한 본 실험을 통해 최대 탈질 속도는 유입부하 0.89 kg NO₃⁻-N/m³-day(phase 4)에서 0.71 kg NO₃⁻-N/m³-day로 나타났다.

2) 본 실험을 통해 각 phase 별 유출수의 평균 T-N농도는 각각 3.7 mg/L, 6.0 mg/L, 6.7 mg/L 및 9.0 mg/L로 측정되어 황 탈질 모듈에 의한 우수한 질소제거효과를 확인할 수 있었다.

3) 본 실험 결과, 부직포를 추가한 황 충전 MBR의 경우, 약 29일 만에 처음으로 세정 기준 압력인 22 cm Hg에 도달하였으나, 부직포를 추가하지 않은 황 충전 MBR에서는 약 4일 만에 세정 기준 압력에 도달하였다. 이 결과로부터 부직포의 여과기능에 대한 우수성을 확인할 수 있었으며, 이로 인한 중공사막의 막오염 저감은 물론 생물막 오염의 저감으로 유출수의 수질 향상 등을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Claus, G. and Kutzner, H. J.(1985), "Physiology and kinetics of autotrophic denitrification by *Thiobacillus denitrificans*", *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **22**, pp. 283-288.
2. 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**, pp. 131-137.
3. 백진옥(2004). "황 충전 MBR을 이용한 포기조내 질소 제거", 인하대학교 석사학위논문.
4. Rittman, B. E., and McCarty, P. L.(2002), "Environmental Biotechnology : Principal and Applications", McGraw-Hill, pp. 508-511.
5. Chiu, Y.-C., Lee, L.-L., Chang, C.-N., and Chao, A.C.(2007), "Control of carbon and ammonium ratio for simultaneous nitrification and denitrification in a sequencing batch bioreactor," *International Biodeterioration & Biodegradation*, **59**, pp. 1-7.
6. 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.
7. Koenig, A. and Liu, L. H.(2001), "Kinetic model of autotrophic denitrification in sulfur packed-bed reactor", *Wat. Res.*, **35**(8), pp. 1969-1978.
8. 문진영(2004), "DO농도 조절에 따른 황 충전 섬모상 반응기의 질소제거 성능 변화", 인하대학교 석사학위논문.
9. APHA(1992), Standard methods for the examination of water and wastewater, 17th Ed. Washington DC.



10. 환경부(2004), 수질오염공정시험방법.
11. Villaverds S, Encina PAG, Polanco F.F.(1997), "Influence of PH over Nitrifying Biofilm Activity in Submerged Biofilters", *Wat. Res.*, **35**(8), pp. 1969-1978
12. Discroll, T.C., Bisogni, J.J.(1978), "The Use of Sulfur and Sulfide in Packed Bed Reactors for Autotrophic Denitrification", *J. WPCF*, March, pp.569-577
13. Park, J. H., Shin, H. S., Lee, I. S., Bae, J. H.(2002), "Denitrification of High NO_3^- -N Containing Wastewater Using Elemental Sulfur; Nitrogen Loading Rate and N_2O Production", *Environmental Tech.*, **23**(1), pp. 53-65
14. Batchelor. B. and Lawrence, A. W.(1978), "A kinetic model for autotrophic denitrification using elemental sulfur", *Wat. Res.*, **12**, pp. 1075-1084.
15. Lampe, D. G. and Zhang, T. C.(1999), "Sulfur limestone autotrophic denitrification processes for treatment of nitrate-contaminated water: batch experiments", *Wat. Res.*, **33**(3), pp. 599-608.