

황입자를 이용한 *T. denitrificans*에 의한 질소제거 최적화 연구

A Study on characteristics analysis of autotrophic denitrification microbial community using sulfur granule

윤수철* · 주재영 · 남덕현 · 박철휘

Yoon, Su-chul* · Joo, Jae-young · Nam, Duck-hyun · Park, Chul-hwi

서울시립대학교 환경공학부

(2008년 1월 3일 접수 ; 2008년 4월 11일 채택)

Abstract

Generally speaking, there are two widely used methods of Nitrogen removal from waste water: 1) nitrification using autotrophic microorganisms, and 2) denitrification using heterotrophic microorganisms. The C/N ratio is an important factor of the denitrification process. In this case, if methanol is added to increase the lacking organic matter, a high economic cost is incurred and methanol is left in the processed water. In an effort to fix these issues, autotrophic denitrification through the use of Hydrogen, Iron and Sulfur is being studied, and among those Sulfur is cheaper and carries out denitrification effectively, and therefore is being studied the most. In this study, after cultivating *T. denitrificans*, the presence of *T. denitrificans* was determined and the effectiveness of denitrification via *T. denitrificans* was studied. In order to find out about the inhibition of *T. denitrificans* from the loading of organic matter, this shows that the greater the loading of organic matter, the more the denitrification ability of *T. denitrificans* is hindered. In order to research the hindrance of *T. denitrificans* resulting from the loading of NO_3^- -N, these results show that concentrations less than 100mg/L per 100mL of gel volume do not hinder *T. denitrificans*. In order to research the optimization of denitrification resulting from *T. denitrificans*, three 500mL samples of Sulfur granules were prepared: 1) one with only *T. denitrificans* attached (Mode I), 2) one with both *T. denitrificans* and active sludge attached (Mode II), and 3) one with only active sludge attached (Mode III). The results showed that autotrophic denitrification using S from Mode I was the most active.

Key words : Autotrophic denitrification, Sulfur granule, *T. denitrificans*

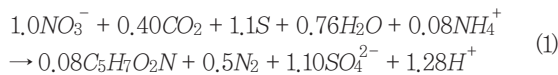
주 제 어 : 독립영양탈질, 황입자, *T. denitrificans*

1. 서론

하수 중에 존재하는 질소와 인과 같은 영양염류를 생물학적 처리방법으로 제거하기 위한 연구는 꾸준히 진행되어 왔다. 질소를 생물학적 처리방법으로 제거하기 위한 일반적인 방법은 독립영양 미생물을 이용한 질산화 과정과 종속영양 미생물을 이용한 탈질과정을 반복적으로 수행하는 것이다. 하지만 종속영양 미생물을 이용한 탈질을 위해서는 탄소공

급원과 전자공여체로서 외부 탄소원의 주입에 필요하며 이에 따라 과다한 운영비용의 증가를 초래하는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 수소(A.Koenig, L. H. Liu, 1996), 철(Kurt M, Dnn IJ, Bourne JR, 1987), 황(Brian AT, Lenly JW, Alvarez JJ, 1998)등을 탈질과정에서의 전자공여체로 이용하는 독립영양탈질이 활발하게 연구되어지고 있는 실정이며 황은 가격 및 효율측면에서 다른 물질에 비해서 장점을 가지고 있기 때문에 많은 연구자들에 의해서

널리 연구가 진행되고 있는 실정이다. 황을 이용한 독립영양 탈질균의 대표적인 미생물은 *T. denitrificans*로서 환원된 형태의 황을 산화하여 발생된 에너지를 이용하여 NO_3^- -N을 N_2 형태의 가스로 대기 중으로 방출하여 수중의 질소를 제거하게 된다. *T. denitrificans*를 이용한 독립영양탈질균은 황산화미생물이 탄소원으로 HCO_3^- 등과 같은 무기탄소를 이용하고, 최종 전자수용체로서 NO_3^- -N을 이용하는 탈질반응이며, 최종 부산물로 SO_4^{2-} 를 생성하게 된다. 황을 이용한 독립영양 탈질반응에서 소모되는 알칼리도의 양은 이론적으로 $4.57\text{g CaCO}_3/\text{g NO}_3^-$ -N이며 1g NO_3^- -N을 제거하는데 7.14g SO_4^{2-} 가 생성되고, 1.28mol 의 H^+ 가 생성되게 된다. 황이용 화학반응식은 식(1)과 같다.



이처럼 질소를 제거하기 위하여 황을 이용하여 독립영양 탈질균이 가능한 *T. denitrificans*를 이용할 경우에 기존의 탈질공정에 비해서 많은 장점을 가지게 된다. 기존 문헌들에서는 황이용 독립영양탈질균에 일반 활성슬러지나 갯벌토양, 농축 슬러지 등을 이용하여 연구를 하였으나 본 연구에서는 대표적인 독립영양탈질 미생물인 *T. denitrificans*를 배양시킨 후, 순수한 *T. denitrificans*가 유기물과 NO_3^- -N의 부하에 따른 영향을 알아보았으며 또한, *T. denitrificans*의 유무에 따른 황탈질능에 대해 알아보았다. 본 연구의 결과로 황을 이용한 독립영양탈질시에 *T. denitrificans*가 존재하는 반응조가 존재하지 않는 반응조에 비해 효율의 증대를 가져올 수 있음을 알 수 있었다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. *T. denitrificans* 배양

황이용 탈질미생물의 분리, 동정을 위하여 인천 영종도에

Table 1. Metabolic types of denitrification bacteria using sulfur

Metabolic definition	Representative species	Respiratory type	Electron donor	Special Requirement
Obligate chemolithotroph	<i>Thiobacillus denitrificans</i>	O_2/NO_3	$\text{S}_2, \text{S}, \text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	-
	<i>Thiomicrospira denitrificans</i>	O_2/NO_3	$\text{S}_2, \text{S}, \text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	micro-aerophilic
Facultative chemolithotroph	<i>T. versutus</i>	O_2/NO_3	$\text{S}_2, \text{S}, \text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, organic compounds	Denitrifies heterotrophically
	<i>Paracoccus denitrificans</i>	O_2/NO_3	$\text{S}_2, \text{S}, \text{S}_2\text{O}_3^{2-}, \text{H}_2$ organic compounds	-

※ Knut Yngve Børshøj et al., (1985)

위치한 개펄토양과 서울시 J 하수처리장의 농축 슬러지 및 Y 하수처리장의 활성슬러지로 sulfur/limestone을 이용하여 운전되어지고 있는 슬러지를 채취하여 미생물 균집분포를 살펴본 결과, *T. denitrificans* 균집이 없는 것으로 나타나 순수한 *T. denitrificans*를 획득하여 배양하기 위하여 미국의 ATCC(American Type Culture Collection; www.atcc.org)에서 판매하는 순수한 *T. denitrificans*를 분양받아 35°C , 혐기조건에서 배양하였으며, *T. denitrificans*를 황 입자에 부착생장 시키기 위하여 300ml의 삼각 플라스크에 직경 2~5mm의 입자 황을 주입하였으며 35°C 로 일정하게 유지되는 항온항습실 내에서 배양시켰다.

순수한 *T. denitrificans*의 배양을 위해 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$, NH_4Cl , KNO_3 , NaHCO_3 , KH_2PO_4 , $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 를 5,000, 500, 2,000, 1,000, 2,000, 500, 10mg/L로 각각 첨가하여 배양액을 제조하였다. 배양액의 조성은 다음의 Table 2와 같다.

2.2. 유기물 부하에 따른 영향

순수한 *T. denitrificans*에 의한 황을 이용한 독립영양탈질에 있어서 유기물 농도에 따른 영향을 알아보기 위하여 30°C , pH 7.5~8에서 NO_3^- -N의 농도를 30mg/L로 일정하게 유지한 후 glucose를 이용하여 BOD를 0, 25, 50, 75, 100mg/L로 조정하여 실험을 진행하였다.

2.3. NO_3^- -N 농도에 따른 영향

pH 7.5~8.0, 30°C 로 조정된 후 황 입자에 순수한 *T. denitrificans*를 부착생장 시킨 상태에서 NO_3^- -N의 영향을 살펴보기 위하여 NO_3^- -N의 농도를 50, 100, 150, 200, 250mg/L로 각각 조정하였으며, 각각의 NO_3^- -N의 농도에 따라 충분한 알칼리도를 확보하기 위해서 CaCO_3 를 기준으로 228.5, 457, 685.5, 914, 1142.5mg/L를 주입하였다.

2.4. *T. denitrificans*에 의한 탈질능 비교평가

T. denitrificans, *T. denitrificans*와 sludge의 혼합, *T. denitrificans*가 없는 sludge만을 이용하여 3가지 조건에서 *T. denitrificans*의 탈질능을 평가하고자 하였다. Sampling은 초기 12hr은 동안은 안정화 기간으로 판단하였으며, 12hr 이후부터 0, 1, 2, 4, 8, 12, 24, 36, 48hr으로

Table 2. Compositions of nutrient media

Constituent	Concentration (mg/L)	Constituent	Concentration (mg/L)
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	1013mg/L as S	KH_2PO_4	2000
NH_4Cl	500	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	500
KNO_3	277mg/L as NO_3^- -N	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	10
NaHCO_3	1000		

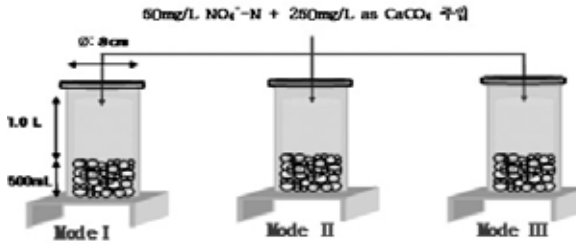


Fig. 1. Schematic diagram of denitrification ability test.

Table 3. Experimental conditions for denitrification ability test

Factor	Mode	Conditions	
<i>T. denitrificans</i>	I	Only <i>T. denitrificans</i>	Temp. 30°C
	II	Only Sludge without <i>T. denitrificans</i>	NO ₃ ⁻ -N 50mg/L pH 7.5-8.0
	III	Sludge with <i>T. denitrificans</i>	CaCO ₃ 228.5

시간 간격에 따라서 실시하였다. 각각의 회분식 반응조에 50mg/L의 NO₃⁻-N를 주입하였으며, 반응시간 동안에 충분한 알칼리도를 확보하기 위하여 약 250mg/L as CaCO₃를 첨가하였다.

2.5. 분석장치 및 항목

pH, Temp, DO는 수질오염공정시험법에 의해 분석하였고 CODcr, Alkalinity는 Standard Methods에 준하여 실시하였으며 분석시 모든 용존성 항목은 0.45µm MF/C여지모 여과 후 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 유기물 부하에 따른 영향

일반적인 부유성 미생물을 이용한 생물학적 반응조에서는 미생물의 단위 질량 당 제거된 NO₃⁻-N 질량을 기준으로 제시하는 SDNR(specific denitrification rate)을 기준으로 질소제거능을 평가한다. 하지만 본 연구는 초기에 주입된 granule의 용량을 기준으로 제거된 NO₃⁻-N의 질량과 생성된 SO₄²⁻의 질량을 기준으로 효율을 산정하였다. 운전초기

Table 4. Analytical methods and instruments

Parameter	Analytical method	Instrument
pH	pH Meter	YSI Model 63
Temp.	DO Meter	YSI Model 55
DO	DO Meter	YSI Model 55
COD _{Cr}	K ₂ Cr ₂ O ₇ Closed Reflux Method	
NO ₃ ⁻ -N	Ion Chromatography	HIC-20A, Shimadzu
NO ₂ ⁻ -N	Ion Chromatography	HIC-20A, Shimadzu
SO ₄ ²⁻	Ion Chromatography	HIC-20A, Shimadzu
Alkalinity	Titrimetric Method	

NO₃⁻-N의 농도는 30~35mg/L로 주입하였으며, 실험시작 후 초기 12hr은 *T. denitrificans*의 유기물을 주입하지 않은 경우를 제외하고는 질소 제거가 이루어지지 않았다. 이는 실험 초기의 *T. denitrificans*가 유기물에 노출됨에 따른 유기물의 저해 작용에 적응하기 위한 안정화 기간으로 사료된다. 또한 유기물을 0, 25, 50, 75, 100mg/L로 주입하였을 경우의 질소제거효율은 약 90.4%, 71%, 56.6%, 37.9%, 20.7%로 나타났다. 아래의 Fig. 2는 유기물의 주입 농도에 따른 NO₃⁻-N의 거동을 나타내고 있다.

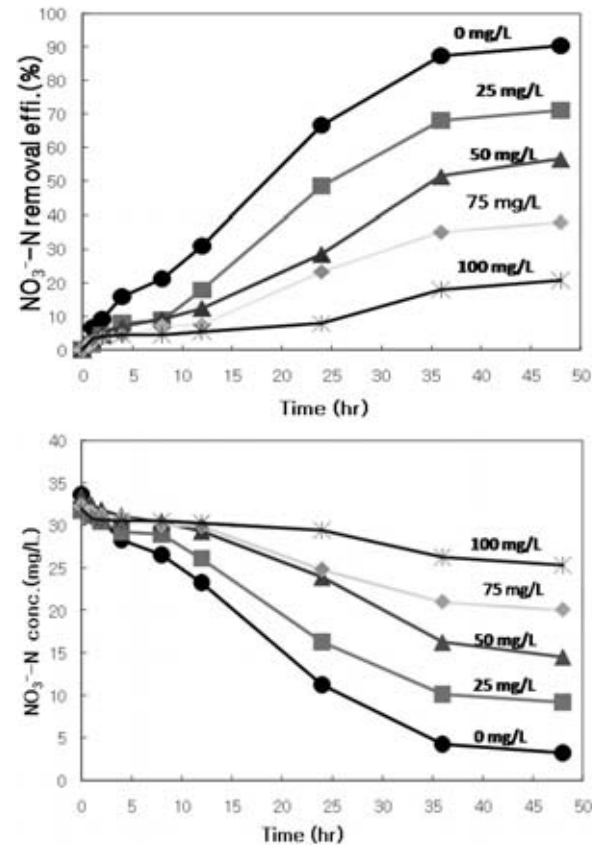


Fig. 2. The variation of NO₃⁻-N in according to organic substrate concentration.

실험기간 동안의 SO₄²⁻ 농도변화를 관찰하기 위하여 유기물을 0, 25, 50, 75, 100mg/L의 농도로 반응조에 주입한 결과, 각각의 반응조에서 108.51, 92.5, 68.48, 50.21, 40.21mg/L의 SO₄²⁻가 각각 생성되었다. 또한 질소의 제거 정도를 간접적으로 판단할 수 있는 지표인 SO₄²⁻/NO₃⁻-N의 값을 살펴보면, 유기물을 주입하지 않은 경우에는 약 6.2를 나타내었으며, 유기물의 주입 농도를 점차적으로 증가시키에 따라서 각각의 반응조 내에서의 값들이 5.7, 4.8, 4.4 3.6으로 나타났다. 이는 *T. denitrificans*는 유기물의 부하가 높아짐에 따라 저해작용으로 인하여 탈질능이 저감되는 것으로 판단된다. 다음의 Fig. 3은 유기물의 부하에 따른 SO₄²⁻농도 변

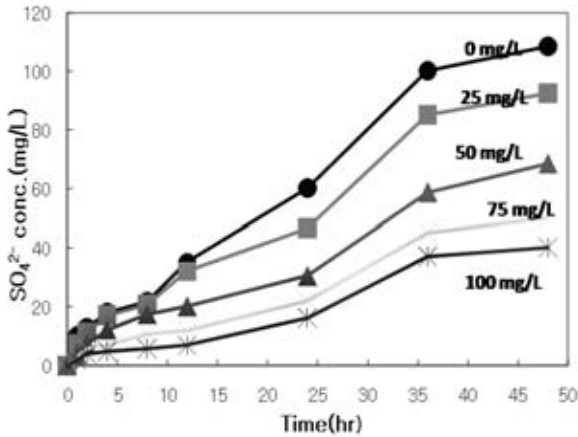


Fig. 3. The change of SO_4^{2-} concentration by organic substrate concentration.

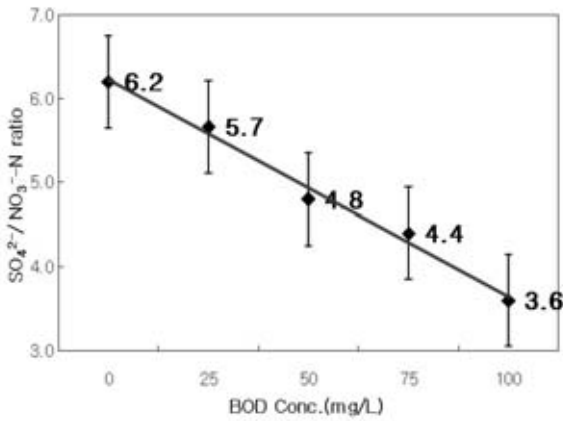


Fig. 4. SO_4^{2-}/NO_3^-N ratio by organic substrate concentration.

3.2. NO_3^-N 농도에 따른 영향

*T. denitrificans*의 탈질능에 저해 작용을 일으킬 수 있는 NO_3^-N 의 한계 농도를 알아보기 위하여 회분식 실험을 실시하였다. 반응조에 NO_3^-N 을 각각 50, 100, 150, 200, 250mg/L을 주입한 후 시간에 따른 NO_3^-N 의 제거효율을 살펴본 결과, 각각의 조건에서의 질소제거효율은 99.4%, 91.6%, 51.4%, 41.6%, 21.7%로 나타났다. 이를 통해서 본 연구에서는 입자 황 100ml 부피당 100mg/L까지의 NO_3^-N 농도부하에서는 탈질능에 저해작용을 일으키지 않았으며, 150mg/L이상의 NO_3^-N 에서는 *T. denitrificans*가 높은 NO_3^-N 의 농도 부하로 인하여 탈질능에 저해작용을 일으키는 것으로 나타났다. Fig. 5는 NO_3^-N 농도부하에 따른 *T. denitrificans*의 질소제거에 의한 NO_3^-N 의 농도변화 및 제거효율을 나타내고 있다.

Fig. 6에서는 NO_3^-N 의 부하에 따른 SO_4^{2-} 의 농도의 변화를 나타내고 있다. NO_3^-N 의 농도를 각각 50, 100, 150, 200, 250mg/L로 증가시킴에 따라서 생성된 SO_4^{2-} 의 농도

는 각각의 실험조건에서 약 279.8, 252.8, 241.2, 234.3, 184.7mg/L이었다. 이때의 SO_4^{2-}/NO_3^-N 의 값은 6.3, 6.1, 3.47, 3.3, 2.8이었다. Fig. 4와 Fig. 7을 비교하여 유기물과 NO_3^-N 의 주입농도에 따른 *T. denitrificans*의 탈질능에 대한 저해작용 정도를 살펴본 결과, NO_3^-N 의 농도가 100mg/L미만의 농도에서는 유기물이 NO_3^-N 에 비해서 저해작용을 더 일으키는 것으로 사료되며 NO_3^-N 가 100~150mg/L의 농도에서는 NO_3^-N 에 의한 저해작용이 더 많이 발생하며 150mg/L이상에서는 유기물이 탈질능에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

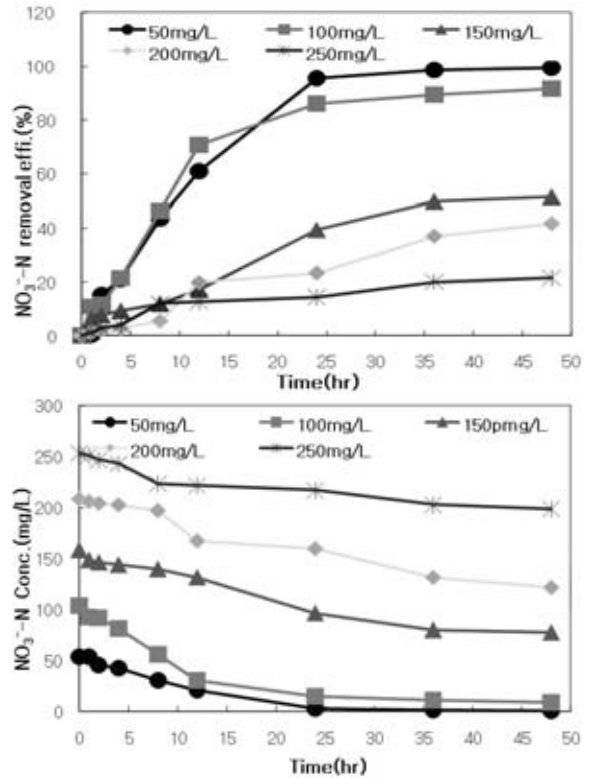


Fig. 5. The variation of NO_3^-N in according to NO_3^-N concentration.

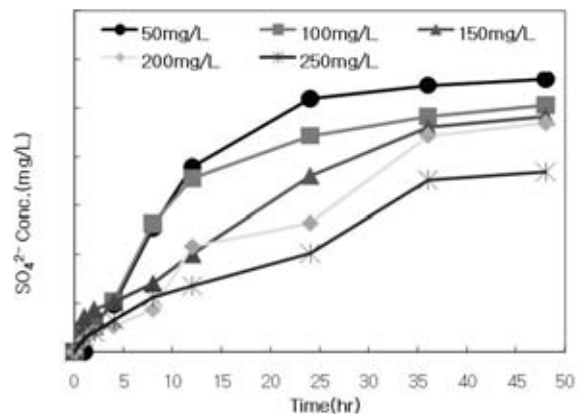


Fig. 6. The change of SO_4^{2-} concentration in according to NO_3^-N concentration.

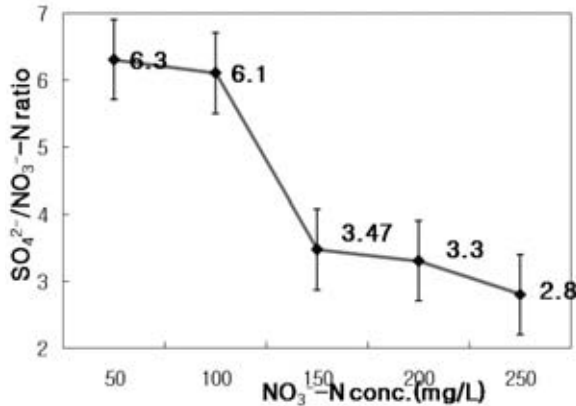


Fig. 7. SO₄²⁻/NO₃⁻-N ratio in according to NO₃⁻-N concentration.

3.3. *T. denitrificans*에 의한 탈질능의 비교평가

T. denitrificans, *T. denitrificans*와 sludge를 혼합한 슬러지, *T. denitrificans*가 없는 sludge를 이용하여 3가지 Mode에서 *T. denitrificans*에 의한 탈질능을 평가하였다.

3.3.1. *T. denitrificans*만을 황에 부착성장 시킨 경우

순수한 *T. denitrificans*를 입자성 황에 부착성장 실험을 수행하였다. 초기의 알칼리도는 약 250mg/L as CaCO₃로 조정하였으며, 실험 개시 후 48시간 후의 알칼리도는 약 70mg/L as CaCO₃였다. 이러한 알칼리도의 변화는 *T. denitrificans*에 의해 독립영양탈질에 의한 것으로 사료된다.

아래의 Fig. 8은 순수한 *T. denitrificans*를 황 입자에 부착성장한 후 실험에서의 NO₃⁻-N 제거효율, NO₃⁻-N 농도 변화와 SO₄²⁻ 생성량을 나타내고 있다. 안정화 기간으로 판단한 12hr에서의 질소제거효율은 약 22.7%에서 13hr에서는 45.4%로 질소제거효율이 증가하였다. 24hr에서의 NO₃⁻-N 제거효율은 93.8%였으며, 36hr에서 98%, 48hr에서 99.6%로 나타났으며, 이를 통해서 순수한 *T. denitrificans*만을 이용할 경우의 대부분의 탈질반응은 24hr이내에 완료된 것으로 판단된다.

이러한 질소제거효율의 유사한 경향이 SO₄²⁻ 생성량에서도 관찰되었으며, 12hr에서의 SO₄²⁻의 농도는 73.41mg/L였으며, 24hr에서는 277.78mg/L였다. 그리고 48hr에서는 311.15 mg/L이었다. 12hr에서의 SO₄²⁻/NO₃⁻-N의 값은 6.23이었으며, 14hr에 SO₄²⁻/NO₃⁻-N의 값이 8.35로 최대값을 나타내었으며 24hr에서는 4.65를 나타내었다. 또한 탈질 반응이 가장 활발히 진행되었던 12hr부터 24hr 사이에 입자 황 100mL에 대한 NO₃⁻-N(mg/L)/hr값은 약 2.08로 최대값을 나타내었다.

3.3.2. *T. denitrificans*와 sludge를 황에 부착성장 시킨 경우

Fig. 9는 슬러지와 *T. denitrificans*를 혼합하여 황 입자

에 부착성장 시킨 경우에 나타나는 결과로서 NO₃⁻-N 제거 효율, NO₃⁻-N와 SO₄²⁻의 농도변화를 나타낸 것이다.

각 측정시간대에 NO₃⁻-N 제거율은 12, 14, 16, 24, 36, 48hr을 기준으로 각각 35.6%, 41.7%, 55.3%, 59.3%, 78.9%, 96.4%, 99.5%로 나타났다. 초기 12hr에 *T. denitrificans*만을 대상으로 실험한 결과보다 NO₃⁻-N의 제거효율이 높게 나타난 것은 슬러지 내에 포함되어 있는 탈질미생물의 탈질반응에 기인한 것으로 사료된다. 또한 대부분의 탈질반응은 약 24hr 이내에서 일어났으며 약 36hr에는 탈질반응이 완료된 것으로 판단된다. 탈질반응이 진행됨에 따라서 생성되는 SO₄²⁻는 각각의 측정시간에서 60.34, 89.91, 105.24, 156.84, 179.66, 191.54mg/L였으며, *T. denitrificans*만을 부착시킨 경우에 비해 생성량의 큰 차이를 나타내었다. SO₄²⁻/NO₃⁻-N의 값은 12hr에 3.48이었으며, 18hr에 7.01로 최대값을 보였으며, 24hr에서는 3.98이었다. 12hr에서 24hr 사이에 입자 황 100mL에 대한 NO₃⁻-N(mg/L)/hr는 1.76이었다.

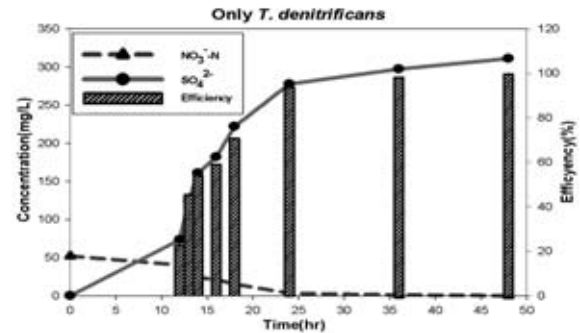


Fig. 8. The change of NO₃⁻-N removal efficiency, NO₃⁻-N and SO₄²⁻ concentration by only *T. denitrificans*.

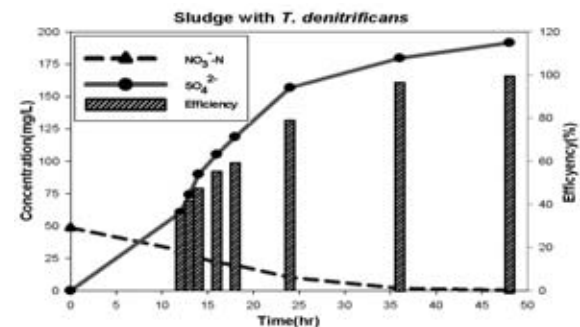


Fig. 9. The change of NO₃⁻-N removal efficiency, NO₃⁻-N and SO₄²⁻ concentration by sludge with *T. denitrificans*.

3.3.3. *T. denitrificans*가 존재하지 않는 슬러지만을 황에 부착성장 시킨 경우

Fig. 10은 *T. denitrificans*가 없는 슬러지만을 이용하여 황 입자에 부착성장 시켜 실험한 결과를 보여주고 있다. 각각의 측정 시간인 12, 14, 16, 18, 24, 36, 48hr에서의 NO₃⁻-N 제거효율을 살펴보면 37.3%, 47.1%, 52.6%,

56.7%, 74%, 92.4%, 99.6%로 각각 나타났으며, SO_4^{2-} 의 농도변화를 살펴보면, 각각의 측정시간에서 30.3, 39.2, 51.7, 58.7, 73.6, 92.2, 101.7mg/L였다. 12, 24, 36hr에서의 SO_4^{2-}/NO_3^- -N의 값은 각각 1.66, 1.75, 2.68이었으며, 이 값은 16hr에 4.69로 최대값을 보였다. 100mL의 입자 황을 기준으로 탈질반응이 가장 활발하게 진행된 12hr에서 24hr 사이의 NO_3^- -N(mg/L)/hr의 값은 약 0.8를 나타냈으며 이 값을 기준으로 대표적 황이용 독립영양탈질 미생물인 *T. denitrificans*는 없으나 다른 독립영양탈질 미생물에 의한 것으로 판단되어지며 탈질과정의 대부분이 황을 이용하지 않은 탈질에 의한 것이기 때문에 SO_4^{2-} 의 생성량이 낮은 것으로 사료된다.

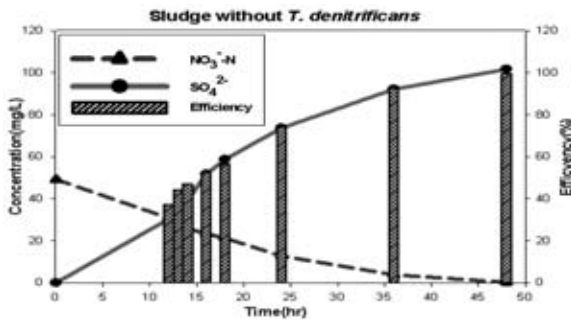


Fig. 10. The change of NO_3^- -N removal efficiency, NO_3^- -N and SO_4^{2-} concentration by sludge without *T. denitrificans*.

4. 결론

본 실험은 독립영양탈질 미생물 중 대표적인 황이용 독립영양탈질 미생물로 알려진 *T. denitrificans*에 대하여 유기물과 NO_3^- -N 부하에 따른 탈질능에 미치는 영향과 *T. denitrificans* 유무에 따른 탈질능의 최적화에 대해 알아보 고자 하였다.

1. 순수한 *T. denitrificans*을 이용하여 유기물을 0mg/L, 25mg/L, 50mg/L, 75mg/L, 100mg/L로 주입하였을 경우의 질소제거효율은 약 90.4%, 71%, 56.6%, 37.9%, 20.7%로 나타났으며, SO_4^{2-}/NO_3^- -N 값들도 각각 6.2, 5.7, 4.8, 4.4 3.6으로 나타났다. 이를 통해서 *T. denitrificans*는 유기물의 농도가 증가함에 따라서 저해작용으로 인하여 탈질능이 저하된 것으로 판단된다.
2. *T. denitrificans*에 대한 NO_3^- -N의 부하에 따른 탈질능과의 관련성을 알아본 결과, NO_3^- -N을 각각 50mg/L, 100mg/L, 150mg/L, 200mg/L, 250mg/L로 증가시킨 경우의 질소제거효율은 약 99.4%, 91.6%, 51.4%, 41.6%, 21.7%로 점차적으로 감소하였다. 100mg/L의 NO_3^- -N을 기준으로 이하의 농도에서는 탈질능에 대한 저해작용이 다소 관찰되었으나

100mg/L을 초과하는 NO_3^- -N에서는 현저한 탈질능의 저하가 관찰되었으며, 이를 통해 100mg/L의 NO_3^- -N가 *T. denitrificans*의 탈질능에 저하를 미치는 한계농도인 것으로 판단된다.

3. *T. denitrificans*만을 입자 황에 부착시킨 반응조(mode I)에서는 24시간에 탈질반응이 대부분 완료되었으며 SO_4^{2-}/NO_3^- -N의 값은 7.11, NO_3^- -N(mg/L)/cm³·hr의 값은 2.03을 나타냈다. 이는 100% 순수한 *T. denitrificans*를 부착시켜 실험하였기 때문에 높은 것으로 사료된다.
4. *T. denitrificans*와 활성슬러지 이용 독립영양탈질 미생물을 혼합하여 입자 황에 부착시킨 반응조(mode II)에서는 36시간에 탈질반응이 대부분 완료되었으며 SO_4^{2-}/NO_3^- -N의 값은 4.93, NO_3^- -N(mg/L)/cm³·hr의 값은 1.83을 나타냈고 mode I에 비해 낮으며 mode III에 비해 높다. 이는 *T. denitrificans*가 존재하여 황을 이용하는 독립영양탈질에 기여를 한 것으로 사료된다.
5. *T. denitrificans* 없이 활성슬러지 이용 독립영양탈질 미생물만을 입자 황에 부착시킨 반응조(mode III)에서는 36시간에 탈질반응이 대부분 완료되었으며, SO_4^{2-}/NO_3^- -N의 값은 2.62, NO_3^- -N(mg/L)/cm³·hr의 값은 1.52를 나타냈다. 이는 *T. denitrificans*는 없으나 다른 독립영양탈질 미생물에 의해 탈질이 일어난 것으로 판단되어지며 탈질과정의 대부분이 황을 이용하지 않은 탈질에 의한 것이기 때문에 SO_4^{2-} 의 생성량은 낮은 것으로 사료된다.
6. 종속영양미생물을 이용한 탈질공정을 사용하는 재래식 하수처리장에서 독립영양미생물을 이용한 질산화 반응조 후단에 황을 이용한 독립영양탈질공정이 설치할 경우, 높은 유기물과 100mg/L이상의 NO_3^- -N가 유입될 경우에는 이들의 저해작용으로 인한 *T. denitrificans*의 탈질능의 저하가 예상되며, *T. denitrificans*의 이용을 통하여 높은 탈질효율을 나타낼 수 있는 것으로 판단된다.

KSWW

참고문헌

1. 오상은, 유영복, 이쌍구, 김인수 (2000) "황입자를 이용한 황산화 탈질 미생물의 탈질 특성 (회분식 실험)", *한국물환경학회지*, pp. 37-40.
2. A. Koenig., L.H. Liu, (1996) "Autotrophic denitrification of landfill leachate using elemental", *Water Sic. Tech.*, 34(5-6), 469-476.
3. Batchelor, B. and Lawrence, A. W. (1978) "Autotrophic

- denitrification using elemental sulfur", *J. WPCF.*, 50(8), 1986-2001.
4. Charles, T. D. and James, J. B. (1978) "The use of sulfur and sulfide in packed bed reactors for autotrophic denitrification", *J. WPCF, March*, pp. 569-577.
 5. Driscoll, C. T. and Bisogni, J. J. (1978) "The use of sulfur and sulfide in packed bed reactors for autotrophic denitrification", *J. WPCF*, pp. 569-577.
 6. Kurt M, Dnn IJ, Bourne JR. (1987) "Biological denitrification of drinking water using autotrophic organics with H₂ in a fluidized bed biofilm reactor". *Biotechnol Bioengng*, 29, 493-50.
 7. Kruithof, J. C. et al., (1988) "Nitrate removal from groundwater by sulphur/limestone filtration", *Wat. Supply*, 6, pp. 207-217.
 8. Koenig, A. and Liu, L. H. (1997) "Autotrophic denitrification of landfill leachate by Thiobacillus denitrificans", *Proceedings of The 8th International Conference of Anaerobic Digestion, Sedai, Japan, 25-29 May, 1*, pp. 299-306.
 9. L. H. Liu and A. Koenig (2002) "Use of limestone for pH control in autotrophic denitrification : batch experiments", *Process Biochemistry*, 37, pp. 885-893.
 10. Tian C. Zhang and David G. Lampe (1999) "Sulfur:Limestone autotrophic denitrification processes for treatment of nitrate contaminated water : batch experiments", *Water Research*, 33, pp. 599-608.
 11. Zhang , T. C. and Shan, J. (1999) "In situ septic tank effluent denitrification using a sulfur - liestone process", *Wat. Environ.* 71(7), pp. 1283-1291.
 12. Zhang, T. C. and Lampe, D. G. (1999) "Sulfur limestone autotrophic denitrification processes for treatment of nitrate - contaminated water : batch experiments", *Wat. Res.* 33(3), pp. 599-608.