

## 다공성 담체를 이용한 생물막 반응조의 질소화합물 분해에 관한 연구

조혜미 · 김소연 · 윤지현 · 한기봉<sup>†</sup>

가톨릭대학교 생명·환경공학부 청정환경연구소

## A Study on Degradation of Nitrogen Compounds by Biofilm Reactor Packed with Porous Media

Hae-Mi Cho · So-Yeon Kim · Ji-Hyun Yoon · Gee-Bong Han<sup>†</sup>

Department of biotechnology Environmental engineering,  
Clean Environmental Research Institute, The Catholic university of Korea  
(Received 23 August 2007, Accepted 27 September 2007)

### Abstract

A biofilm reactor packed with porous media was investigated for nitrogen removal of synthetic wastewater. The effect of different loading rates on the nitrification was sustained to be steady state with stable efficiency of 50~60% in the range of 0.0083~0.017 gNH<sub>4</sub>-N/gMLVSS · day of F/MN ratio and 1~2 kgNH<sub>4</sub>-N/m<sup>3</sup> · day of media volumetric loading rate. However, nitrification efficiency was rapidly decreased to 25~30% as F/MN ratio and media volumetric loading rate were increased to the range of 0.025~0.034 gNH<sub>4</sub>-N/gMLVSS · day and 3~4 kgNH<sub>4</sub>-N/m<sup>3</sup> · day, respectively. Also the consumption rate of alkalinity was higher under 8 hours of HRT than under 6 hours of HRT. Accordingly the influent loading rate variation by detention time with influent flow influenced more on the nitrification efficiency than the influent loading rate variation by the influent concentration did. The temperature effect on the nitrification showed 25% higher in summer than in winter as the results reported by other researchers who reported that the nitrification efficiency in biofilm showed 20% increase from 55% to 75% when the temperature was raised from 20°C to 25°C. Denitrification with sulfur-media showed 90% removal efficiency under steady-state with no effect from the increase of influent concentration and empty bed contact time (EBCT) change such as EBCT was decreased from 8.4 hr to 4.3 hr and NO<sub>3</sub>-N loading rate was changed within the range of 0.1~0.4 kgNO<sub>3</sub>-N/m<sup>3</sup> · day. Accordingly Denitrification with sulfur-media is feasible for post denitrification at the concentration less than 80 mgNO<sub>3</sub>-N/L.

**keywords** : Denitrification, Loading rate, Nitrification, Porous-media, Sulfur-media

### 1. 서론

최근 수계 생태계 내에서 증가하고 있는 부영양화로 인한 피해를 최소화하기 위하여 영양염류에 대한 배출허용기준이 강화되는 추세에 있다(국립환경연구원, 2002). 이러한 규제강화에 대처하기 위하여 다수의 수질오염방지시설에는 처리수의 수질을 보다 향상시킬 수 있는 방안으로 생물막을 이용한 수처리공정이 많이 적용되고 있다(김 등, 2002; 황 등, 2007).

특히 질소제거를 목적으로 하는 경우 생물막 공정 중에도 담체를 이용한 공정에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 왜냐하면 질산화 균의 성장속도는 다른 유기물을 산화하는 종속영양균에 비하여 상당히 낮기 때문에 다공성 담체에 형성된 기공에 부착되어 증식하는 생물막을 이용할 경우 증식속도가 느린 미생물도 외부로 유출되지 않고 증

식할 수 있어 처리효율 면에서 부유식 방법보다 높기 때문이다(김 등, 1997, 2002; 이 등, 2002a).

즉 생물막 공정에서 미생물은 담체에 부착되어 외부로 유출되지 않고 증식할 수 있어 유출슬러지 발생량이 적고 온도, pH 및 충격부하의 변동 등에 강하며 난분해성 물질의 분해력도 강하다. 또한 생물막이 형성되므로 활성 슬러지 공정과는 달리 슬러지 팽화(bulking) 현상으로 인한 슬러지 부상현상 등이 없어 운전관리가 용이하고, 운전특성상 단위 체적 당 미생물 농도를 높게 유지 할 수 있다는 장점이 있다(이 등, 1997, 2002b).

생물학적인 질소화합물 분해 반응은 유입 폐·하수 내의 암모니아와 유기질소 등이 일정조건 하에서 질산성 질소와 아질산성 질소로 변화되는 질산화 과정과 질산화를 거친 질산성 질소 등이 처리 시스템에서 환원되어 대기 중에 질소가스로 배출됨으로써 질소화합물을 제거하는 과정인 탈질화 과정을 거쳐야 한다.

질산화 반응은 온도, pH, DO 및 유기물 농도 등에 영향을 받으며 특히 HRT는 질산화균 성장 속도와 밀접한 관련

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
geebhan@catholic.ac.kr

이 있는 인자이기 때문에 매우 중요하다. 또한 탈질 시 질소의 환원에는 전자공여체가 필요한데 이를 위하여 기존에 이용되던 유입원수 내 유기물보다 새로이 외부로부터 공급되는 무기물 전자공여체로서 황화합물이 주목받고 있다. 유입원수 내의 유기물 농도는 질산화 및 유출수의 유기오염물 농도에 영향을 끼치지만 탈질을 위하여 공급되는 무기물 황화합물은 오직 전자공여체로서의 역할만 제공하며 유출수 농도에 영향을 미치지 않으므로 적절한 방법으로 적용할 경우 질소처리에 효율적이기 때문이다(변 등, 2000; Batchelor et al., 1978).

본 연구는 현재 많은 연구자들로부터 관심을 받고 있는 미생물막을 이용한 생물학적 질소화합물 분해를 위하여 새롭게 이용된 기능성을 갖춘 다공성 세라믹 담체에 의한 처리효율에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 이를 위하여 질산화에 이용되는 다공성 세라믹 담체를 충전한 반응조의 체류시간, 부하율 변화 및 온도에 의한 영향요소를 분석하고, 탈질에 적용된 기능성 세라믹 황담체를 이용한 탈질에 의한 질소화합물의 분해 가능성에 대한 영향을 살펴보았다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 반응조 구성

본 연구를 위하여 구성된 system의 반응조는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 질산화 반응조(Reactor I)와 탈질 반응조(Reactor II)를 중심으로 이루어졌다. 또한 system의 추가적인 구성을 위하여 원수 유입조(Reservoir I) 및 질산화 반응조 처리수를 위한 중간 저류조(Reservoir II)와 탈질조 처리수를 위한 처리수조(Reservoir III) 및 2대의 유입펌프(정량펌프: FLEX, USA, 7520-57) 등이 이용되었다.

2개의 반응조는 모두 상향류 방식을 택하였으며 이중 질산화 반응조는  $\phi$  110 mm, 높이 400 mm의 아크릴 재질의 원통형으로 운전 유효용적(working volume)은 3.8L로 하였다. 반응조 하단에 산기관을 설치하고 flow meter를 통하여 공기가 일정하게 공급되도록 하였다.

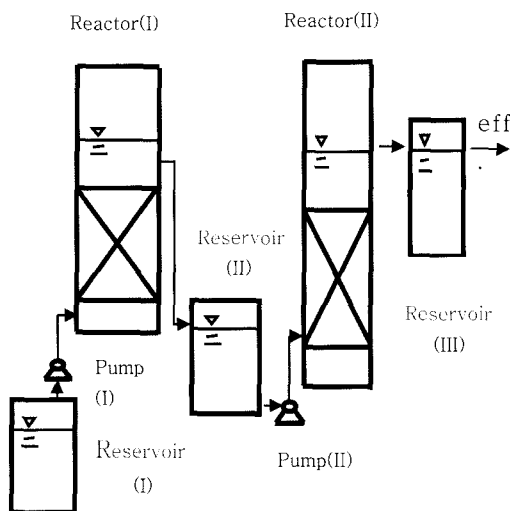


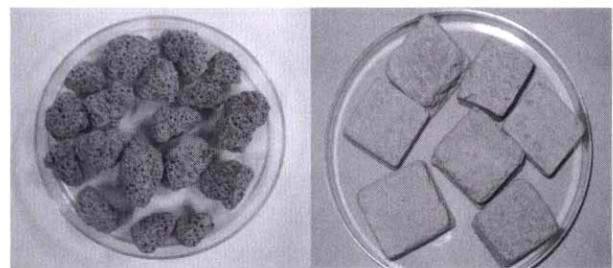
Fig. 1. Schematic diagram of system.

탈질 반응조는  $\phi$  84 mm, 높이 1,600 mm의 아크릴 재질의 원통형이며 운전 유효용적은 7.7 L로 하였다. 상단의 gas port로는 생성되는  $N_2$  가스를 포집하였는데 유출 가스 내의 수분을 제거하기 위해 Silica를 충전한 Serum bottle를 통과시킨 이후에 Gas 전용 포집 주머니(SUPELCO, USA, Tedlar Bag, 24633)를 사용하여 포집하였다.

### 2.2. 다공성 담체 충전

본 연구에서는 Fig. 2(a)에 나타난 것과 같은 기존의 세라믹 담체보다 높은 기공율(60%)과 미생물 친화적인 점토질의 세라믹 담체(비정형)를 질산화 반응조에 운전 유효용적의 20%로 충전하여 실험하였다. 또한 탈질 반응조에는 Fig. 2(b)에 나타난 것과 같은 기능성 황담체(정육면체: 12 mm)를 운전 유효용적의 45%로 충전하였다. 각각의 반응조 바닥에는 담체 지지를 위하여 다공판을 설치하였다.

실험에 사용된 담체의 비중을 구하기 위해서 105°C에서 2시간 가열 한 후 그 무게를 재고 증류수를 채운 메스실린더를 이용하여 부피를 측정하였다. 세라믹과 황담체의 비중은 각각 1.10 및 1.57  $g/cm^3$ 으로 나타났다.



(a) ceramic media (b) sulfur media

Fig. 2. Packed media in the reactors.

### 2.3. 유입원수 성상

본 실험에서는  $NH_4-N$ 을 공급하기 위하여 인위적으로 제조한 인공폐수를 이용하였으며 그 성상은 Table 1에 나타내었다.

질산화 미생물에 필요한 미량 필수 영양영분은 1 mL/L의 비율로 투입 하였으며, 암모니아의 농도는  $NH_4Cl$ 을 이용하여  $NH_4-N$ 의 농도가 50~200 mg/L까지 유지되도록 주입하였다. 알칼리도는 황-이용 탈질 시 필요한 것으로 제시된 질소 제거량 당 알칼리도 소비비 4.39의 값과 연동 운전되고 있는 질산화 반응조를 위해  $NaHCO_3$ 를 이용하여 7.14 mg/mg $NH_4-N$  as  $CaCO_3$ 를 기준으로 조절하였다(Hashimoto et al., 1987; Koenig et al., 2001).

### 2.4. 반응조 운전

#### 2.4.1. 반응조 운전인자

본 실험에 이용된 반응조의 운전을 위하여 적용된 parameters의 조건은 Table 2에 나타내었다.

실험이 수행된 시기에 따라 여름철(7~9월)과 겨울철(10~3월)에 반응조의 온도는 각각  $26 \pm 1^\circ C$ 와  $20 \pm 1^\circ C$ 로 유지되었다. pH는 *Nitrosomonas*와 *Nitrobactor*가 각각 pH 8.3~8.5

**Table 1.** Characteristics of synthetic wastewater

Item		Concentration (mg/L)
Components	NaHCO <sub>3</sub> (Alk)	335~1344
	NH <sub>4</sub> Cl	157~764
	NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	6
	MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	11
	KCl	45
Other trace elements	ZnCl <sub>2</sub>	50
	MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	500
	(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> ·4H <sub>2</sub> O	90
	Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O	100
	NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	50

**Table 2.** Operating conditions of system

Parameters	Conditions	
	Reactor I	Reactor II
Working volume (L)	3.8	7.7
HRT (hr) (EBCT)	6, 8	(8.4)
Flow rate (mL/min)	7.9~10.6	15.4
DO (mg/L)	4~5	
pH	7.5~8.5	7.5~8.5
Temperature	20~26°C	25°C

및 7.3~8.4 범위에서 가장 활성화하므로 적정 범위를 pH 7.5~8.5로 맞추었다. 질산화 반응조 유입 원수는 HRT 6시간에서 10.6 mL/min, HRT 8시간에서는 7.9 mL/min으로 변화를 주어 운전하였다. 탈질 반응조는 질산화 처리공정과 연동 운전에 따른 황 담체-이용 탈질 반응의 처리 가능성을 보기 위해 유입 NO<sub>3</sub>-N 농도 범위는 40~80 mg/L로 유지시켰고, EBCT(Empty Bed Contact Time)를 8.4 hr로 고정하여 용적부하량이 0.14 kgNO<sub>3</sub>-N/m<sup>3</sup>/d로 되도록 질산화 반응조와 연동 운전하였다.

#### 2.4.2. 반응조 미생물 식종

질산화 반응조는 경기도 굴포천 ○○고도하수처리장 포기조 내의 하수슬러지를 식종하였으며, 탈질을 수행하는 미생물은 황을 전자공여체로 이용하는 독립탈질미생물의 특성을 고려하여 효율과 배양의 용이성 면에서 상대적으로 우수한 *Thiobacillus denitrificans*를 선정하였다. 이를 위하여 Koenig 등(2001)이 황담체를 이용한 탈질의 동역학적 모델 산정의 실험에서 사용한 *Thiobacillus denitrificans* 분리 배지(Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·5H<sub>2</sub>O 5 g/L, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 2 g/L, KNO<sub>3</sub> 2 g/L, NaHCO<sub>3</sub> 1 g/L, NH<sub>4</sub>Cl 0.5 g/L, MgCl<sub>2</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.5 g/L, FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.01 g/L)를 이용하여 균주를 분리한 후 agar를 첨가하여 만든 고체배지로 삼분 도말법을 이용하여 4차례에 걸쳐 순수 분리한 후 *Thiobacillus denitrificans* 배양용 액체 배지 1L에 다시 대량배양을 실시하여 식종하였다.

#### 2.5. 분석 방법

원수 및 처리수는 pH, 온도, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N 및 NO<sub>2</sub>-N 등을 분석하였다. 액체 시료는 0.20 μm 공극의 Syringe Filter로 여과한 후 NH<sub>4</sub>-N의 농도는 HACH의 DR-4000을

이용하였고, NO<sub>3</sub>-N 및 NO<sub>2</sub>-N의 농도는 Ion Chromatography(DIONEX, USA, DX-120 column : AS14)로 분석하였다. pH는 Thermo ORION 3STAR (USA)로 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 부하변동에 따른 질산화 효율

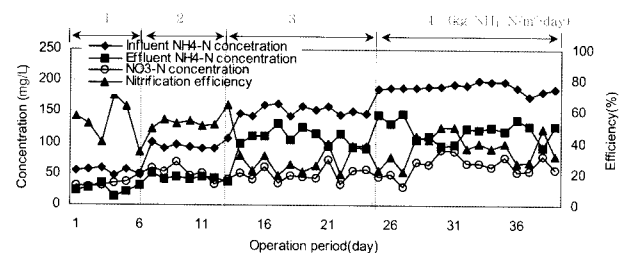
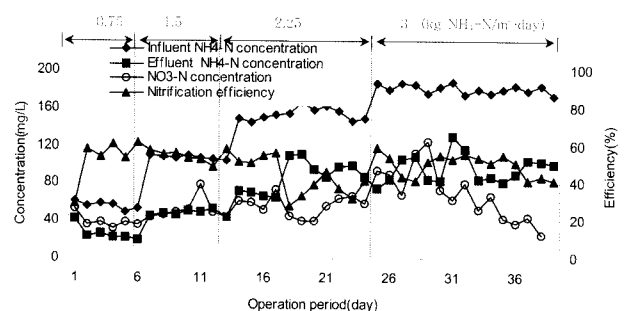
Fig. 3에는 HRT를 6시간으로 운전하면서 유입수의 NH<sub>4</sub>-N 농도를 단계별로 높여 담체 용적부하 1~4 kgNH<sub>4</sub>-N/m<sup>3</sup>·day의 범위에서 나타난 질산화 효율을 그래프로 나타냈다.

담체에 부착된 미생물막의 biomass 분율은 1g의 세라믹 담체 당 평균 0.11±0.012 g MLVSS로 측정되었다. 질산화 반응조 내에서 NH<sub>4</sub>-N의 농도가 50~100 mg/L의 범위로 유입될 때, 미생물에 대한 NH<sub>4</sub>-N의 부하량(F/MN비) 범위는 0.0083~0.017 gNH<sub>4</sub>-N/g MLVSS·day였으며, 이때 질산화 효율은 평균 50~55% 범위를 나타냈다. 그러나 150~200 mg/L의 범위로 유입될 때는 F/MN비 범위가 0.025~0.034 gNH<sub>4</sub>-N/g MLVSS·day로 높아졌고, 질산화 효율은 반감하여 25~35% 범위를 나타냈다.

즉 F/MN비가 0.0083~0.017 gNH<sub>4</sub>-N/g MLVSS·day이고 담체용적 부하량이 1~2 kgNH<sub>4</sub>-N/m<sup>3</sup>·day의 범위에서는 50~60%의 효율로 정상상태를 유지하였으나, F/MN비가 0.025~0.034 gNH<sub>4</sub>-N/gMLVSS·day이고 담체용적 부하량이 3~4 kgNH<sub>4</sub>-N/m<sup>3</sup>·day의 범위로 증가할수록 질산화 효율은 25~35%의 범위로 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 HRT를 8시간으로 운전하면서 유입수의 NH<sub>4</sub>-N 농도를 단계별로 높여 담체 용적부하 0.75~3 kgNH<sub>4</sub>-N/m<sup>3</sup>·day 범위에서 나타난 질산화 효율을 그래프로 나타냈다.

NH<sub>4</sub>-N 농도가 50~100mg/L의 범위로 유입될 때, F/MN비의 범위는 0.0062~0.013 g NH<sub>4</sub>-N/gMLVSS·day였으며, 질산화 효율은 평균 55~60% 범위를 나타냈다. NH<sub>4</sub>-N 농

**Fig. 3.** Profiles of nitrification efficiency at 6hr HRT.**Fig. 4.** Profiles of nitrification efficiency at 8hr HRT.

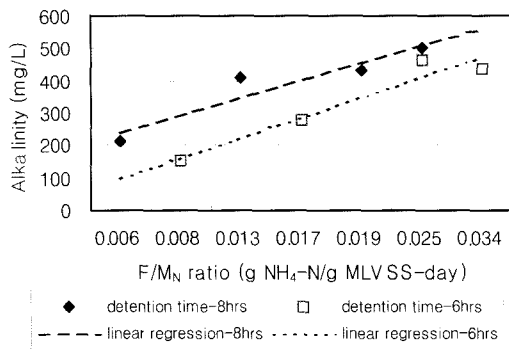


Fig. 5. Linear regression of alkalinity consumption rate vs. F/MN ratio.

도가 150~200 mg/L의 범위로 유입될 때 F/MN비의 범위는 0.019~0.025 gNH<sub>4</sub>-N/g MLVSS · day로 높아졌으며 질산화 효율은 감소하였지만 45~50% 범위를 유지하는 것으로 나타났다.

Fig. 5에는 HRT를 6, 8시간으로 각각 운전하였을 때 질산화로 인하여 소모된 알칼리도의 변화를 유입농도를 단계별로 증가시켜 높아지는 F/MN비에 대하여 추세선으로 도식화 하였다. 추세선으로부터 같은 범위의 F/MN비(유입부하)일 경우 HRT 6시간보다 8시간으로 운전하였을 때의 알칼리도 소모가 높은 것을 알 수 있다. 그러므로 유입수 내 NH<sub>4</sub>-N 농도변화에 의한 유입부하의 변화가 질산화 효율에 미치는 영향보다는 유입부하 변화로 인한 체류시간 변화에 따른 유입부하의 변화가 더 질산화의 효율에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

3.2. 온도변화에 따른 질산화 효율

온도변화에 따른 반응속도를 나타내는 물리화학식으로 잘 알려진 Arrhenius 반응식 (1)은 온도변화에 따른 활성화 에너지(E<sub>0</sub>)를 이용하여 반응속도(k)를 나타낸 것으로 4~32°C 범위에서 미생물 반응속도를 나타내는데 적용할 수 있다고 보고되었다(김 등, 2003). 또한 질산화에 대한 온도의 영향은 Arrhenius식을 이용하여 이전부터 여러 연구자(Balakrishnan et al., 1969; Dowing et al., 1964; Haug et al., 1971)들에 의하여 다음 식 (2)로 정리되었으며, 특히 미생물막에 의한 반응에 적용될 수 있음이 최근 보고되었다(Salveti et al., 2006).

$$k = A \cdot \exp(-E_a/R \cdot T) \tag{1}$$

$$\mu = a e^{b(T-15)} \tag{2}$$

여기서  $\mu$ 는 비생장속도(d<sup>-1</sup>)를 나타내며 상수계수인 a, b의 값은 연구자들에 따라 각각 0.18~0.79 및 0.098~0.116의 값으로 보고되었다. 이 중 Huang 등(1974)이 Haug 등(1971)과 Balakrishnan 등(1969)의 연구결과를 인용하여 보고한 결과에 따르면, 미생물막에 의한 질산화의 경우 온도가 20°C에서 25°C로 증가할 경우 질산화효율은 55%에서 75%로 약 20%의 증가를 보인다고 보고하였다.

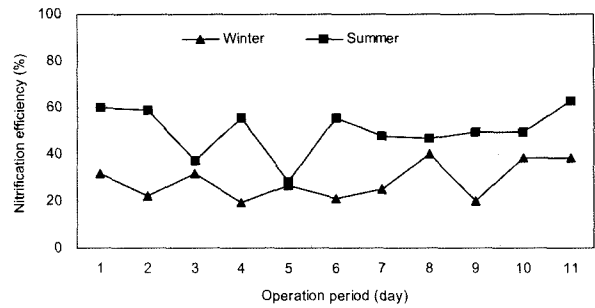


Fig. 6. Profiles of nitrification efficiency at different seasons.

Fig. 6에는 유입수 NH<sub>4</sub>-N의 평균 농도가 150 mg/L로 유입되도록 하여 부하량은 3 kg NH<sub>4</sub>-N/m<sup>3</sup> · day로 유지시키며 반응조를 운전하였을 때 계절에 따른 온도 차이로 인하여 질산화 효율변화에 미치는 영향에 대한 결과를 나타내었다. 급격한 효율변화는 담체사이 공극의 막힘(clogging)으로 인한 것으로 역세척 후 정상상태로 유지된 것을 알 수 있다. 계절별 반응조의 온도는 약 5~6°C의 차이를 보였다.

Fig. 6에 나타난 결과를 통하여 본 실험은 온도가 20°C에서 25°C로 증가할 경우 질산화 효율은 55%에서 75%로 약 20%의 증가를 보인다고 발표된 이전 연구자들의 결과와 마찬가지로 겨울철보다 여름철의 처리효율이 평균 약 25%정도 높게 나타난 것으로 유사한 결과가 얻어진 것으로 판단된다.

그러나 Arrhenius식에서 도출된 식(2)의 상수 b는 온도에 따른 활성화에너지의 영향이 반영된 계수로서 본 실험에서 구한 b의 값은 0.037~0.045의 값을 가지므로 이전 연구자들에 의하여 보고된 0.098~0.116의 값보다 작게 나타났다. 이는 본 실험의 질산화효율이 이전 연구자들의 50~75%보다 낮기 때문인 것으로 판단된다.

3.3. 황담체를 이용한 탈질 효율

질산화 반응조의 유출수를 탈질 반응조의 유입수로 이용하여 연동 실험한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 유입 NO<sub>3</sub>-N 농도는 35~73 mg/L 범위까지 질산화 효율에 따라 변동이 있었다. 질산화공정에서의 처리 효율에 따라 탈질조의 유입수 농도가 변하므로 이러한 점들이 탈질에 있어서 여러 변수로 작용하게 된다.

따라서 질산화 반응조와의 연동운전에 따른 황-담체 반응조의 탈질 처리 가능성을 검토하고 탈질 처리 효율에 미치

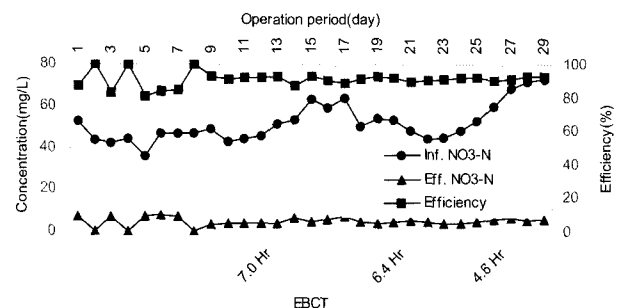


Fig. 7. Profiles of denitrification efficiency with nitrification reactor.

는 영향을 파악한 결과, EBCT를 8.4 hr부터 4.3 hr까지 감소시켜가며  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 부하량을  $0.1\sim 0.4 \text{ kgNO}_3\text{-N/m}^3 \cdot \text{day}$ 로 변화시켰을 때 나타난 탈질효율은 Fig. 6에 나타난 것처럼 유입수 농도의 증가와 EBCT의 변화에도 영향을 받지 않고 정상상태(steady-state)를 유지하며 90%에 가까운 처리효율을 보였다. 따라서 80 mg/L 이하의 저 농도에서는 후 탈질 공정으로 황담체를 이용한 탈질의 효율적인 처리가 가능함을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

부하변동에 따른 질산화 효율에 미치는 영향은 F/MN비가  $0.0083\sim 0.017 \text{ gNH}_4\text{-N/g MLVSS} \cdot \text{day}$ 이고 담체용적 부하량이  $1\sim 2 \text{ kgNH}_4\text{-N/m}^3 \cdot \text{day}$ 의 범위에서는 50~60%의 효율로 정상상태를 유지하였으나, F/MN비와 담체용적 부하량이 각각  $0.025\sim 0.034 \text{ g NH}_4\text{-N/gMLVSS} \cdot \text{day}$ 와  $3\sim 4 \text{ kg NH}_4\text{-N/m}^3 \cdot \text{day}$ 의 범위로 증가할수록 질산화 효율은 25~35%의 범위로 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

또한 같은 범위의 F/MN비일 경우 HRT 6시간보다 8시간으로 운전하였을 때의 알칼리도 소모가 높은 것을 알 수 있다. 그러므로 유입수 내  $\text{NH}_4\text{-N}$  농도변화에 의한 유입부하의 변화가 질산화 효율에 미치는 영향보다는 유입유량 변화로 인한 체류시간 변화에 따른 유입부하의 변화가 더 질산화의 효율에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

온도변화에 따른 질산화 효율에 미치는 영향은 겨울철보다 여름철의 처리효율이 평균 약 25%정도 높게 나타난 것으로 이전 연구자들과 유사한 결과가 얻어졌다. 그러나 Arrhenius식에서 도출된 식 (2)의 상수 b는 온도에 따른 활성에너지의 영향이 반영된 계수로서 본 실험에서 구한 b의 값은 0.037~0.045의 값을 가지므로 이전 연구자들에 의하여 보고된 0.098~0.116의 값보다 작게 나타났다. 이는 본 실험의 질산화효율이 이전 연구자들의 50~75%보다 낮기 때문인 것으로 판단된다.

황담체를 이용한 탈질효율의 경우 질산화 반응조와의 연동운전 결과, EBCT를 8.4 hr부터 4.3 hr까지 감소시켜가며  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 부하량을  $0.1\sim 0.4 \text{ kgNO}_3\text{-N/m}^3 \cdot \text{day}$ 로 변화시켰을 때 나타난 탈질효율은 유입수 농도의 증가와 EBCT의 변화에도 영향을 받지 않고 정상상태(steady-state)를 유지하며 90%에 가까운 처리효율을 보였다. 따라서 80 mg/L 이하의 저 농도에서는 후 탈질 공정으로 황담체를 이용한 탈질의 효율적인 처리가 가능함을 알 수 있었다.

#### 사 사

본 연구는 2006년도 가톨릭대학교 교비연구비의 지원으로 이루어졌음.

#### 참고문헌

- 국립환경연구원, 수계 오염총량관리 기술지침 (2002).
- 김금용, 원성연, 이상일, 활성슬러지의 질산화 반응시 온도 및 독성물질(Cu)이 미치는 영향, *대한환경공학회지*, **25**(12), pp. 1578-1583 (2003).
- 김용환, 조재현, 김무훈, 이용우, 생물막 담체를 이용한 질산화 반응 특성 연구, *대한환경공학회지*, **19**(3), pp. 415-424 (1997).
- 김우정, 안대회, 고효율 생물막공정 및 후처리공정에 의한 축산폐수처리에 관한 연구, *대한환경공학회 춘계학술연구발표회*, pp. 233-234 (2002).
- 변정섭, 범봉수, 조광명, 황을 이용한 독립영양탈질에서의 체류시간과 온도의 영향, *대한환경공학회지*, **22**(3), pp. 405-415 (2000).
- 이경숙, 한기봉, 안우정, 홍성민, 생물막공정에서 부하변화에 따른 오수처리 효율에 관한 비교연구, *대한상하수도학회 · 한국물환경학회 공동 추계학술발표회*, pp. B9-12 (2002a).
- 이규훈, 강경애, 송석룡, 박대주, 침지형 고정 생물막 반응기에서 내부순환율과 미디어 충전율이 질산화에 미치는 영향, *대한환경공학회지*, **19**(4), pp. 471-480 (1997).
- 이태경, 박재구, 한기봉, 세라믹 담체를 이용한 고정생물막 공정에서의 동시 질산화 및 탈질화, *대한환경공학회지*, **24**(6), pp. 1105-1115 (2002b).
- 황규대, 한봉수, 호기조에 고정상 담체를 충전한 A2/O 공정에서 무산소조 체류시간 변화가 유기물질 및 질소제거에 미치는 영향, *한국물환경학회지*, **23**(4), pp. 451-457 (2007).
- Balakrishnan, S. and Eckenfelder, W. W., Nitrogen Relationships in Biological Waste Treatment Processes-II, Nitrification in Trickle Filters, *Wat. Res.*, **3**, pp. 167-174 (1969).
- Batchelor, B. and Lawrence, A. W., Autotrophic Denitrification using Elemental Sulfur. Cornell Univ. Ithaca, N. Y., *WPCF*, pp. 1986-2001 (1978).
- Downing, A. L., Knowles, G. and Barrett, M. J., Determination of Kinetic Constants for Nitrifying Bacteria in Mixed Culture with the Aid of An Electronic Computer, *J. Gen. Microbiology*, **38**, pp. 263-271 (1965).
- Hashimoto, S., Furukawa, K. and Shioyama, M., Autotrophic denitrification using elemental sulfur, *J. Fermentation Tech.*, **65**, pp. 683-692 (1987).
- Haug, R. T. and McCarty, P. L., Nitrification with the Submerged Filter. Report prepared by the Department of Civil Engineering, Stanford University for the Environmental Protection Agency, *Research Grant No. 17010EPM*, August (1971).
- Huang, C. S. and Hopson, N. E., Temperature and pH Effect on the Biological Nitrification Process. Presented at the Annual Winter Meeting, *New York Water Pollution Control Association*, New York City, Jan. (1974).
- Koenig, A. and Liu, L. H., Kinetic model of autotrophic denitrification in sulphur packed-bed reactors, *Wat. Res.*, **35**(8), pp. 1969-1978 (2001).
- Salveti, R., Azzellino, A., Canziani, R. and Bonomo, L., Effects of temperature on tertiary nitrification in moving-bed biofilm reactors, *Wat. Res.*, **40**(15), pp. 2981-2993 (2006).