

DO농도 조절에 따른 황 충전 섬모상 반응조의 질소제거 성능 변화

Nitrogen Removal Performance at Various DO Concentrations in the Bioreactor Packed with Submerged Cilia Media and Granular Sulfur

문진영 · 황용우*

Jin-Young Moon · Yong-Woo Hwang*

인하대학교 환경공학과

(2006년 1월 11일 논문 접수; 2006년 6월 14일 최종 수정논문 채택)

Abstract

In this study, the major operating factors in SND(simultaneous nitrification and denitrification) using bioreactor packed with submerged cilia media and granular sulfur such as variation of nitrification rate, organic matter removal efficiency and denitrification efficiency in different DO concentration were mainly evaluated. Synthetic wastewater and actual sewage were used as influent wastewater. Experiment with synthetic wastewater as influent wastewater was divided into three phases with the adjustment of DO concentration. As the results, nitrification efficiency and T-N removal efficiency in the Phase 3(DO 1.0~2.0 mg/L) were 99% and 52.3%, which is significantly greater than those in other two phases. Also, loading rate and denitrification efficiency of SCPGS(Submerged Cilia media Packed with Granular Sulfur) were calculated as 0.44kg NO₃-N/m³-day and 50%, respectively. On the other hand, nitrification rate was decreased from 99% to 64% according to the DO concentration with the variation from 3.0~3.5 mg/L(phase1) to 0.4~0.6mg/L(phase2). Although the nitrification rate was decreased in 64% according to the variation of the DO concentration, T-N removal rate was rapidly increased to 49% by increasing of the denitrification efficiency. Experiment with actual sewage as influent wastewater was carried out to evaluate efficiency of SCPGS in real operation condition of full-scale sewage water treatment plant. At the time, T-N removal rate in this experiment and full-scale wastewater treatment plants were given by 43% and 20%, respectively. The above results indicate that SCPGS can be used as an advanced treatment process for economical efficiency considered.

Key words: SND(simultaneous nitrification and denitrification), SCPGS (Submerged Cilia media Packed with Granular Sulfur), DO concentration

주제어: 동시질산화 · 탈질반응, 황충전섬모상반응조, DO농도

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

1. 서론

부영양화 및 적조현상의 발생 등에 따라 최근 영양염류에 대한 방류수 규제기준이 점차 강화되고 있으며, 이에 따라 영양염류 제거의 필요성이 더욱 절실한 상황이다. 그동안 하·폐수처리방법의 생물학적 질산화 및 탈질 공법은 물리/화학적 처리공법과 비교하여 친환경적이고, 경제성을 갖춘 대안공정으로서, 다양한 분야에 적용되어 많은 성과가 도출되어왔다. 그 중에서 활성슬러지 공법이 가장 대표적이라고 할 수 있다. 현재 우리나라의 경우 최초 설계당시부터 고도처리공정으로서 건설되어 있는 하수처리장은 아직 많지 않으며, 대부분 표준활성슬러지법으로 건설, 운영되어 왔으나, 수질규제의 강화에 따라 기존의 하수처리장도 고도처리공정으로의 개선이 필요한 상황에 이르렀다. 따라서, 간단한 개조 등을 통하여 고도처리공정으로의 개선이 가능한 공정의 개발이 필요하며, 이러한 필요성이 현장작용의 측면에서 시급히 대두되고 있다.

생물학적 탈질은 전자 공여체로서 이용되는 탄소원의 종류에 따라 종속영양 탈질과 독립영양 탈질로 크게 구분할 수 있으며, 일반적으로 종속영양 탈질이 널리 이용되고 있다. 독립영양 탈질은 종속영양 탈질에 비해 슬러지 생산량도 적을 뿐만 아니라, C/N비가 낮은 하수의 처리에 적용성이 높지만 종속영양 탈질에 비해 일반적으로 탈질속도가 느리고, 황을 전자 공여체로서 이용하는 경우에는 수소이온의 발생에 의한 pH 저하가 발생하므로 이를 위해 적절한 알칼리도의 공급이 이루어져야 한다는 단점이 있다.

현재 그러한 단점을 극복하기 위하여 같은 운전조건인 단일 반응조 내에서 질산화와 탈질이 함께 일어나는 메탄산화세균의 혼합반응조(이 등, 2000)를 이용하는 등의 질산화와 탈질의 동시수행(simultaneous nitrification and denitrification)에 관한 연구 진행이 활발히 이루어지고 있다.

이러한 취지로 본 연구에서는 황이용 독립영양 탈질공정과 활성슬러지 공정을 조합한 황충전 섬모상 반응조 즉, 황이 충전되어 있는 섬모상을 표준 활성슬러지법의 포기조에 설치하여 포기조내에서의 질산화 및 탈질이 동시에 진행되는 지에 대한 가능성 실험

을 수행하였으며 특히, DO농도 조절을 통한 황 충전 섬모상 반응기의 질소제거 성능을 비교하여, 최적의 운전 DO농도에 대해 검토하였다. 또한, 표준 활성슬러지법으로 현재 운전되고 있는 하수처리장과 동일한 조건의 비교실험을 통하여 실제 원수에 대한 적용성을 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구에 사용된 황충전 섬모상 반응조의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. 반응조는 포기조와 침전조로 구성되었으며, 특히 본 실험에 사용한 공정은 생물학적 고도처리에 적용실적이 많은 A²/O 및 MLE(Modified Ludzack-Ettinger)공정과는 다르게, 포기조 내에서 질산화와 함께 황이용 독립영양 탈질이 동시에 이루어지므로 별도의 무산소조가 필요하지 않은 것이 큰 특징이다.

포기조(22.5L) 중앙에 고농도의 질산화균을 유지하고, 이와 동시에 탈질을 수행하기 위한 섬모상을 설치하였다. 섬모상 내에는 기존의 연구(Koening과 Liu, 2001)에서 탈질효율이 입증된 바 있는 입경 3.4~5.7mm의 입상형태의 황을 전체 폭기조 용적의 약 9%로 충전하였다. 초기 운전시 미생물의 식종은 기존에 운전되고 있던 황 이용 탈질 반응기로부터 공급받아 사용하였으며, 약 열흘간 NO₃-N 등의 영양분을 공급하며 추가적인 미생물 성장과 동시에 안정화 기간을 두었다. 또한 포기조에는 교반기를 설치하여 완전혼합을 유도하고, 섬모상 표면과 내부 황충간의 지속적인 물질이동(mass transfer)을 유지하였다. 포기

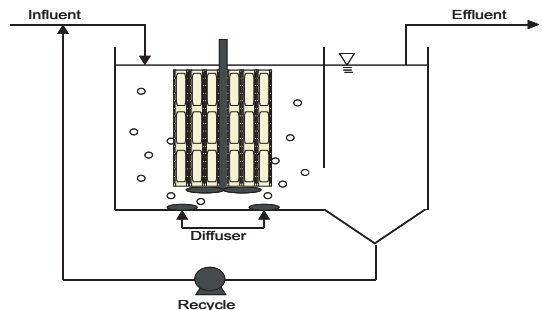


Fig. 1. Schematic Diagram of Submerged Cilia Media Packed with Granular Sulfur.

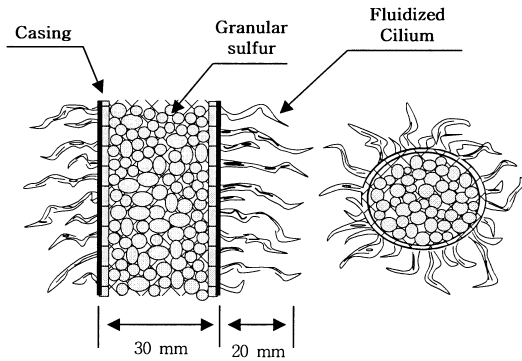


Fig. 2. Cilia media packed with granular sulfur.

조의 하단에는 산소공급을 위해 산기석을 설치하였다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 입상 황은 3cm 직경의 케이싱에 충전하였으며, 그 외부 표면에 섬모상을 부착하였다. 즉, 케이싱 외부에는 질산화가 내부에서는 무산소 조건의 형성이 잘 이루어져 황 이용 독립영양 탈질이 효율적으로 수행되도록 하기 위함이었다.

2.2. 실험방법

본 연구의 초기단계에서는 유입수로서 인공폐수를 사용하였고, 그 성상을 Table 1에 나타내었다. 인공폐수의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 일정하게 하고 기타, 미생물 성장에 필요한 미량 영양물질은 적당량을 주입하였다. 알칼리도의 공급량은 화학 양분식을 통해 질산화에 소모되는 알칼리도를 7.14g $\text{CaCO}_3/\text{g NH}_4^+\text{-N}$ (Villaverds 등, 1997)로, 황이용 탈질에 필요한 알칼리도를 4.57g $\text{CaCO}_3/\text{g NO}_3^-\text{-N}$ (Driscoll과 Bisonghi, 1978)로 산정하여 약 550mg CaCO_3/L 의 충분한 알칼리도를 유입수에 첨가하였다. 알칼리도원으로는 중탄산 나트륨을 사용하였다.

실험은 Table 2에 나타낸 바와 같이 세 단계

Table 1. Composition of synthetic wastewater

Item	Synthetic Wastewater
Temperature(°C)	20 ± 1
pH	7.8 ± 0.5
Alkalinity(mg/L)	550 ± 30
COD _{Cr} (mg/L)	190 ± 20
TKN(mg/L)	43 ± 3
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/L)	42 ± 2

Table 2. Summary of Experimental Conditions

phase	1	2	3
Q(L/d)	22	22	22
HRT(day)	1	1	1
DO(mg/L)	3.0~3.5	0.4~0.6	1.0~2.0

(phase)로 구분하여 진행하였다. 동시 질산화 탈질에서 가장 중요한 운전인자인 포기조 내 DO농도를 3.0~3.5mg/L로 조정 한 기간을 phase 1, 0.4~0.6mg/L로 조정 한 기간을 phase 2, 1.0~2.0mg/L로 조정 한 기간을 phase 3으로 구분하였다. 유입유량은 22 L/day로 고정하였으며, 반응조의 체류시간은 24hr로 유지하였다. 슬러지의 반송율은 유입유량과 동등한 1Q로 운전하였다.

인공폐수에 의한 실험에 이어 실제폐수를 이용하여 본 공정의 처리효율성을 검토 하였다. 유입수로서 인천에 위치한 S하수처리장의 1차처리수를 사용하였고 포기조의 운전조건은 S하수처리장의 경우와 동등하게 약 0.2kg SCOD/kg MLSS-day로 유지하였다. 또한 유입유량은 67L/day, 반응조의 체류시간은 8hr로 운전하였다.

유입수 및 유출수의 시료 분석은 Standard Methods (APHA 등, 1998)와 수질오염 공정시험법(환경부, 2004)에 준하여 실시하였다. pH는 pH meter(Orion Model 250A)로, 알카리도는 적정법을 이용하여, pH 4.3까지 적정함으로써 측정하였다. NO_3^- , NO_2^- 그리고 SO_4^{2-} 등의 음이온 분석은 0.1µm membrane으로 여과한 후 음이온분석용 column(Transgenomic, IC Sep ANSC)과 conductivity detector(Waters, 432 Conductivity Detector)가 부착된 Ion chromatography (Dionex, DX-500)로 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 인공폐수 적용 결과

실험기간 중 포기조의 유기물 용적부하는 약 0.2 kg SCOD/m³-day, F/M비는 약 0.1kg SCOD/kg MLVSS-day로 운전하였고, 유기물의 제거효율은 전체 기간에서 모두 90%이상이었다. 포기조의 MLVSS 농도는 실험기간동안 별도의 조절 없이 평균 1,870 mg/L(970~2,280mg/L)을 유지하였다.

3.1.1. 질소

Fig. 3에 운전기간동안 유입수 및 유출수의 NH_4^+-N 농도를 나타내었다. NH_4^+-N 의 질산화 효율은 운전 기간동안 phase 2를 제외하고 99% 이상의 높은 효율을 보였다. Phase 2에서는 DO 농도를 0.4~0.6mg/L로 감소시켰으며, 그 결과 질산화 효율은 약 64%로 크게 저하하였다. Phase 3에서는 DO 농도를 1.0~2.0mg/L로 상향 재조정하였고, 그 결과 99% 이상의 높은 질산화 효율을 얻을 수 있었다. 일련의 실험을 통하여 폭기조 내에서 질산화 효율은 DO 농도 1.0mg/L 이상에서는 DO 농도의 감소에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 질산화가 안정될 수 있는 요인으로서 매디아 역할을 하는 섬모상 표면에 긴 SRT가 요구되는 질산화균이 고농도로 부착되어 질산화균의 증식에 유리한 환경이 폭기조 내에 조성되어 있기 때문으로 판단된다. Yoo 등(1999)은 질산화 및 탈질 동시 진행시 요구되는 최적의 DO 농도는 약 1.3mg/L라고 제시하였는데, 이는 본 연구의 결과와 대략 일치하였다.

Fig. 4에 섬모상 내의 황 탈질 반응에서 NO_3^--N 의 유입부하와 제거속도와의 관계를 나타내었다. NO_3^--N 의 유입부하는 phase 1, 2, 3에서 질산화된 NO_3^--N 가 모두 황층으로 유입된다는 가정하에 계산되었다. 섬모상 내에 충전된 황 입자의 용적은 9%(1.98L)였다. Phase 1에서는 상대적으로 높은 DO 농도를 바탕으로 질산화가 진행되어, 황층으로의 유입부하는 약 0.50kg $\text{NO}_3^--\text{N}/\text{m}^3\text{-day}$, 제거속도는 황 충전 용적 기준으로 약 0.10kg $\text{NO}_3^--\text{N}/\text{m}^3\text{-day}$ 로써 약 20%의 효율

을 보였다. 반면에 phase 3에서는 phase 1에 비해 다소 낮은 0.44kg $\text{NO}_3^--\text{N}/\text{m}^3\text{-day}$ 의 유입부하에서 약 50%인 0.22kg $\text{NO}_3^--\text{N}/\text{m}^3\text{-day}$ 가 제거되어 phase 1에 비해 큰 제거효율 및 제거속도를 나타내었다. 한편 DO 농도가 낮은 phase 2에서는 0.30kg $\text{NO}_3^--\text{N}/\text{m}^3\text{-day}$ 의 낮은 유입부하에서 phase 3의 결과와 비슷한 수준의 0.20kg $\text{NO}_3^--\text{N}/\text{m}^3\text{-day}$ 의 제거속도가 얻어져, 본 프로세스의 DO 조절에 따른 탈질속도의 상한치는 약 0.20kg $\text{NO}_3^--\text{N}/\text{m}^3\text{-day}$ 인 것으로 나타났다.

섬모상 내의 황 탈질에 의한 탈질효율이 phase 1에서 약 20%를 나타냈으나, DO 농도를 감소시킨 phase 2에서 탈질효율이 약 48%로 두 배정도 상승한 것은 *Thiobacillus denitrificans*(Beijerinck, 1920)와 *Thiomicrospira denitrificans*(Hoor, 1981) 등과 같은 황 탈질 미생물들이 phase 1에서는 산소의 방해작용으로 정상적인 탈질을 수행하지 못한 것에 기인한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Lampe와 Zhang(1996)의 실험을 통해서 확인할 수 있는데, 그들은 혐기성 조건이 호기성 조건에 비해 DO나 질산화에 의한 방해가 상대적으로 적어 효과적으로 황 탈질 반응이 이루어지므로 NO_3^--N 의 제거에 훨씬 유리하다고 하였다. 또한 Justin과 Kelly(1978)는 12 μM 이상의 DO에서 *T. denitrificans*의 yeild 및 NO_3^--N 환원요소가 감소하기 때문에 탈질반응이 저해된다고 하였다.

따라서, 본 실험의 결과를 통해 황 탈질 반응을 최대화하기 위해서는 phase 1보다는 phase 2와 phase 3과 같이 DO 농도가 낮은 구간에서 더 효과적이었다. 그러나 DO 농도가 너무 낮으면 질산화 효율에 악영향을 미쳐 전체 질소 제거율이 악화되므로 DO 농도

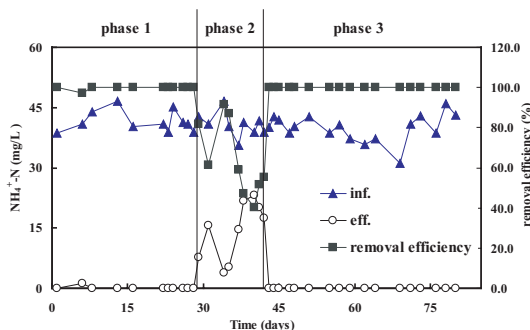


Fig. 3. Concentrations of NH_4^+-N in the influent and effluent of the reactor.

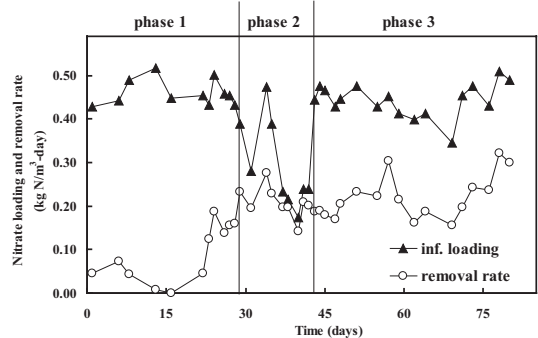


Fig. 4. Variations of nitrate loading rate and removal rate.

Table 3. Removal of T-N by Submerged Cilia Media Packed with Granular Sulfur in Aeration Tank

Phase	Influent T-N (avg.)		Effluent T-N (avg.)		Removal (avg.)	
	Conc. (mg/L)	Load (kg/m ³ -d)	Conc. (mg/L)	Rate (kg/m ³ -d)	Efficiency (%)	
1	44.8	0.04	33.9	0.01	24.3	
2	44.6	0.04	22.9	0.02	48.7	
3	43.4	0.04	20.4	0.02	53.0	

는 질산화 효율의 감소를 최소화할 수 있는 수준에서 결정해야 한다.

Table 3에 각 phase별 T-N에 대한 유입수, 유출수의 농도, 유입부하 및 제거속도의 평균값을 나타내었다. DO농도가 가장 높았던 phase 1을 제외하고는 phase 2, phase 3에서 반응조 용적 당 0.02kg N/m³-day의 질소제거속도를 보였다. T-N의 제거효율은 phase 1과 phase 3에서 각각 24.3% 및 53.0%로 나타났다. 이와 같은 결과를 통해 Phase 3의 운전조건이 탈질반응이 일어나는데 더 유리함을 확인할 수 있었다.

3.1.2. 알칼리도

황 탈질 반응이 유기물을 이용하는 중속영양 탈질과 다른 큰 특징중의 하나는 수소이온의 생성으로 인해 알칼리도를 소모한다는 사실이다. 따라서 황 탈질에서는 알칼리도의 소모에 의한 pH 저하를 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 연구에서는 질산화와 황 탈질에 소모되는 총 알칼리도를 기준에 제시된 양론식을 토대로 계산하여 유입수에 첨가하였다.

Fig. 5에 양론식을 통한 이론 알칼리도 소모량과 실제 알칼리도 소모량을 비교하여 나타내었다. 즉, 질산화에 의해 소모된 알칼리도비는 7.14g CaCO₃/g NH₄⁺-N, 황 탈질에 의해 소모된 알칼리도비는 4.57g CaCO₃/g NO₃⁻-N로 가정하여 이론적 총 알칼리도의 소모량을 계산하였다. 이 과정에서 질산화를 통해 생성된 미생물 합성량은 고려하지 않았다. 질산화와 황

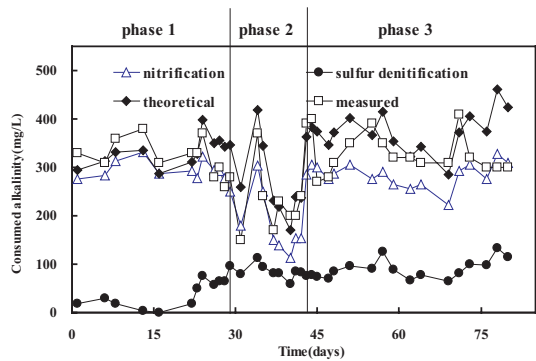
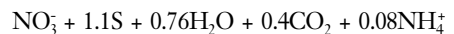


Fig. 5. Comparison of theoretical required alkalinity and measured alkalinity.

탈질에 소모된 알칼리도 소모량의 구분은 이론값을 통한 계산에 의해 산정하였으며, 이때 제거된 NH₄⁺-N은 모두 질산화 되었다고 가정하였고, 제거된 NO₃⁻-N은 모두 황탈질에 의해 제거된 것으로 가정하였다. 먼저 phase 1과 phase 3에서 질산화를 통해 소모된 평균 알칼리도는 각각 298mg CaCO₃/L, 286mg CaCO₃/L로 나타났고, 황 탈질에 의해 소모된 평균 알칼리도는 phase 1과 phase 3에서 각각 36mg CaCO₃/L 및 90mg CaCO₃/L로 큰 차이를 보였다. 이를 통해서도 phase 1에서 황 탈질 반응이 원활히 이루어지지 않았음을 확인할 수 있었다. 이를 토대로 이론적 알칼리도 소모량을 실제 알칼리도 소모량과 비교하면 phase 1에서는 실제소모량(340mg CaCO₃/L)과 이론적 소모량의 차이가 거의 없음을 확인할 수 있었고, phase 2에서는 실제소모량(331mg CaCO₃/L)이 이론적 소모량에 비해 약 40mg CaCO₃/L 정도 작은 것으로 나타났다. Phase 3에서 알칼리도의 평균 소모비는 약 4.52g CaCO₃/g NO₃⁻-N이었으며, 이는 양론식에 의해 제시된 값과 거의 일치하였다.

3.1.3. 황산이온

황 탈질에서는 양론식에 따라 제거된 NO₃⁻-N에 비례하여 황산이온이 생성된다. Batchelor와 Lawrence(1978)는 실험을 통해 다음과 같은 식을 제시하였는데 제시된 양론식을 통해 황산이온 생성비를 구해보면 7.54g SO₄²⁻/g NO₃⁻-N이다.



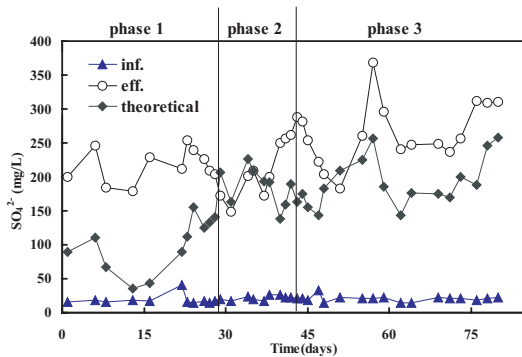


Fig. 6. Variation of sulfate in the reactor and theoretical sulfate production.

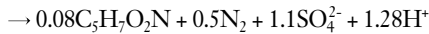


Fig. 6에 유입수와 유출수의 황산이온 측정치와 양론식에 의한 이론적인 황산이온 생성량을 나타내었다. phase 1에서 실제 생성된 황산이온은 207mg SO₄²⁻/L로 이론치와 비교하여 3배 이상 생성되었으며, phase 2에서는 그 차이가 크게 감소하여 양론식에 가까운 황산이온이 생성되었다. phase 3에서는 이론치에 비해 두 배정도 많은 황산이온이 생성되었다.

이와 같은 원인은 호기성 조건인 폭기조에서 존재하는 비탈질균의 일종인 *T. thooxidans* 등의 황을 이용하는 미생물의 활동에 기인한 것으로 판단된다.

이와 같이 DO농도가 1mg/L 이상인 phase 1, phase 3에서 예측값에 비하여 높은 황산이온이 생성되었는데 이는 알칼리도 소비에도 영향을 미쳐 phase 1, phase 3에서 이론값에 비하여 많은 양의 알칼리도가 소모된 것을 확인할 수 있었다.

3.2 실제 하수 적용 결과

S하수처리장의 1차 처리수를 유입수로 하고 S하수처리장과 동일한 F/M비로 실험을 진행하였다. 단, 유입수에는 황 이용 독립영양 탈질시 소모되는 알칼리도를 인위적으로 보충해 주었다.

3.2.1. 질소

Fig. 7에 유입수와 유출수의 NH₄⁺-N농도를 나타내었다. 유입수의 평균 NH₄⁺-N농도는 23.3mg/L였으며, 유출수의 평균 NH₄⁺-N농도는 9.1mg/L로써 약

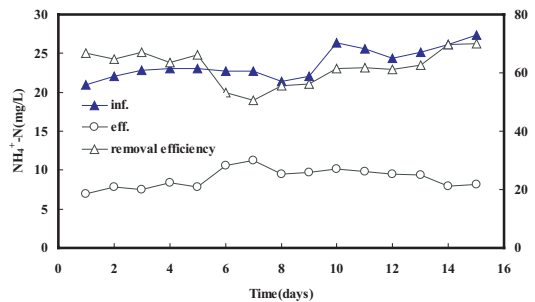


Fig. 7. Concentrations of NH₄⁺-N in the influent and effluent of the reactor.

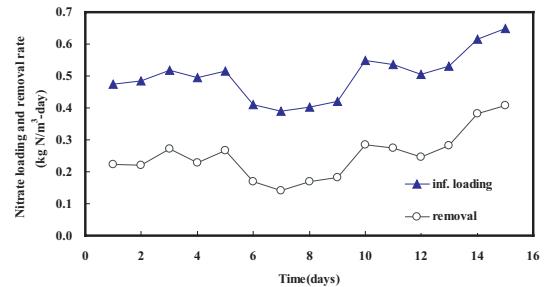


Fig. 8. Variations of nitrate loading rate and removal rate.

60%의 비교적 안정된 질산화 효율을 보였다. 이를 NH₄⁺-N의 유입부하와 제거속도로 계산한 결과, NH₄⁺-N의 유입부하는 운전기간동안 평균 0.07kg N/m³-day였으며, 이에 따른 제거속도는 0.04kg N/m³-day로 나타났다.

Fig. 8에는 섬모상내의 NO₃⁻-N 유입부하와 황 이용 탈질에 의한 NO₃⁻-N의 제거속도를 나타내었다. 반응조 내 질산화된 NO₃⁻-N가 모두 섬모상 내로 유입될 때 NO₃⁻-N의 유입부하는 평균 0.48kg N/m³-day였으며, 그에 따른 황 이용 탈질반응에 의한 NO₃⁻-N의 제거속도는 평균 0.23kg N/m³-day로 나타났다.

본 연구의 유입수와 유출수 T-N농도 및 S하수처리장 처리수의 T-N농도를 Fig. 9에 나타내었다. 본 연구에서의 T-N제거효율은 43% 나타난 반면 S하수처리장의 T-N제거효율은 약 20%로 나타나, 본 공정이 일반 표준활성슬러지공정으로 운전 중인 S하수처리장의 처리수보다 T-N제거효율이 높은 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 공정의 적용 시 보다 효율적인 영양염류의 제거를 위한 대안제시가 가능할 것

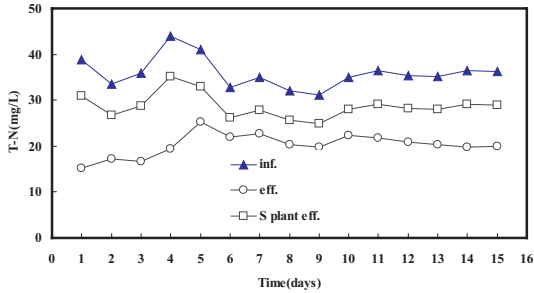


Fig. 9. Variations of T-N concentration at the reactor and S plant.

으로 보인다. 또한 기존의 연구(추인준, 2001)에서 섬모상의 유·무에 따른 질소제거를 비교실험 하였는데 섬모상이 부착된 경우 약 1.5배 더 높은 탈질효율을 보이는 것으로 나타나 그 결과를 섬모상 유·무에 따른 케이싱 내부의 DO농도 차이로 판단하였다. 질산화는 섬모상의 존재 시 질산화 속도가 0.17kg N/m³-day로 나타났고, 섬모상이 존재하지 않는 경우는 0.16kg N/m³-day으로 나타나 섬모상의 존재 시 질산화율도 우수한 것으로 나타났다. 결국 황 충전 섬모상 반응조에서 섬모상의 부착 및 황 충전율의 변화를 통해 T-N제거효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

3.2.2. 알칼리도

앞에서 언급한 바와 같이 황이용 독립영양 탈질시 알칼리도가 소모되기 때문에 유입수에 약 180mg CaCO₃/L의 알칼리도를 공급하였다. 유입수의 알칼리도는 평균 370mg CaCO₃/L의 농도로 일정하게 유입되었고, 유출수의 알칼리도는 260mg CaCO₃/L의 농도로 유출되었다.

Fig. 10에 양론식을 통한 이론 알칼리도 소모량과 실제 알칼리도 소모량을 비교하여 나타내었다. 여기서, 질산화 및 탈질에 소모되는 알칼리도를 각각 7.14g CaCO₃/g NH₄⁺-N, 4.57g CaCO₃/g NO₃⁻-N로 하여 계산하였다. 그 결과, 이론 알칼리도 소모량은 평균 135mg CaCO₃/L로 나타났으며, 실제 알칼리도 소모량은 평균 110mg CaCO₃/L로 약간의 차이를 보였다. 이는 섬모상 외부에 고농도로 부착되어 있는 미생물과 낮은 DO농도로 인하여 섬모상 내부로의 질산화액의 침투시에 다소의 중속영양 탈질이 일어나 알칼리도가 생성됨으로서 나타난 현상으로 사료된다.

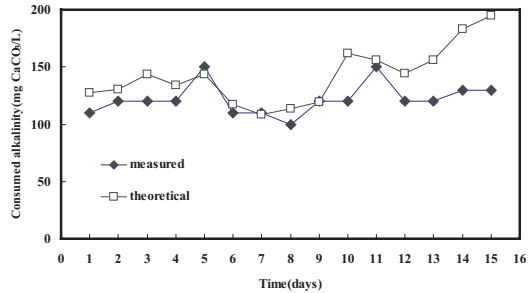


Fig. 10. Comparison of theoretical consumed alkalinity and measured alkalinity.

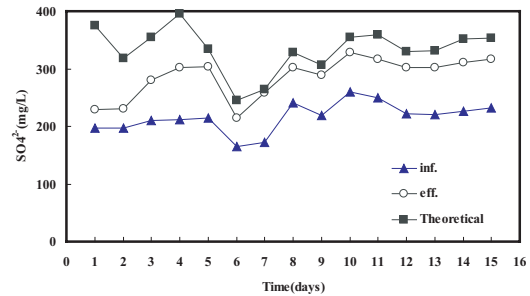


Fig. 11. Variation of sulfate concentration at the reactor and theoretical sulfate production.

3.2.3. 황산이온

Fig. 11에 유입수와 유출수의 황산이온 농도와 양론식에 의한 황산이온 생성량을 나타내었다. 유입수의 황산이온은 160~260mg SO₄²⁻/L 정도의 변화폭을 가지고 유입이 되었으며, 유출수의 황산이온은 210~330mg SO₄²⁻/L범위의 농도로 유출되었다. 예측값은 220~380mg SO₄²⁻/L로 실제생성량과 비교하였을 때 다소 높은 값을 나타내었으나 전체적으로 큰 차이는 없었다.

4. 결론

표준 활성슬러지 공정에 황 충전 섬모상의 투입만으로 별도의 시설을 추가하지 않고도 질산화 및 탈질을 동시에 수행할 수 있는 공정에 대한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 황 충전 섬모상 반응기에서 DO농도의 변화에

따라 질산화 효율이 가장 큰 변화를 나타냈으며, 황 탈질 효율은 DO농도가 낮을 때 최대 탈질율을 보였고 DO 조절을 통해 전체적으로 T-N제거율이 50% 이상으로 증가하였다.

2) 황 충전 섬모상 반응기에서 질산화와 탈질을 위한 최적의 DO농도는 1.0~2.0mg/L 수준으로 기존의 연구(DO농도 약 1.3mg/L)와 일치하였으며, 탈질속도의 상한치는 약 0.20NO₃⁻-N/m³-day인 것으로 나타났다. 본 연구의 황 충전 부피 비는 약 9%로써 그 이상의 황 충전비에서는 더 큰 탈질효율이 기대된다.

3) 인공폐수를 적용한 실험에서의 포기조 MLVSS 농도는 평균농도 1,870mg/L였으며, 실험수를 적용한 실험에서는 S처리장과 운전조건(F/M비 ≈ 0.2kg SCOD/kg MLSS-day)을 같게 하기 위하여 MLSS농도를 평균농도 1,450mg/L로 유지하였다.

4) S하수처리장의 T-N제거는 평균 20%의 제거효율을 보였으며, 본 연구의 T-N제거는 평균 43%의 제거효율을 보임으로써 실 규모 적용의 가능성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 인하대학교의 연구비지원에 의해 수행되었으며, 이에 인하대학교에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. 이희자, 배재호, 조광명 (2000) 메탄산화균을 이용한 질산화와 탈질의 동시수행 및 반응기작, *대한환경공학회지*, 22 (8), pp. 1447-1457.
2. Koenig, A. and Liu, L.H. (2001) Kinetic Model of Autotrophic Denitrification in Sulfur Packed-Bed Reactor, *Water Res.*, 35(8), pp. 1969-1978.
3. Villaverds S., Encina P.A.G, Polanco F.F. (1997) Influence of

- pH over nitrifying biofilm activity in submerged biofilters, *Wat. Res.*, 31, pp. 1180-1186.
4. 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.
 5. APHA, AWWA, and WEF (1998) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th edition, Washington DC, USA.
 6. 환경부 (2004) 수질환경오염공정시험법, 환경부고시 제 2004-188 호.
 7. Hyung Seok Yoo, Kyu Hong Ahn., Hyung Jib Lee, Kwang Hwan Lee, Young Jung Kwak and Kyung Guen Song (1999) Nitrogen removal from synthetic wastewater by simultaneous nitrification and denitrification(SND) via nitrite in an intermittently-aerated reactor, *Wat. Res.*, 33(1), pp. 145-154.
 8. Beijerinck, M.W. (1920) Chemosynthesis at denitrification with sulfur as source of energy, *Proceedings Amsterdam Academy of Science*, 22, February 28, pp. 898-908.
 9. Hoor, T.A. (1981) Cell yield and bioenergetics of *Thiomicrospira denitrificans* compared with *Thiobacillus denitrificans*, *Antonie Van Leeuwenboek*, 47(3), pp. 231-243.
 10. Lampe, D.G. and T.C. Zhang, (1996) Evaluation of sulfur based autotrophic denitrification, *Proceedings of the 1996 HSRC/WERC Joint Conference on the Environment*, Albuquerque, New Mexico, May 21.
 11. Justin, P. and Kelly, D.P. (1978) Growth kinetics of *Thiobacillus denitrificans* in anaerobic and aerobic chemostat culture, *J. Gen. Microbiol.*, 107, pp. 123-130.
 12. 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.
 13. 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.
 14. Batchelor, B. and Lawrence, A.W. (1978) A Kinetic Model for Autotrophic Denitrification using Elemental Sulfur, *Water Res.*, 12, pp. 1075-1084.
 15. 추인준 (2001) 황 충전 섬모상 담체를 이용한 질산화·탈질 동시수행, 인하대학교 석사학위 논문.