

OD3 질산화와 탈질공정의 분리를 통한 질소제거에 관한 연구

이영호, 장정희, 김종필, 이우태
현대건설(주) 기술개발원

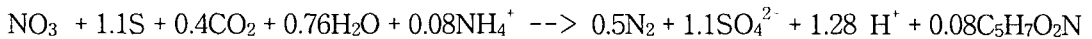
1. 서 론

일반적으로 하·폐수 중에 함유되어 있는 질소 제거를 위해 가장 많이 이용되고 있는 방법으로는 독립영양미생물을 이용한 질산화와 종속영양미생물에 의한 탈질을 하는 생물학적 질소 제거법이 많이 이용되고 있다. 질산화에 관여하는 *Nitrosomonas* 와 *Nitrobactor* 등과 같은 독립영양미생물들은 종속영양미생물에 비해 성장속도가 매우 느리며 미생물 증식량도 적다. 따라서 다량의 질산화균을 반응조내에 확보 및 유지하지 않으면 안된다. 질산화 반응은 산소가 필요로 하고, 1g의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 를 산화하는데 7.1mg 알칼리도(CaCO_3)가 소모되므로 pH의 완충작용을 필요로 한다. 한편, 탈질반응은 용존산소가 거의 없고 질산성 질소가 존재하는 상태, 즉 무산소 상태에서 *Bacillus*, *Pseudomonas* 등과 같은 종속영양미생물에 의해 질산성 질소가 질소가스로 전환되는 과정을 말한다. 종속영양미생물에 의한 탈질반응은 전자공여체로서 유기탄소원을 필요로 하고, 일반적으로 탈질을 위한 외부 탄소원으로 가장 많이 사용되고 있는 것이 메탄올이다. 메탄올을 탄소원으로 이용할 경우 화학양론적으로 1g의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 를 환원하기 위해서 1.9g의 메탄올(2.86g COD)이 소요되지만 실질적으로 탄소원은 에너지 생성을 위한 전자의 공급외에 종속영양미생물의 세포생성을 위한 탄소원 만큼 더 요구된다. 따라서 C/N비는 탈질 반응에서 가장 중요한 인자 중의 하나로서 유기물이 부족하게 되면 완벽한 탈질을 기대하기 어렵다. 또한 메탄올 첨가의 경우에는 적절한 첨가량의 제어가 곤란하고, 처리수에 메탄올이 잔존해서는 안된다.

일반적으로 하/폐수중에 함유되어 있는 질소제거를 위한 여러 가지 고도처리 방법들이 개발되어 왔으며, 대표적인 방법들로는 MLE(Modified Ludzack-Ettinger), A2O, UCT (University of Cape Town), MUCT(Modified University of Cape Town), VIP(Virginia Initiative Plant) 등의 생물학적 고도처리 공법들이 있다. 상기와 같은 방법들은 활성슬러지를 이용한 순환식·질산화 탈질법으로 혐기조, 무산소조, 그리고 호기조로 이루어지며 하수를 순환시켜 무산소조에서는 탈질이 일어나고, 호기조에서는 질산화가 일어나게 하여 질소를 제거한다. 이와 같은 방법들은 반응조를 각각 별도로 설치하지 않으면 안 되므로 넓은 부지 면적이 필요하며, 호기조의 용량을 크게 해야만 한다. 한편 반응조 용적이 작으면서 안정된 처리수를 얻기 위해서 활성슬러지 또는 질산화균이나 탈질균을 고정화한 담체를 충전하는 방법도 있지만, 담체 비용이 높다는 단점이 있다. 위에 기술한 어떤 방법들도 질소 농도가 높고 유기물의 농도가 낮은, 즉 C/N비가 낮은 하수인 경우에는 질산화에 필요한 산소 공급에 많은 에너지가 필요하고, 탈질을 위해서는 전자공여체를 첨가하지 않

으면 안 되므로 약품비용이 과다하게 소모되는 등의 문제점이 있었다.

한편, 황을 이용한 독립영양탈질은 외부 유기탄소원이 필요 없고, 용존산소농도(약 0.2 mg/l)가 낮은 상태에서 운전되며, 슬러지 발생량이 적으므로 최근에 관심을 받고 있다. 황은 자원이 풍부하고 저가로써 저장이 쉽고 취급이 용이하며 물에 쉽게 용해되지 않는 특징을 가지고 있다. 황을 이용한 탈질은 아래의 식과 같이 *Thiobacillus denitrificans* 과 같은 황산화미생물이 HCO₃⁻ 등의 무기탄소를 탄소원으로 이용하고, 최종전자수용체로서 질산성 질소(NO₃-N)를 사용하면서 일어나는 탈질반응이며, 황탈질반응의 최종부산물로 SO₄²⁻이 생성된다.



독립영양상태에서 황탈질로 인해 알칼리도의 양은 일반적으로 3~4 mg CaCO₃/mg NO₃-N(상기 식에서는 4.57 mg CaCO₃/mg NO₃-N) 소모된다. 그리고 1 mg NO₃-N을 제거하는데 7.54mg SO₄²⁻ 발생되고, 1.28 mol 수소이온(H⁺) 생성된다. *Thiobacillus denitrificans*의 성장을 위한 적정 pH는 6.8~8.2 범위이며, DO 농도는 0.3mg/L 이하에서 유지하여야 한다.

본 연구에서는 일반적인 생물학적 고도처리 기술인 A2O공정과 같이 혐기조, 탈질조, 호기조 순의 배열과 침전조 대신, 호기조내에 침지식 분리막을 설치하여 고액분리를 수행함과 더불어 반응조내 미생물을 고농도로 유지하여 유기물 제거와 질산화를 도모하고, 후단에 황탈질 공정을 두어 효율적인 질소 제거능력을 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 운전조건

본 연구에 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같이 유입된 원수가 스크린을 거쳐 MBR 공정과 황탈질 공정을 거치면서 처리되어 방류하는 시스템으로 구성하였다. 본 실험장치는 하루 10m³를 처리할 수 있도록 설계하였으며, 실험대상 원수는 일반 하수보다 질소농도가 높은 오수를 이용하여 실험하였다.

본 연구를 수행하기 위해 오수처리시설(300m³/일)의 유량조정조에서 수중펌프를 설치하여 본 실험장치로 이송하여 실시하였으며, 본 실험장치의 제원과 특성은 <Table-1>에 나타내었다. 그리고 본 실험기간은 약 160일 정도 수행하였다.

<Table-1>에서 보는 바와 같이, MBR 공정과 황탈질 공정의 체류시간은 각각 4시간과 30분을 두었으며, MBR 공정에서 사용한 침지형 분리막은 미쯔비세 레이온에서 생산하는 막을 사용하였으며, 막재질은 폴리에틸렌으로 0.4μm의 막 기공을 가졌으며, 외압식 전량여과 방식을 채택하였다. 그리고 황탈질조에 충전한 여재는 유효경이 4.2mm 입상황을 사용하였으며, 0.48m³의 황을 반응조에 충전하였다. 이에 따른 황탈질 반응조의 공극율은 약 30%로 나타났다. 본 연구를 위해 구성한 MBR 공정과 황탈질 공정에 대한 운전조건은 <Table-2>에 요약하여 나타내었다.

<Table-2>에서 보듯이, MBR반응조의 용존산소는 2~4mg/L를 유지되었고, MLSS 농

도는 4,000~7,000mg/L에서 운전하였다. MBR 공정의 운전방법은 흡입펌프에 의해 한 사이클 운전을 12분 펌프가 가동되고 3분 정지하도록 하였으며, 막 투과유속은 0.4m³/m²/d 으로 유지하였다. 또한 막 차압은 10~45 KPa범위에서 운전이 되었으며, 45KPa 이상시에는 NaOCl(2ℓ/m³)을 사용하여 조 내에서 약품제정을 실시하였다.

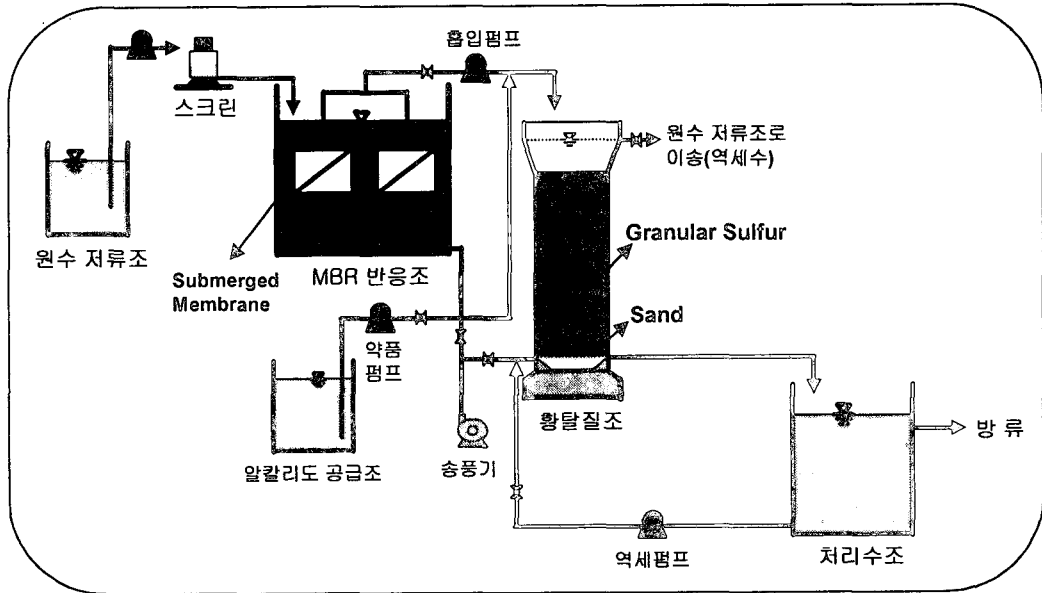


Fig. 1. Schematic Diagram of Pilot Plant(10m³/day).

<Table-1> Characteristics of MBR & Sulfur Packed-bed Reactor

구분	제원	특성
MBR 공정	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 1.0mWx1.0mLx2mH ◦ 실용적: 2 m³ ◦ 소요용적: 1.7m³ ◦ 체류시간: 4시간 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 막재질: Polyethylene ◦ 막형태: Hollow Fiber ◦ 막기공: 0.4μm ◦ 여과방식: 외압식 전량여과
황탈질 공정	<ul style="list-style-type: none"> ◦ ∅0.7m x 1.7mHx2조 ◦ 실용적: 0.65m³x2조 ◦ 황충진량: 0.48m³x2조 ◦ 체류시간: 30분 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 여재: 입상 황 ◦ 유효경: 4.2mm ◦ 균등계수: 1.25 ◦ 공극율: 30%

그리고 황탈질 공정은 MBR 공정을 거쳐 유입되는 질소 부하가 0.2~0.7kg/d 이었으며, 황탈질 반응조를 거친 용존산소는 0.2~1mg/L 범위내에서 운전되었다. 황탈질조의 여과 속도는 3m/hr로 유지하였으며, 탈질에 소요되는 알칼리도(NaHCO₃를 사용)를 약 80~180mg/L(CaCO₃)를 정량펌프로 공급하였다. 황탈질조의 막힘 현상과 탈질 효율을 유지시키기 위해 3~5일 간격으로 역세척을 실시하면서 황탈질 반응조를 교대로 병행 운전하였

다. 황탈질 반응조의 역세척 방법은 공기와 물 병행 세척방법을 채택하였다. 송풍기로 공기를 1분간 조내로 주입시키면 황입자가 유동되어 조내의 질소가스가 외부로 빠져나가게 한 다음, 역세척수(약 80 ℓ/min의 유량)는 최종처리수를 사용하였으며 황탈질조 하부로 유입시켜 5~10분 정도 역세척을 실시하였다. 세척된 월류수는 스크린 전단으로 이송하여 이물질들을 다시 제거하도록 하였다.

<Table-2> Operation Conditions of MBR & Sulfur Packed-bed Reactor

구 분	운 전 조 건	
MBR 공정	<ul style="list-style-type: none"> • DO: 2~4mg/L • MLSS: 4,000~7,000mg/L • F/M비: 0.02~0.2kgBOD/kgMLSS/d • 수온 : 10~25℃ • 운전모드: 12분 ON/3분 OFF 	<ul style="list-style-type: none"> • 막투과유속: 0.4m³/m²/d • 막 차압: 10~45 KPa • 공기공급량: 0.5m³N/min • 세정방법: MBR 조내 직접세정 • 세정액: NaOCl(2 ℓ / m²) • 세정주기: 1회/2개월
황탈질 공정	<ul style="list-style-type: none"> • DO : 0.2~1mg/L • pH : 6~7.3 • 수온: 10~25℃ • N 부하: 0.2~0.7kg/d • 알칼리 공급량: 80~180mg/L • 황소모량: 2.3%/년(충진량대비) 	<ul style="list-style-type: none"> • 여과속도: 3m/hr • 역세방법: 공기/물 병행 세정(공기 1분 세정후 수세정) • 역세빈도: 3~5일 • 역세속도: 80 ℓ /min(물)+0.5m³N/min(공기)

2.2 분석방법

본 실험장치의 시료채취는 유입 원수, MBR 처리수 그리고 황탈질 공정의 처리수에서 실시하였으며, 채취한 시료에 대해서 BOD, COD_{Cr}, 총질소(T-N), 암모니아성 질소(NH₃-N), 질산성 질소(NO₃-N), 탁도, pH, 수온, 알칼리도 그리고 Sulfate 농도를 각각 분석하였다. 각 시료에 대해 암모니아성 질소, 질산성 질소 그리고 Sulfate 농도는 이온크로마토그래피(DX-300, DIONEX)를 이용하여 분석하였으며, 탁도, DO와 pH는 탁도계(HACH 2100P), DO메타(YSI 55) 그리고 pH메타(HANNA HI8424)를 이용하여 각각 측정하였다. 이외의 항목들은 "Standard Methods(APHA, 19th edition, 1995)에 의거하여 분석하였다.

황 탈질 반응조의 미생물 seeding 방법은 서해안 갯벌에서 저니를 채취하여 모래성분과 이물질을 sieve(mesh no 50, 300 μ m)한 다음 약 5 리터 정도를 황 탈질조로 주입시켜 환경에 적응하도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구는 오수를 유입 원수로 하여 MBR 공정에 의한 유기물 제거와 질산화를 통해 암모니아성 질소를 질산성 질소로 전환시키고, 황을 이용한 독립영양탈질은 외부 유기탄

소원의 주입 없이 질산성 질소를 질소가스로 전환시키는 공정으로 이루어진 파일럿 실험 장치(10m³/일)를 이용하여 약 160일간 운전한 결과를 나타내었다.

3.1 유기물 제거

본 실험은 2004년 1월부터 6월까지 약 160일 동안의 수온 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 겨울철 수온은 평균 15°C(11.2~17.7°C)이었으며, 봄의 평균 수온은 20.7°C(15.1~27°C) 그리고 5월과 6월의 평균 수온은 26.7°C(20.4~28.7)로 나타났다.

본 실험기간 동안의 유기물 제거는 Fig. 2과 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이, 원수의 BOD와 COD_{Cr} 농도는 각각 평균 146mg/L, 193mg/L으로 유입되어 MBR 공정의 유출수에서 각각 평균 1.6mg/L, 9.3mg/L로 나타났다. 그리고 황탈질 공정을 거치면서 평균 BOD와 COD_{Cr} 농도는 각각 10.7mg/L, 19.8mg/L으로 증가하여 전체적으로 유입 원수대비 각각 92.1%와 89.2%의 제거율을 보여주었다.

그리고 본 시스템의 공정별 탁도변화를 Fig. 4에서 나타내었다. 유입 SS 농도는 평균 126NTU 이었으며, MBR 공정에서는 평균 0.5mg/L으로 나타나 거의 제거되었으나, 황탈질 공정에서는 평균 2.9mg/L로 약간 증가하였으나, 유입 원수대비 약 98%의 제거율을 나타내었다. 따라서 본 시스템에서는 거의 완벽한 탁도 제거율을 보여주었다.

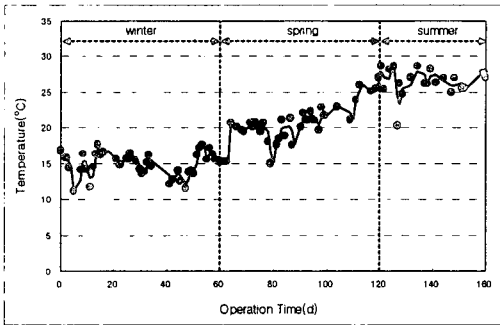


Fig. 2. Time courses of Temperature.

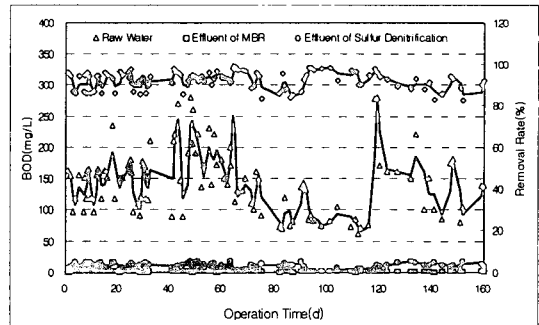


Fig. 3. Time courses of BOD.

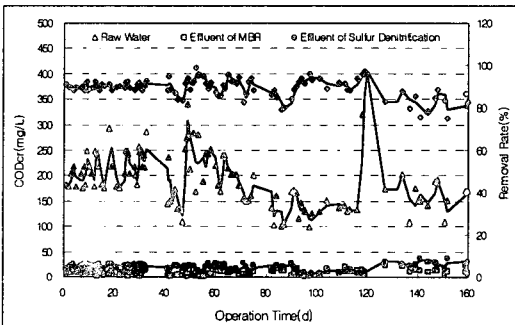


Fig. 4. Time courses of COD_{Cr}.

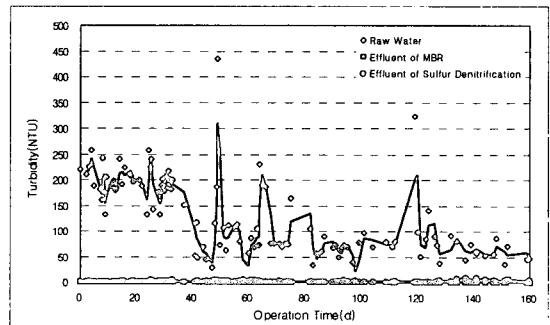


Fig. 5. Time Courses of Turbidity.

한편, MBR 공정에서 황탈질 공정을 거치면서 BOD와 CODcr 농도와 탁도가 증가한 이유는 R Yamamoto-Ikemoto(2000) 등에 의하면 중속영양탈질균의 활성도가 1.4~5.4mgN/gBiomass·hr인 반면에 황을 이용하는 독립영양탈질균의 활성도는 2.9~5.0mgN/gBiomass·hr으로 나타나 미생물의 성장속도는 다른 독립영양탈질균보다 훨씬 빠른 것을 알 수 있다. 따라서 황 탈질균의 빠른 성장속도에 의해 황 표면으로부터 탈리되는 미생물에 의해 유출수의 유기물 농도가 높아지는 것으로 판단된다.

3.2 질소 제거

본 실험장치의 MBR 공정과 황탈질 공정을 거치면서 질산화와 탈질과정을 검토하기 위해 단위공정별로 총질소, 암모니아성 질소 그리고 질산성질소농도의 변화를 검토하였다. 따라서 운전시간에 따른 각 단위 공정별 총질소, 암모니아성 질소 그리고 질산성 질소의 변화를 Fig. 6~Fig. 8에 각각 나타내었다. Fig. 6과 Fig. 8에서 보듯이, 본 실험에서는 운전을 시작한 이후 약 1주일정도 지난 후에 정상상태에 도달되는 것으로 나타났다.

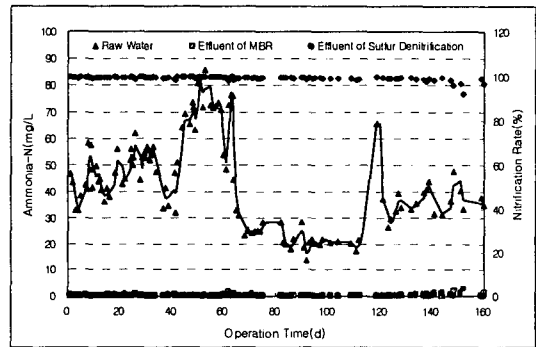
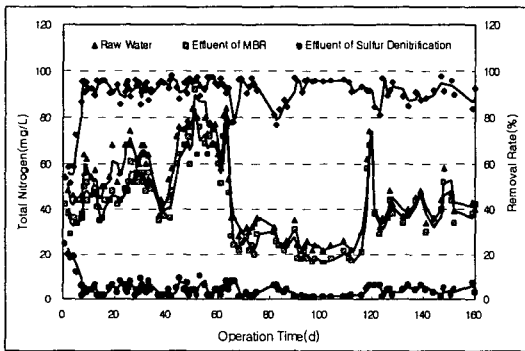


Fig. 6. Time courses of Total Nitrogen(T-N). Fig. 7. Time courses of Ammonia Nitrogen.

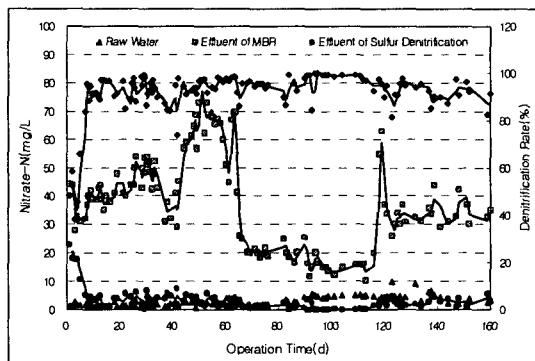


Fig. 8. Time courses of Nitrate Nitrogen.

Fig. 6은 운전시간에 따른 각 공정별 총질소 농도의 변화를 나타내었다. 원수의 평균 T-N 농도는 약 51mg/L으로 유입되어 MBR 공정에서 평균 43.3mg/L으로 나타나 약 14%

의 제거율을 보였주으나, 이때 대부분의 암모니아성 질소는 질산성 질소로 전환되어 황탈질 공정을 거치면서 평균 4.4mg/L으로 나타나 약 91%의 제거율을 보여주었다.

그리고 Fig. 7과 같이, 원수, MBR 처리수, 및 황탈질 처리수의 평균 암모니아성 질소의 농도는 43.8mg/L, 0.3mg/L 그리고 0.4mg/L로 각각 나타났으며, 이때 암모니아성 질소가 질산성질소로 약 99.2%정도 전환되었다. 이는 질산화 효율을 높이기 위해 MBR조내에 침지식 분리막을 설치하여 반응조내 미생물을 고농도(MLSS 4,000~7,000mg/L)로 유지하였기 때문이다.

한편, MBR 공정에서 암모니아성 질소가 대부분 질산성 질소로 전환되어 황탈질 공정을 거치게 되는데, Fig. 8은 운전시간에 따른 질산성 질소의 농도 변화를 나타내었다. Fig. 8에서 보듯이, 유입원수에서 질산성 질소 함유량이 낮으며, 대부분의 질소는 암모니아성 질소로 나타나고 있다. 이때 원수, MBR 처리수 및 황탈질 처리수의 평균 질산성 질소는 2.8mg/L, 38.5mg/L(최대 81mg/L, 최소 10.5mg/L) 그리고 3.1mg/L으로 나타나, 원수대비 처리수의 평균 제거율은 91.2%로 나타나 황을 이용한 탈질반응은 질산성 질소를 제거하는데 탁월한 것으로 나타났다. 따라서 황을 이용한 독립영양탈질에 의해 질소 제거율이 77~98%으로 A2O계열(MUCT, VIP 등)의 고도처리방법에 의한 질소제거율(50~75%)보다 훨씬 탁월한 것으로 판단된다.

3.3 알칼리도 소모량

질산화에 관여하는 *Nitrosomonas* 와 *Nitrobactor* 등과 같은 독립영양미생물들은 종속 영양미생물에 비해 성장속도가 매우 느리고 미생물 증식량도 적기 때문에 다량의 질산화균을 반응조내에 확보하고유지하기 위해 본 연구에서는 MBR 공정을 도입하였다.

질산화 반응은 암모니아성 질소를 질산성 질소로 전환하는데 알칼리도(CaCO_3)가 소모되므로 pH의 완충작용을 필요로 한다. 그리고 황을 이용한 독립영양탈질은 외부 유기탄소원이 필요 없이 황산화미생물이 HCO_3^- 등의 무기탄소를 탄소원으로 이용하며 최종전자수용체로 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)를 사용하면서 일어나는 탈질반응으로 알칼리도가 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 질산화와 황탈질에 소요되는 알칼리도를 검토한 결과 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 9는 운전시간에 따른 각 공정별 알칼리도의 농도 변화를 나타내었으며, 원수, MBR 처리수, 그리고 황탈질 처리수의 평균 알칼리도는 각각 316mg/L(140~590mg/L), 159mg/L(70~266mg/L) 그리고 51mg/L(10~110mg/L)로 나타났다. 본 실험기간 동안, 원수에 함유된 알칼리도의 대부분이 질산화에 의해 소모되었기 때문에 황 탈질에 필요한 알칼리도를 공급하기 위해 MBR 처리수에 알칼리도(NaHCO_3)를 약 80~180mg/L(as CaCO_3)정도를 정량 펌프로 주입하였다. 황 탈질반응에 의해 pH가 저하되기 때문에 처리수의 pH의 완충작용을 위해 최소한 알칼리도가 50 mg/L을 유지하도록 하였다.

그리고 Fig. 10에서는 암모니아성 질소가 질산성 질소로 전환하는데 소요되는 알칼리도와 황탈질에 소요되는 알칼리도의 관계를 나타내었다. Fig. 10에서 보듯이 1g의 암모니아성 질소를 질산성 질소로 전환하는데 약 6.8g의 알칼리도가 소모되었으며, 황 탈질 공정에

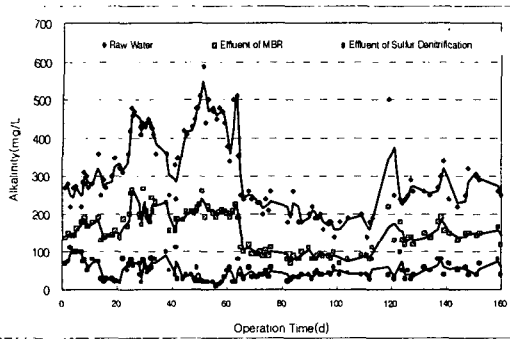


Fig. 9. Time courses of Alkalinity.

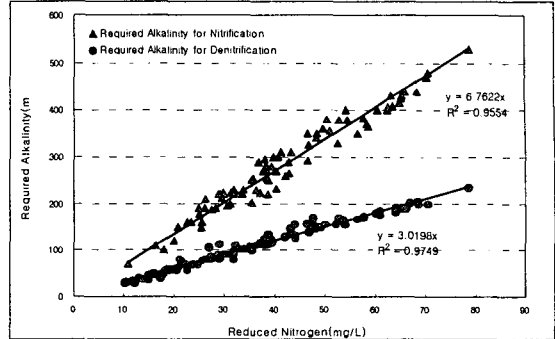


Fig. 10. Relationship between required alkalinity and nitrification & denitrification.

의해 1g의 질산성 질소가 질소가스(N_2)로 전환되는데 약 3.02g의 알칼리도가 소모되는 것으로 나타났다.

3.4 Sulfate 부산물

황을 이용한 탈질반응에 의해 Sulfate(SO_4^{2-})가 부산물로 생성되는데, 이는 하수관거의 혐기성화시에 유해한 황화수소를 유발시킬 수 있으나, 하수와 오수에는 Sulfate에 대한 농도 규제가 현재까지 설정되어 있지 않다. 그러나 WHO(Geneva, 1984)에서는 음용수에 대해 Sulfate 농도를 400mg/L이하로 권장하고 있으며, 미국 EPA에서는 250mg/L이하로 기준을 음용수에 정하고 있다.

이와 같은 이유로 본 연구에서는 실험기간동안 황 탈질에 의해 생성되는 Sulfate 농도 변화를 살펴본 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 11에서 보듯이, 원수, MBR 처리수 그리고 황 탈질조 처리수의 평균 Sulfate 농도는 각각 51mg/L(14~84mg/L), 53mg/L(14~82mg/L) 그리고 315mg/L(120~570mg/L)의

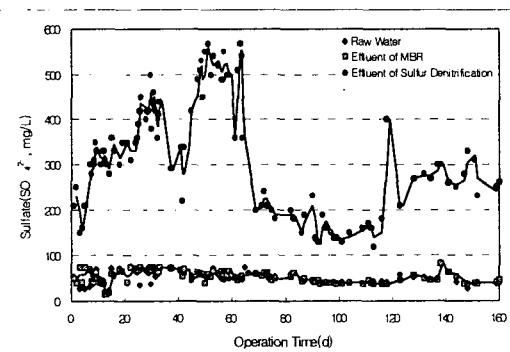


Fig. 11. Time courses of sulfate concentration.

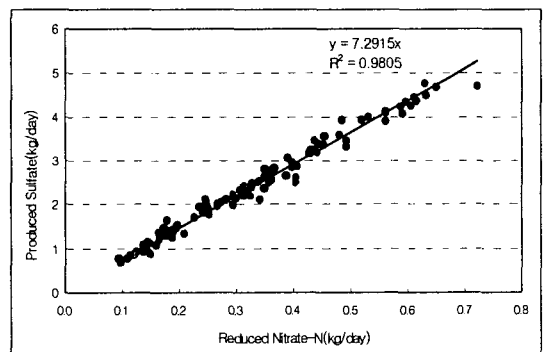


Fig. 12. Relationship between produced SO_4^{2-} & reduced NO_3-N in sulfur denitrification.

로 나타났다. 따라서 황 탈질반응에 의해 평균 264mg/L의 sulfate가 생성되는 것을 알 수 있었다. 그리고 Fig. 12는 황탈질 공정에서 제거된 질산성 질소와 Sulfate 생산량에 대한 관계를 도시하였다. 1g의 질산성 질소가 제거됨에 따라 약 7.3g의 sulfate가 생성되는 것을 알 수 있으며, 질산성 질소가 약 55mg/L이상 제거될 경우에는 황 탈질반응에서 생성되는 Sulfate 농도가 400mg/L(WHO 음용수 권장기준)을 상회할 수 있다. 그리고 생성되는 Sulfate 농도는 황 탈질조로 유입되는 질산성 질소의 농도에 따라 변하게 되므로 방류수역이 해수일 경우에는 해수의 Sulfate 농도가 오히려 훨씬 높기 때문에 별 문제가 없지만, 방류수역이 담수일 경우에는 아주 고농도의 질소를 제거하기 위해서는 Sulfate 문제를 신중히 고려해 보아야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 MBR 공정과 황탈질 공정을 통해 기존의 고도처리공법에 비해 보다 간편하고 탈질기능을 강화시키기 위해 수행하였다. 본 실험에서는 유입 원수를 질소농도가 높은 오수를 선정하여 하루 10m³ 처리용량의 실험장치를 이용하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

MBR 공정과 황탈질공정에 의해 BOD와 CODcr은 각각 92.1%와 89.2%의 제거율과 거의 완벽한 탁도물질의 제거를 보여주었다.

MBR 공정에 의한 99.2%의 질산화율을 통해 황 탈질 공정에서는 약 92%의 탈질율을 나타내어 원수(T-N 51mg/L)대비 처리수의 T-N 제거율은 약 91%로 나타났으며, 기존 고도처리방법들(T-N 제거율 50~70%)에 비해 탁월한 질소 제거효율을 보여주었다.

본 실험의 운전기간 동안에 질산화와 황 탈질에 소요되는 알칼리도는 각각 6.8g CaCO₃/1g NH₄-N, 3.02g CaCO₃/1g NO₃-N으로 나타났으며, 황 탈질반응에 의해 생성되는 Sulfate 량은 7.3g SO₄²⁻/1g NO₃-N으로 나타났다.

따라서 일반적으로 생물학적 고도처리 기술인 A2O공정의 배열과 달리 본 연구에서는 MBR 공정과 황탈질 공정으로 구성하여 실험한 결과, MBR 공정에서 고액분리를 하여 높은 유기물 제거와 질산화를 도모하였으며, 후단에 황을 이용한 독립영양탈질 공정에서는 기존 고도처리기술보다 안정적이고 뛰어난 질소 제거능력을 가진 기술로 평가되었다.

참 고 문 헌

- M.I.M. Soares(2002), "Denitrification of groundwater with elemental sulfur", *Water Research*, Vol.36, p1392~1395
- A. KOENIG & L. H. LIU, K(2001), "Kinetic model of autotrophic denitrification in sulphur packed-bed reactors", *Water Reaseach*, Vol.35, p1969~1978.
- L.H.Liu & A. KOENIG(2002), "Use of limestone for pH control in autotrophic denitrification: batch experiments", *Process Biochemistry*, Vol.37, P885~893.
- C.M. Ho, S.K.Tseng & Y.J. Chang(2001), "Autotrophic denitrification via a novel membrane-attached biofilm reactor", *Letters in Applied Microbiology*, Vol.33,

p201~205

- Tian C. Zhang & David G. Lampe(1999), "Sulfur:Limestone autotrophic denitrification processes for treatment of nitrate contaminated water: batch experiments", *Water Research*, Vol.33, p599~608.
- S.E. Oh, Y.B. Yoo, J.C. Young & I.S. Kim(2001), "Effect of organics on sulfur-utilizing autotrophic denitrification under mixotrophic conditions", *Journal of Biotechnology*, Vol.92, p 1~8.
- Katsuki Kimura, Masahiko Nakamura & Yoshimasa Watanabe(2002), "Nitrate removal by a combination of elemental sulfur-based denitrification and membrane filtration", *Water Research*, Vol.36, p1758~1766.
- R Yamamoto-Ikemoto, T Komori, M Nomuri, Y Ide & T Matsukami(2000) "Nitrogen removal from hydrophnic culture wastewater by autotrophic denitrification using thiosulfate", *Water Science & Technology*, Vol.42, No3~4, p369~376.