

다중 모래 여재를 적용한 부분 포기 Biological Aerated Filter의 효과적인 Total Nitrogen (TN) 제거

Effective Total Nitrogen (TN) Removal in Partially Aerated Biological Aerated Filter (BAF) with Dual Size Sand Media

강정희 · 송지현 · 하정협*

Jeong Hee Kang · JiHyeon Song · Jeong Hyub Ha*

세종대학교 토목환경공학과

(2009년 9월2일 접수, 2010년 1월 13일 수정 ; 2010년 1월 15일 채택)

Abstract

A pilot-scale biological aerated filter (BAF) was operated with an anaerobic, anoxic and oxic zone at $23 \pm 1^\circ \text{C}$. The influent sCOD and total nitrogen concentrations in the feedwater were approximately 250 mg/L and 35 mg N/L, respectively. sCOD removal at optimum hydraulic retention time (HRT) of 3 hours with recirculation rates of 100, 200 and 300% in the column was more than 96%. Total nitrogen removal was consistently above 80% for 4 and 6 hours HRT at 300% recirculation. For 3 hours HRT and 300% recirculation, total nitrogen removal was approximately 79%. Based on fitting results, the kinetic parameter values on nitrification and denitrification show that as recirculation rates increased, the rate of ammonia and nitrate transformation increased. The ammonium loading rates for maximum ammonium removed were 0.15 and 0.19 kg $\text{NH}_3\text{-N}/\text{m}^3\text{-day}$ for 100% and 200% recirculation, respectively. The experimental results demonstrated that the BAF can be operated at an HRT of 3 hours with 200 – 300% recirculation rates with more than 96 % removal of sCOD and ammonium, and at least 75% removal of total nitrogen.

Key words : Nitrification, Biological Aerated Filter, Denitrification, Hydraulic Retention Time, Recirculation

주제어 : 질산화, BAF, 탈질화, 수리학적 체류시간, 순환

1. 서 론

최근 몇 년 동안 미국의 중서부 지역 주(state)정부 산하 기관에서는 각 지역의 하천/호수 수와 멕시코 걸프만 지역의 부영양화와 수질저하 문제가 대두됨에 따라, 유입 유량 $0.04\text{m}^3/\text{s}$ 또는 일 처리 용량 $3780\text{m}^3/\text{day}$ 의 소규모 하수처리장에 대해 총질소(TN)와 총인(TP)의 배출농도제한을 NPDES(National Pollutant Discharge Elimination System)에서 제시한 값에 맞추도록 규제 중이거나 규제 예

정에 있다. 규제 대상 지역의 소규모 하수처리장에서는 질소나 인에 대한 제거가 고려되지 않은 유기물 처리만을 주목적으로 하는 호기성 하수처리 시설이 운영되고 있다. 그래서 NPDES에서 제시하는 규제기준을 만족하기 위해 질소 및 인 처리를 위해 하수처리시설을 확대/변경하거나, 하수처리 유출구 후단에 추가 처리장치를 추가 장착하여 운영 중에 있다.

생물학적 질소제거 방법은 액상의 유기질을 암모니움(NH_4^+) 이온 형태로 전환시킨 후, 이를 호기성(aerobic)상

* Corresponding author Tel:+82-2-462-7688, Fax:+82-2-3408-3332, E-mail: jeonghha@sejong.ac.kr(Ha, J.H.)

태에서 *nitrosomonas*나 *nitrobacter*같은 미생물에 의해 NO_2^- , NO_3^- 형태로 산화시킨다(Nitrification). 이후 무산소(anoxic)상태를 유지하여, 미생물에게 산소 대신 NO_2^- , NO_3^- 를 전자수용체(electron acceptor)로 제공하여 N_2 형태로 환원시켜 수중의 질소를 제거하게 된다(Denitrification). 즉 질산화(nitrification)과 탈질화(denitrification)을 반복하여 수중의 질소를 제거하게 되는데, 일반적으로 활성슬러지(activated sludge treatment) 전단 또는 후단에 질산화/탈질화 공정을 추가하게 되는 경우 2개로 분리된 혐기/호기상태의 탱크를 이용하여 질소를 제거한다(Metcalf and Eddy, 2003).

생물학적 질소제거 공정의 다른 형태로 개조된 연속적인 상향식 biofilter를 적용시키는 방법이 있다(Rogallar et al., 1992; Boller and Gujer, 1994; Pujol et al., 1994; Peladen et al., 1996; Ong et al., 2002; 장 등, 2004). 상향류식 BAF는 반응조 최하단에서 하수가 유입되고, 담체로 충전된 column을 따라 이동하게 된다. 반응조의 하단부는 산소의 유입을 차단하여, 혐기 상태(anaerobic) 또는 무산소(anoxic)상태를 유지하게 되며, 이 공정에서 탈질화가 이루어진다. 또한 column 중간부에는 산소를 유입시켜 column 상단부를 호기 상태로 유지하게 되며 이 과정에서 질산화가 진행된다. 하단부로 유입되는 유입수는 필연적으로 무산소조(anoxic zone)를 먼저 통과하게 되어 탈질화 과정을 가질 수 없게 되기 때문에 상단부의 유출구에서 하단부의 유입구로 반송시켜 탈질화를 유도하게 되며, 이는 수중

의 질소 제거를 위해서 꼭 필요한 과정이다(Metcalf and Eddy, 2003).

부분 포기 BAF 반응조는 단일 column내부에 무산소/호기상태를 동시에 유지하기 때문에 일반적인 생물학적 질소 제거 시스템에 비하여 상대적으로 작은 공간을 차지한다.(Rogalla et al., 1900; Chui et al., 1996; Sen and Dentel., 1998). 이런 BAF 반응조 2단 구성의 또 다른 이점은 6시간 이하의 짧은 수리학적 체류시간(hydraulic retention time :HRT)에서도 탈질화 및 질산화가 원활히 이루어진다는 것이다(Rogalla et al., 1900; Sanz et al., 1996; Tay et al., 2003).

비록 부분 포기 BAF에 대한 몇몇의 선행연구가 수행되었지만 좀 더 깊이 있는 연구가 요구된다(Rogalla et al., 1900; Sanz et al., 1996). 따라서 본 연구에서는 무산소(anoxic zone) 및 혐기조(anaerobic zone)에는 크기가 큰 담체를 적용하고, 호기조(aerobic zone)부분에는 작은 크기의 담체를 적용하여, 수중의 효과적인 질소 제거를 위한 추가 처리 장치로서 연구를 수행하였다. 또한 다양한 운전조건과 유출수의 재순환(recirculation) 그리고 HRT에 따른 BAF의 운전 특성을 확인하였다.

2. 실험 재료 및 방법

Fig. 1과 같이 Pilot-scale의 BAF는 호기조(oxic zone), 혐기조(anaerobic) 및 무산소(anoxic zone)로 크게 3단계로

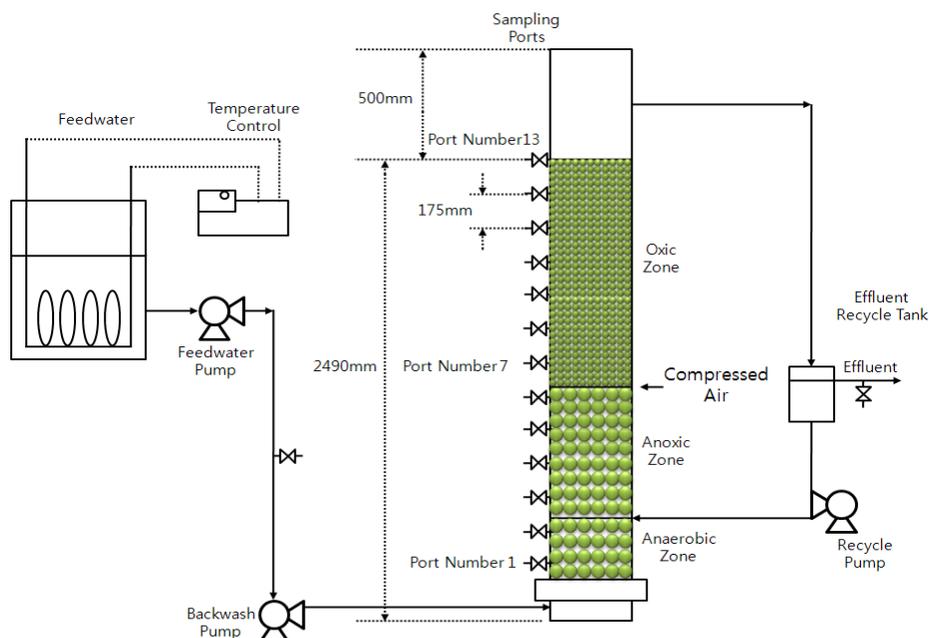


Fig. 1. Flow diagram of BAF system with anaerobic, anoxic and oxic zones.

구성되어 있다. 본 반응조의 직경은 벽면효과(wall-effect)를 최소화하기 위해 직경을 104mm로 유지하였으며 반응조의 총 길이(height)는 2.5m로 설계하였고, 175mm 간격으로 시료 채취구(sampling port)를 13개로 설치하였다.

반응조의 효과적인 운전을 도모하기 위해 무산소조(anaerobic zone), 혐기조(anaerobic zone) 각각에 사용한 담체(packing material)는 평균 직경 10mm의 모래를 사용하였고, 호기조에는 평균 직경 5mm의 모래를 사용하였다. 각 모래의 평균 공극률은 0.43 ± 0.02 ($D=10\text{mm}$), 0.36 ± 0.01 ($D=5\text{mm}$) 이었고, 표면적은 $0.62 \times 10^6 \text{m}^2/\text{m}^3$ ($D=10\text{mm}$), $0.93 \times 10^6 \text{m}^2/\text{m}^3$ ($D=5\text{mm}$) 으로 확인되었다. BAF 반응조에 적용한 대상 오염물질은 암모니아 및 유기 질소와 유기물로 오염된 하수를 유입시켰고, 반응조 최하단부에서 산소 유입을 차단하여 무산소(anaerobic) 및 혐기상태(anaerobic)를 유지하였으며, 최하단부로부터 약 0.9m 지점에 산기구를 설치하여 반응조의 윗부분을 호기 상태(oxic condition)로 유지하였다. 결과적으로 BAF 반응조 최하단

부로 유입되는 실험용 폐수는 혐기조, 무산소조, 호기조를 거쳐 반응조 최상단을 통해 유출되고, 실험 조건에 따라 폐수 중 일부는 다시 반응조 하단부에 설치된 반응수 유입구를 통해 BAF 내부로 순환할 수 있도록 설계하였다.

실험에 적용한 체류시간(HRT)은 2, 3, 4, 6, 8시간을 적용하였고, 각 단계 별 HRT은 총 HRT이 8시간일 경우 혐기조(anaerobic zone) 1.5시간, 무산소조(anaerobic zone) 2.5시간, 호기조(oxic zone) 4시간을 유지하였다. 총 HRT이 변경될 경우에도 혐기조:무산소조:호기조 각 HRT 비(ratio)는 1.5:2.5:4를 유지하였다. 내부 반응은 순환 펌프(recycle pump)를 이용하여 반응조 상단으로 유출(effluent) 되는 처리수 일부를 반응조 내로 유입시켰다. 이때 내부 반응 비율을 유입수량의 100%, 200%, 300%로 변경하며 실험을 진행하였다. BAF 반응조에 적용된 미생물은, 하수처리장 포기조에서 채취한 활성슬러지를 계대 배양하여 반응조에 적용하였다. BAF 반응조의 형태 및 구체적인 조건을 Table 2에 나타내었다

Table 1. Composition of synthetic wastewater

Ingredient	Concentration (mg/L)
Calcium Chloride (CaCl ₂)	40
Magnesium Sulfate (MgSO ₄)	6
Ferric Chloride (FeCl ₃)	4
Sodium Biphosphate (NaH ₂ PO ₄)	31
Sodium Bicarbonate (NaHCO ₃)	100*
Potassium Chloride (KCl)	4
Sodium Acetate (CH ₃ COONa)	282 (COD = 220 mg/L)
Nutrient Broth	15 (COD =10 mg/L)
Ammonium Chloride (NH ₄ Cl)	95
Isomil (baby liquid food)	22 mL in 400 L of wastewater (sCOD = 20 mg/L)

* Reported as mg CaCO₃/L for alkalinity

Table 2. Experimental operating condition for biological aerated filters

Parameter	Value
Diameter of BAF	104 mm
Media Depth	2.5 m
Influent PO ₄ ⁻³ -P	8 mg
Influent NH ₃ -N	25 mg/L
Influent sCOD	250 mg/L
Influent Alkalinity	100 mg/L as CaCO ₃
Influent Total Nitrogen	35 mg/L
Flow rates	57, 75, 113, 151, 226 L/day
Hydraulic Retention Times	2, 3, 4, 6 and 8 hr
Influent pH	7.0
Backwash Flow rate	3.33 L/min
Air Flow Rate	2.5 L/min
Temperature (Influent)	23 ± 1 ° C

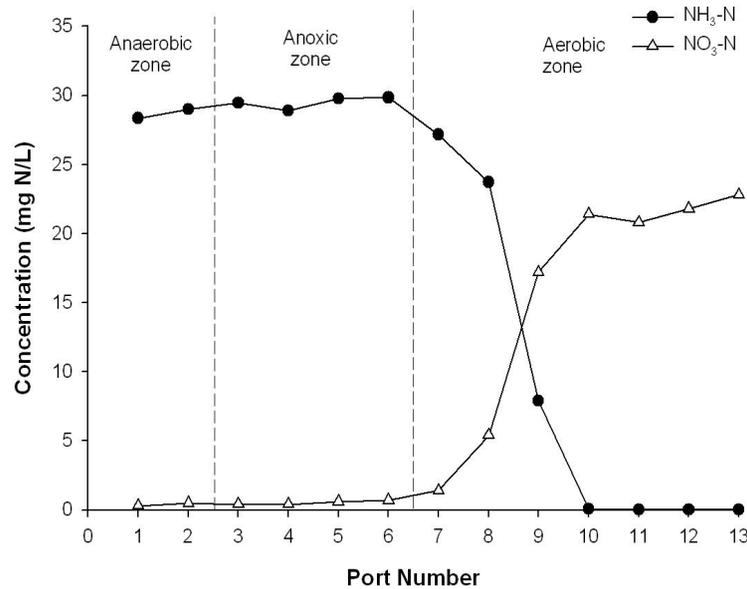


Fig. 2. Ammonia and nitrate concentrations within the column without recirculation at HRT of 8 hrs (Total depth of column =2.49 m, Distance between two sampling ports 175 mm).

BAF 반응조는 내부 순환율, 오염물질 부하량, HRT 등 실험조건을 변경하여 총 60일간 운전하였으며, 실험용 폐수는 실제 생활하수의 특성과 성분비를 묘사하기 위하여 탄소원, 각종 영양염류, 질소계 화합물, 미네랄 등이 포함되도록 제조하였고, 각 물질별 성분비를 Table 1에 나타내었다.

실험용 폐수 중 용해성 탄소원을 의미하는 sCOD는 250mg/L, 액상 총 질소원은 35mg-N/L를 유지하여 유입시켰으며, 반응조 내에서 위치에 따른 농도 분포를 확인하였다. 유입부하량은 0.3~1.2m³/m²/hr를 적용하였고, 반응조 상단부를 호기상태(Desolved Oxygen: 5mg/L)로 유지하기 위하여 2500mL/min의 공기를 유입시켜 실험을 진행하였다. Hach TNTplus Low Range(0-300 mg/L)를 이용하여 sCOD를 측정하였고, 총질소 및 인, 알카리도, 암모니아, NO₂⁻, 그리고 NO₃⁻의 농도 측정은 Standard Methods(SAPHA, 2002)에 준하여 측정하였으며, pH, ORP, temperature, DO, 손실수두(head losses) 및 유량을 실시간으로 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 내부 반응율이 없는 BAF 반응조의 거동

반응조 내 유입 폐수의 내부 반응이 없는 상태에서, HRT 8시간에 대한 암모니아(NH₃-N)와 NO₃⁻-N의 농도 변화

실험결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2의 혐기조(anaerobic zone)와 무산소조(anoxic zone)에서는 액상의 낮은 산소 농도에 기인하여 질산화(nitrification)가 원활히 진행되지 못하여 암모니아 농도의 변화가 없는 반면, 호기조(oxic zone)에서는 빠르게 질산화가 진행되어 약 30mg/L의 암모니아가 약 22mg/L의 NO₃⁻-N로 전환되는 것을 확인할 수 있다. 또한 손실된 8mg/L의 암모니아는 미생물 성장에 필요한 질소원으로 사용된 것으로 판단된다. Fig. 2에서 보여진 바와 같이 내부반응이 없는 경우는 대부분의 암모니아가 질산염으로 변환되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 BAF 반응조에서 내부반응이 없는 경우 NO₃⁻-N의 농도가 증가할수록 결과적으로 낮은 T-N의 제거율을 보여준다.

3.2 내부 반응율에 따른 BAF 반응조의 거동

HRT(Hydraulic Retention Time) 8시간에서 내부 반응율을 100%, 200%, 300%로 변경하며 측정된 NH₄⁺, NO₃⁻, sCOD의 반응조 내 지점별 농도 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 반응조로 유입되는 sCOD, NH₄⁺, T-N의 초기 농도는 각각 250mg/L, 25mg-N/L, 35mg-N/L 이었다. Fig. 3. (a)를 보면 무산소조 및 혐기조 사이의 내부 반응 유입구를 통해 순환된 폐수에 의해 부분적인 회색에 의해 혐기조의 sCOD 농도가 30% 가량 감소되는 것으로 나타났다. 또한, Fig. 3. (b)를 보면 암모니아는 내부 반응율에 상관없이

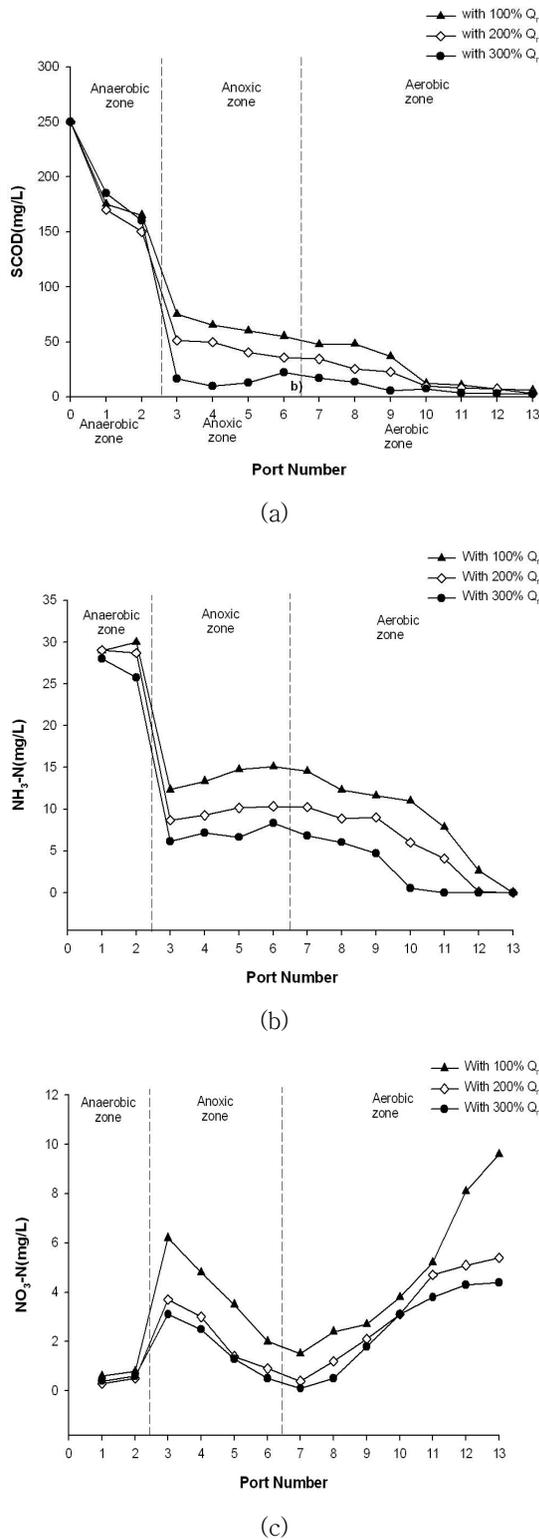


Fig. 3. (a) sCOD, (b) ammonia and (c) nitrate concentration within the column with 100 %, 200 % and 300 % recirculation. (HRT = 8 hrs)

100% 제거되는 것으로 확인되었다. NO_3^- 의 경우, 내부순환이 없는 BAF 운전시(Fig.2) 혐기/준혐기조에서는 측정되지 않았지만 내부 순환이 존재하는 BAF 운전시에는 내부 반송 유입구로 순환되는 폐수에 의해 준혐기조(anoxic zone) 전단에서 약 3~6 mg/L 농도를 보이고 있다. 또한, 준혐기조를 통과하면서 탈질화(denitrification)가 진행되면서 농도가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

BAF 반응조의 내부 반송율 100%, 200%, 300%에 따른 배출수 NO_3^- -N의 농도는 각각 9.6mg-N/L, 5.4mg-N/L, 4.4mg-N/L이었다. 필연적으로 내부 반송율이 증가할수록 탈질화가 반복되어 NO_3^- -N의 농도가 지속적으로 감소되는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 내부 반송율에 따른 NO_3^- -N의 제거율은 각 반송율 100%, 200%, 300%에 따라 56, 75%, 80%로 증가하였고, T-N의 제거율은 각 반송율 0%, 100%, 200%, 300%에 따라 23 ± 1.1 , 68 ± 2.1 , 71 ± 1.8 , 83 ± 1.4 를 나타내었다. 따라서 BAF 반응조에서 내부반송에 따른 NO_3^- -N 농도의 감소는 T-N의 제거율을 증대시켰다. 내부 반송율에 따른 sCOD, $\text{NH}_3\text{-N}$, NO_3^- -N, T-N의 제거율을 Table. 3에 나타내었다.

3.3 HRT에 따른 TN 제거를 위한 BAF 반응조의 거동

HRT별, 내부 반송율에 따른 TN의 제거율을 Fig 4에 나타내었다. TN의 제거율은 HRT 6시간, 내부 반송율 300%을 적용했을 때 가장 높은 수치인 $82 \pm 1.1\%$ 를 나타내었다. 또한 HRT 2시간을 제외한 HRT 3, 4, 6시간일 때 내부 반송율에 따른 TN의 제거율은 대동소이하여 각 HRT 별 내부 반송율 100% 일 때 64% 수준, 내부 반송율 200%일 때 75% 수준, 내부 반송율이 300%일 때 79% 수준을 유지하였다. HRT 2시간일 때는 컬럼에서의 충분한 부피 및 접촉시간이 부족하여 총 질소의 제거율은 $63 \pm 2.8\%$ 로 나타났다. 실험결과 내부 반송율 200%, 300%에서 HRT를 최소 3시간으로 하였을 때 75% 이상의 TN 제거율을 얻을 수 있는 것으로 판단된다. 이를 토대로 TN 제거효율은 내부 반송율이 증가함에 따라 처리수의 농도가 낮아짐을 알 수 있었고 효과적인 TN의 제거를 위해서는 적정 체류시간과 내부 반송율을 선정하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

BAF공정에서의 처리효율과 처리유량은 HRT의 상당한 영향을 받는 것으로 알려지고 있다. Chui et al. (1996)은 HRT 영향에 따른 TN의 처리효율을 비교한 연구에서 내부 반송 없이 6-24시간의 HRT를 사용한 결과 TN의 제거율은 41-76%로 보고하고 있다. 따라서 Chui et al. (1996) 결과와 본 연구의 결과를 보면 본 연구의 결과가 짧은 체류시간에서 다소 높은 TN 제거율을 나타냈다.

Table. 3 Change of liquid phase Removal efficiency(%) of SCOD, NH₃, NO₃⁻, TN(HRT = 8 hrs)

recirculation	sCOD Removal Efficiency(%)	NH ₃ -N Removal Efficiency(%)	NO ₃ ⁻ -N Removal Efficiency(%)	TN Removal Efficiency(%)
0%	96±0.75	100±0.1	-	23±1.1
100%	97±0.75	100±0.1	56±2.1	68±2.1
200%	98±0.75	100	75	71±1.8
300%	98±0.75	100	80	83±1.4

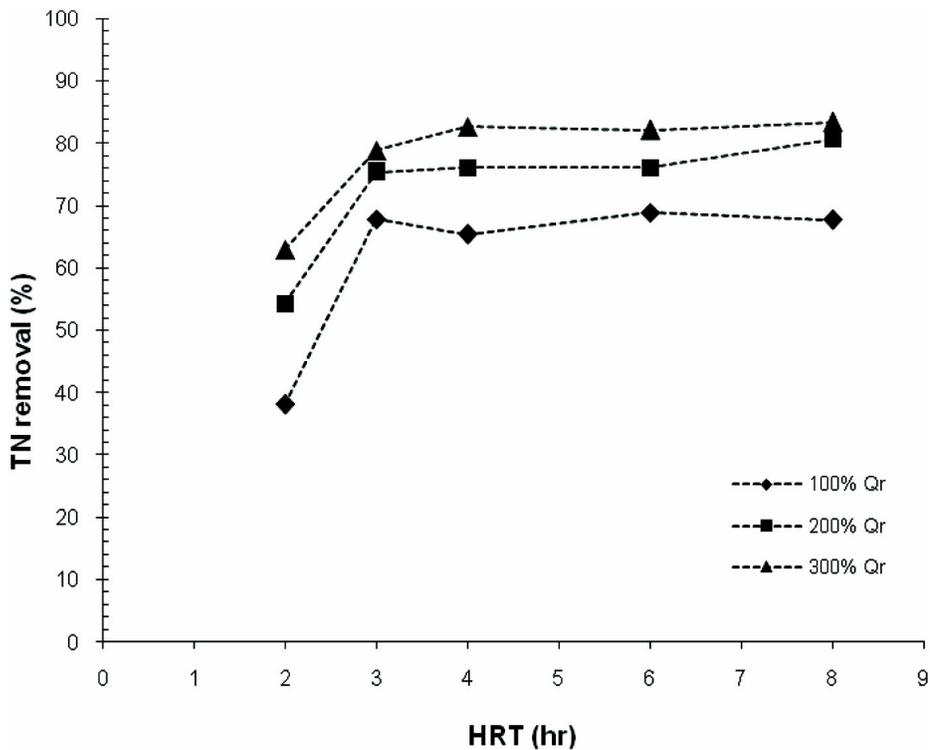


Fig. 4. Effect of HRT and recirculation rate on total nitrogen (TN) removal in the column

3.4 BAF에서 질산화 및 탈질화 kinetics

탈질화의 경우 정상상태(steady state)에서 단순 유입-유출만을 고려하면, BAF 반응조 내에서의 생물학적 탈질화 과정은 근사적으로 0.5차 반응(half order)으로 나타낼 수 있다(Hultman et al., 1994).

$$\frac{dC}{dt} = -kC^{0.5} \quad (1)$$

정리하면 다음과 같다.

$$C^{0.5} - C_0^{0.5} = -0.5 k \theta \quad (2)$$

여기서 C_0 는 초기 질산염(NO₃⁻)의 유입농도(mg-N/L)를 의미하고, k 는 0.5차 반응(half order)의 생물학적 변환율([mg/L]^{0.5}/hr); θ 는 유체체류시간(hr)이다. (2)식을 다시 나타내면,

$$C^{0.5} - C_0^{0.5} = -0.5 k h/v \text{ or } \left[\frac{C}{C_0}\right]^{0.5} = 1 - a \frac{h}{[C_0]^{0.5}} \quad (3)$$

여기서 h 는 충전된 담체의 높이, v 는 수리학적 부하율(m/hr), a 는 수리학적 부하율에 따른 반응으로 정의되는 값($k/2v$)이다. $[C/C_0]^{0.5}$ 와 $h/[C_0]^{0.5}$ 를 그래프로 나타내면 기울기가 a 값이고, y 절편은 1인 선형(linear)으로 나타낼 수 있다.

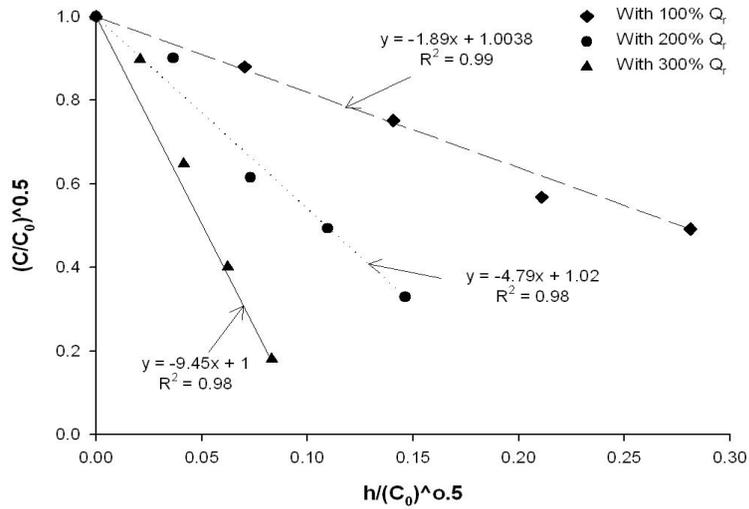


Fig. 5. Kinetic plot of experimental data on denitrification at HRT of 8 hours and 24 ± 1°C with different recirculation ratios.

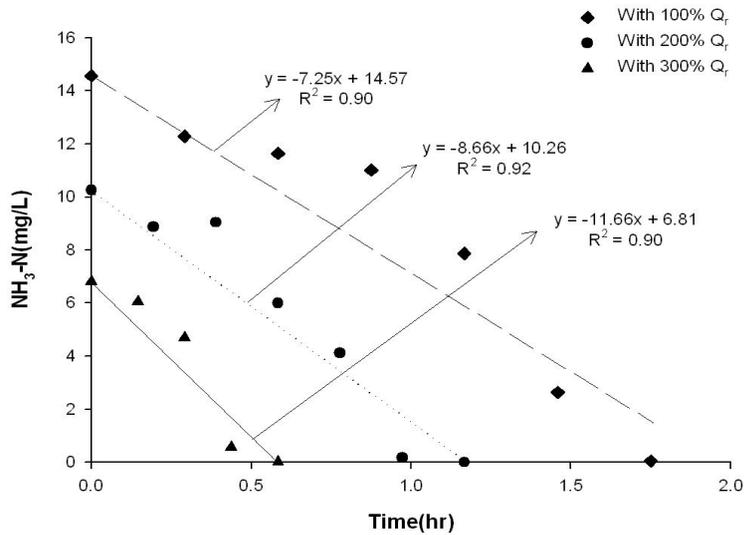


Fig. 6. Kinetic plot of experimental data on nitrification at HRT of 8 hours and 24 ± 1°C with different recirculation ratios.

질산화의 경우 몇몇의 선행연구에서 BAF의 전체 암모니움의 농도를 추정할 수 있는 생물학적 변환율 k 값을 0차 반응으로 나타내었다(Boller and Gujer, 1986). 그 식은 다음과 같다.

$$C - C_0 = -kt = -k h / v \quad (4)$$

여기서 C_0 는 유입되는 암모니움의 농도(mg N/L), C 는 실제

암모니움의 농도 (mg N/L), k 는 0차반응 생물학적 변환율 (mg NH₃-N/L-hr), t 는 반응시간, h 는 미디어층의 두께, v 는 수리학적 부하율(m/hr)이다.

온도가 24±1°C, HRT 8시간에 대해 내부 반응율에 따른 질산염의 탈질율을 Fig. 5에 나타내었고, 질산화율을 Fig. 6에 나타내었다. 또한 95% 신뢰수준에서 암모니움의 질산화 및 탈질화에 대한 생물학적 변환율은 Table 4에 나타내었다. Fig. 5와 Fig. 6을 보면 내부반송률이 300%일 때

Table 4. Estimation of overall ammonium and nitrate biotransformation rates in partially aerated BAF for hydraulic retention time of 8 hours at $24 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ with different recirculation rates.

Operation condition	Anoxic zone			Oxic zone	
	$\alpha(1/m)^a$	$k([\text{mg/L}]^{0.5}/\text{hr}^a)$	R^2	$k(\text{mg NH}_3\text{-N L}^{-1} \text{ hr}^{-1})^a$	R^2
100% Qr	1.89 ± 0.11	2.27 ± 0.13	0.99	7.25 ± 1.13	0.90
200% Qr	4.79 ± 0.54	8.62 ± 0.97	0.98	8.66 ± 1.13	0.92
300% Qr	9.45 ± 0.79	22.68 ± 1.19	0.98	11.66 ± 2.23	0.90

^a95% confidence interval

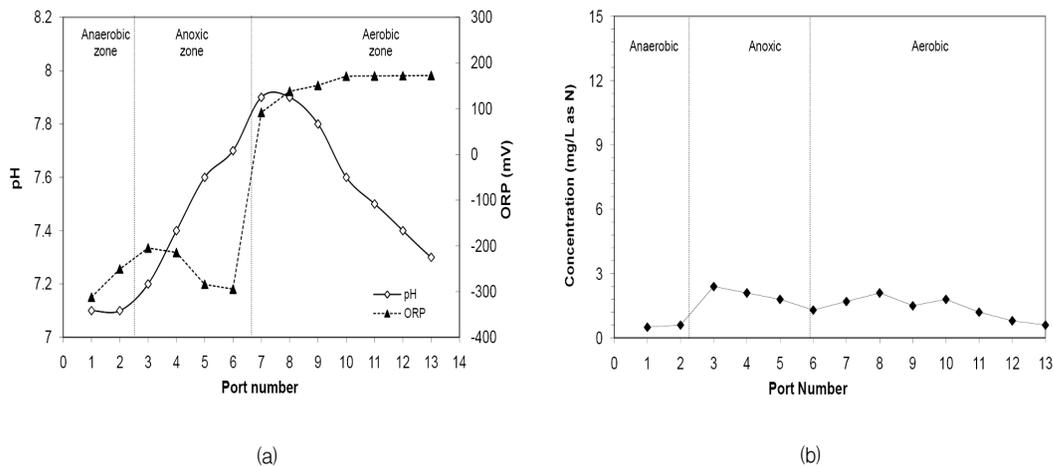


Fig. 7. (a) ORP and pH, and (b) nitrite changes under anaerobic, anoxic and oxic conditions within the column at 8 hours HRT with 100 % recirculation.

가장 최대값을 나타내었으며, 이때 질산염(NO_3^-)와 암모니움(NH_4^+)의 변환율은 각각 $22.68 \pm 1.19 [\text{mg/L}]^{0.5}/\text{hr}$, $11.66 \pm 2.23 \text{ mg NH}_3\text{-N/L-hr}$ 이었다. 즉 BAF반응조에서는 내부반송율이 증가할수록 암모니움과 질산염의 변환율이 증가하는 것으로 확인되었다. 그 이유는 유량이 증가하게 되면, 기질의 액상과 접촉 미생물간의 물질전달율이 증가하고 내부 반송에 따라 희석배율이 증가하기 때문인 것으로 판단된다(Tschui et al., 1994; Peladen et al., 1996; Pujon et al., 2000). 한편 각 내부반송율에 대한 얻어진 질산염(NO_3^-)와 암모니움(NH_4^+)의 변환율(Table 4)은 BAF 설계를 위한 질산화 및 탈질화반응조 여재의 높이를 결정하는 매우 중요한 정보를 제공한다.

3.5 BAF반응조에서 pH, ORP and nitrite의 변화

HRT에 대해 내부 반송율이 100%일 경우의 pH, ORP 및 nitrite의 변화에 대한 실험결과를 Fig. 7에 나타내었다.

실험 결과 호기조에서 ORP는 172mV로 나타났으며 무산소조에서는 $-200 \sim -300\text{mV}$ 를 나타내어, 호기 상태와 무산소 상태가 잘 유지되는 것으로 확인되었다. 또한 pH 변화를 보면, 호기조(oxic)에는 질산화가 진행되어 이로 인해 암모니움(NH_4^+)의 농도와 알칼리도가 감소하여, pH 7.9 에서 pH 7.3 수준으로 낮아졌다. 혐기조(anaerobic) 및 무산소조(anoxic)에서는 탈질화로 인한 OH^- 의 농도 상승으로 pH 7.1에서 pH 7.9로 높아지는 것을 확인 할 수 있다. 한편 유출수의 NO_2^- -N의 농도는 1 mg N/L 이하로 검출되었다 (Fig. 7(b)).

3.6 유입부하량에 따른 $\text{NH}_3\text{-N}$, sCOD, 총질소의 제거율

실험 결과를 나타내기 위해 각각의 암모니아 및 TN부하율에 따른 제거를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a)를 보면 BAF 반응조의 암모니움에 대한 최대 분해능(Maximum

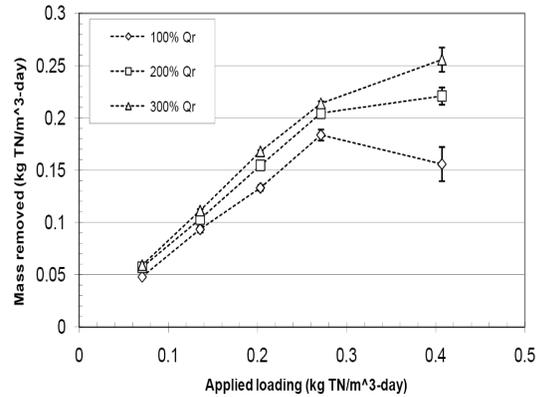
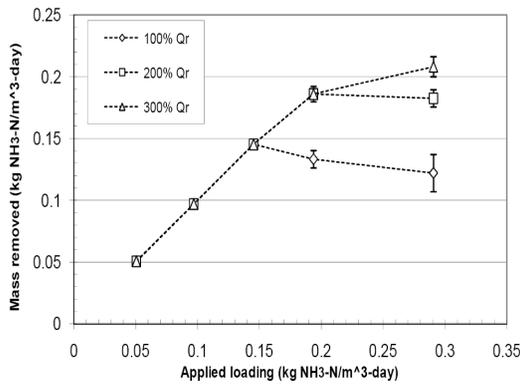


Fig. 8. Effect of (a) ammonia and (b) TN removal.

elimination capacity)은 내부반송율 100%일 경우 0.15 kg NH₃-N/m³-day, 내부 반송율이 200%일 경우에는 0.19kg NH₃-N/m³-day, 내부 반송율이 300%일 경우에는 0.21 kg NH₃-N/m³-day인 것으로 나타났다. 총 질소 제거율(Fig. 8(b))은 0.27 kg T-N/m³-day 유입부하량 이하에서 일정수준 이상의 제거능을 보이고 있으며, 유입부하량이 0.27 kg T-N/m³-day이상으로 증가하면서 전반적인 제거율이 감소하고 있다. 또한 내부 반송율이 증가할수록 유입부하량에 대한 처리율이 약 10~20 % 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 기존의 다른 BAF 처리방법(Sanz et al., 1996; 성 등, 1999)보다 더 높은 최대분해능을 보임으로써, 본 연구에서 적용하고자 하는 부분 포기 pilot-scale BAF 반응조를 이용하여 TN의 효율적인 제거가 가능함을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 부분 호기상태의 BAF 반응조의 거동을 확인하고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

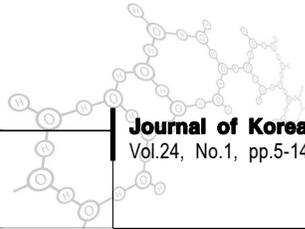
- 실험결과 BAF는 EPA의 법적 배출 기준치(TN : 8 mg/L, sCOD : 20 mg/L)를 준수하기 위해 질소와 sCOD를 제거하는 공정으로 적용이 가능했으며, 내부 반송율이 증가함에 따라 NH₄⁺, NO₃⁻와 총질소의 제거율이 증가하였다.
- BAF는 HRT 3시간 및 내부 반송율 200~300%에서 96%이상의 sCOD 및 암모니움 제거율을, 최소 75%이상의 총질소 제거율을 얻을 수 있음을 확인하였고, 탈질화는 1/2차 반응식을 통해 수치화 할 수 있으며 질산화는 0차 반응식을 이용하여 속도상수를 구하였다. 또한 탈질화 및 탈질화의 kinetic 실험을 통해 HRT가 감소함

에 따라 암모니움(NH₄⁺)와 질산염(NO₃⁻)의 생물학적 변환율이 증가하는 것을 확인하였다.

- 최적의 암모니움 제거를 위한 암모니움의 부하율은 내부 반송율 100%일 때 0.15kg NH₃-N/m³-day, 200%일 때 0.19kg NH₃-N/m³-day 였다. 결과적으로 내부 반송율의 3가지 조건 중 300%의 내부 반송율에서 가장 높은 암모니움과 총 질소의 제거율이 확인되었다.
- 본 연구 결과 부분 호기상태의 BAF는 작은 규모의 지역에서 발생하는 폐수의 질소제거를 위해 적용할 수 있는 효과적인 시스템이 될 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- American Public Health Association (APHA). (2002). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Ed., APHA, Washington D.C.
- Boller, M. and Gujer, W. (1986). Nitrification in Tertiary Trickling Filters Followed by Deep-Bed Filters, Water Res., 20(11): 1363-1373.
- Chui, P. C., Terashima, Y., Tay, J.H. and Ozaki, H. (1996). Performance of a Partly Aerated Biofilter in the Removal of Nitrogen, Wat. Sci. Tech., 34(1-2):187-194.
- Hultman, B. J nsson, K. and Plaza, E. (1994). Combined Nitrogen and Phosphorus Removal in A Full-scale Continuous Up-flow Sand Filter, Wat. Sci. Tech., 29(10-11):127-134.
- Metcalf and Eddy. (2003). Wastewater Engineering, Treatment and Reuse, 4th edition. McGraw Hill Inc., New York.



- Ong, S. L., Hu, J. Y., Lee, L. Y., Ng, W. J. and Song, L. F. (2002). Packed Bed Columns for High Rate Nitrogen and Carbon Removals, *Wat. Sci. Tech.*, 46(11-12):57-62.
- Peladan J. -G., Lemmel, H. and Pujol, R. (1996). High Nitrification Rate with Upflow Biofiltration, *Wat. Sci. Tech.*, 34(1-2):347-353.
- Pujol, R., Hamon, K., Kandel, X. and Lemmel, H. (1994). Biofilters: Flexible, Reliable Biological Reactors, *Wat. Sci. Tech.*, 29(10-11):33-38.
- Pujol, R. (2000). Process Improvement for Upflow Submerged Biofilters, *Water21*, April:25 - 29.
- Rogalla, F. and Bourbigot, M. M. (1990). New Developments in Complete Nitrogen Removal with Biological Aerated Filters, *Wat. Sci. Tech.*, 22(1-2):273-280.
- Rogalla, F., Banard, M., Hansen, F. and Dansholem, P. (1992). Upscaling a Compact Nitrogen Removal Process, *Wat. Sci. Tech.*, 26(5-6):1067-1076.
- Sanz, J. P., Freund, M. and Hother, S. (1996). Nitrification and Denitrification in Continuous Upflow Filters—Process Modelling and Optimization, *Wat. Sci. Tech.*, 34(1-2):441-448.
- Sen, P. and Dentel, S. K. (1998). Simultaneous Nitrification—Denitrification in a Fluidized Bed Reactor, *Wat. Sci. Tech.*, 38(1):247-254.
- Tay, J. H., Chui, P. C. and Li, H. (2003). Influence of COD:N:P Ratio on Nitrogen and Phosphorus Removal in Fixed-Bed Filter, *J. Env. Eng. Div., ASCE*, 129(4):285-290.
- Tschui, M., Boller, M., Gujer, W., Eugster, C., Mader, C. and Stengel, C. (1994) Tertiary Nitrification in Aerated Pilot Biofilters, *Wat. Sci. Tech.*, 29(10-11): 53-60.
- 정용준, 배종홍, 권구호, 민경석 (2004). BAF 공정을 이용한 체적 배수의 재이용, *한국물환경학회지*, 20(6): 664-669.
- 성문성, 장 덕, 서성철, 정보림 (1999). 고효율 혐기성반응조 및 호기성여상 조합시스템에 의한 질소, 유기물 동시제거, *대한상하수도학회지*, 13(2): 55-65.