J. Kor. Soc. Environ. Eng., 35(6), 449~455, 2013
Original Paper
ISSN 1225-5025

고정식 담체 유무와 반송비에 따른 소규모 하수처리 시스템 내 영양염류 제거 특성

The Effect of Fixed Media and Recycling Ratio on Nutrients Removal in a Pilot-Scale Wastewater Treatment Unit

황재훈 · 조동완 · 김충환* · 전병훈†
Jae-Hoon Hwang · Dong-Wan Cho · Chung-Hwan Kim* · Byong-Hun Jeon†

연세대학교 환경공학과 · *한국수자원공사
Department of Environmental Engineering, Yonsei University
**Water & Wastewater Research Center, Korea Institute of water and Environment*

(2013년 1월 23일 접수, 2013년 6월 5일 채택)

Abstract : The effect of recycling ratio and fixed media on nitrate and phosphate removal was investigated in a pilot-scale wastewater treatment unit using synthetic wastewater. Addition of fixed media increased nitrate removal from 45 to 58% while no noticeable change was observed for Chemical Oxygen Demand (COD) and phosphate removal (<5%). Nitrate removal efficiency also enhanced (Ca 7%) when the influent wastewater flow was doubled (2Q), however phosphate removal was decreased from 40.9 to 26.6% with the increasing recycling rate. The attached biomass analysis showed the presence of bacteria (73.4 mg/cm^2) on the surface of added media in anoxic reactor. *Pseudomonas aeruginosa* a common denitrifying bacterium dominated the bacterial growth (58%) in the anoxic reactor which was determined using Fluorescence In Situ Hybridization (FISH) analysis.
Key Words : *Nitrate, Phosphate, Fixed Media, Nitrifying- and Denitrifying- Bacteria, Recycling Ratio, Fluorescence In Situ Hybridization (FISH)*

요약 : 소규모 하수처리시스템에 다양한 반송비와 고정식 담체를 적용하여 합성폐수에서 질소, 인의 제거를 검토하였다. 담체를 첨가 시 질소의 제거율은 40.1%에서 65.1%로 증가하였으나 COD와 인의 제거에는 영향이 없었다(<5%). 반송을 통해 유량을 2배(2Q)로 증가시킨 경우 질소의 제거율은 7% 정도가 증가하였으나, 인 제거율은 반송비가 증가됨에 따라 31.8에서 26.6%로 감소하였다. 무산소조에서 담체에 부착된 미생물은 약 73.4 mg/cm^{2}로 존재하였으며, FISH분석 결과 탈질 미생물인 *Pseudomonas aeruginosa* 존재 (약 58%)를 확인하였다.
주제어 : 질소, 인, 고정식 담체, 질산/탈질 미생물, 반송비, FISH 분석

1. 서 론

최근 급격히 늘어나는 하수 발생량에 비해 처리용량이 부족한 하수종말처리 시설과 마을하수도의 정비 미흡 및 관리 소홀로 수질오염이 가중되고 있다. 폐쇄성 수역에서 부영양화 및 수질오염을 일으키는 주 원인은 가정, 산업 또는 축산폐수 등에 포함되어 있는 질소와 인으로 수중 내 질소와 인은 물리적, 화학적 또는 생물학적인 방법에 의해 제거될 수 있으나, 경제적인 관점에서 볼 때 생물학적 방법이 가장 타당한 것으로 보고된다.[1] 대부분의 생물학적 질소 제거방법은 부유식 활성슬러지 공법으로 종속영양 미생물을 다양한 활성슬러지 공법(e.g. AO, A_2O, Bardenpho and Modified Bardenpho)에 이용하여 질소 제거를 진행하기 때문에 유기물 농도가 낮은 국내 하, 폐수에 적용하기 위해서는 별도의 유기물을 외부에서 주입하거나 유기물의 농도를 유지해야 하는 단점이 있다.[2,3] 또한 운전시 폭기조 내의 거품 및 슬러지 팽화(sludge bulking) 문제가 자주 발생하고 슬러지의 침전성이 불량하고, 유지관리비가 높아 대규모의 처리장에서나 운전이 가능하며, 중규모 또는 그 이하 규모에서는 처리장치의 운전에 기술적 · 경제적 난점이 많은 것으로 알려져 있다.[4]

부착식 생물막법은 담체 표면에 미생물을 부착시킨 후 생성된 생물막을 이용하여 폐수 내 오염물질을 처리하는 공법으로 슬러지 체류시간이 늘어날 뿐만 아니라 자기산화가 촉진되어 폐슬러지의 발생량이 적으며, 미생물의 군집 형성으로 온도, pH, 유기물 부하 변화 및 슬러지 팽화 현상으로 인한 슬러지 부상 등의 문제점을 보완할 수 있다고 보고된다.[5] 또한 질산화균과 같이 비증식 속도가 느린 미생물이 부착되기 쉬운 특성을 지니고 있으며, 저농도의 유기성 폐수에도 적용할 수 있는 장점이 있다.[6] 담체 선별은 부착식 생물막법의 주요인자로 표면이 거칠수록 부착에 이용되는 표면적이 넓어지며 미생물의 부착 속도가 빠르며, 탈리 현상을 저감시킨다고 보고된다.[7]

대부분의 국내 하수처리장 및 소규모 하수처리시설의 경우 주로 유기물 제거 목적으로 재래식 활성슬러지 공법을 적용하고 있다.[8] 그러나 하수도법 방류수 수질공정법에는 유기물 제거뿐만 아니라 질소와 인 등의 영양 염류를 제거하는 고도처리를 요구하고 있어 신설 또는 개선 중에 있는

† Corresponding author E-mail: bhjeon@yonsei.ac.kr Tel: 033-760-2446 Fax: 033-760-2571

중소규모 처리시설은 부착식 공법을 시도하고 있으나, 처리 효율에 대한 신뢰성 있는 검증은 미진한 실정이다.

본 연구는 소규모 하수처리시설을 축소한 반응기 내부에 나선형 담체를 고정하여 유입 하수에 상응한 합성폐수에 대한 질소, 인을 모니터링 하였고, 반송비와 체류시간 등을 조절하여 최적 운전 조건을 검토하였다. 또한 FISH (Fluorescence In Situ Hybridization) 분석법으로 담체에 부착된 미생물의 특성과 분포에 대한 연구를 수행하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험장치

질소 · 인 제거 특성을 가지고 있는 미생물이 함유된 BNR (biological nutrient removal) 슬러지를 확보하기 위해 W시 하수종말처리장의 포기조에서 채취한 폐수를 2개월간 운전하였다. 배양에 사용된 폐수는 가정하수로 성분은 Table 1에 나타냈다. 실험에 사용된 반응기는 Fig. 1과 같이 유입조, 유량조정조, 제 1, 2무산소조, 제 1, 2폭기조, 침전조 그리고 여과조로 구성하였다. 연구에 사용한 폐수는 정량펌프를 이용하여 유입조 상부에서 매일 46 L씩 유입시켰으며 수리학적 체류시간(HRT)을 24시간으로 waste는 46/d로 운전하였다. 각 반응기의 HRT는 1~3시간으로 운전하였으며, 다단으로 구성된 포기조와 무산소조의 총 수리학적 체류시간은 3시간과 4시간으로 설정하였다. 무산소조 및 침전조 단계를 제외한 모든 단계에서 반응기 하부에 산기 펌프를 설치하여 일정한 DO 농도를 유지하였으며, 반응기 내의 온도는 자동온도 조절기를 설치하여 25±1℃를 유지하였다. 전체 반응 주기는 침전조를 포함하여 24 h/cycle로 하였다. 유입 폐수는 합성 폐수를 사용하였으며 Table 2에 나타내었다. 합성 폐수는 질산성 질소로 구성되어있는 하수의 성분을 바탕으로 제조하였으며, 농도는 COD 150±8 mg/L, Nitrate (NO_3^--N) 44±3 mg/L, T-P 4.5±0.3 mg/L로 일정하게 유지하였다.

Table 1. Characteristics of the sewage wastewater

Parameter	Concentration (mg/L)
COD	44±0.6
Total nitrogen	23±0.1
Nitrate (NO_3^--N)	16±0.2
Nitrite (NO_2^--N)	3.2±0.1
Total phosphorus	6.6±0.3
Total solids	4600±160
pH	7.1±0.2

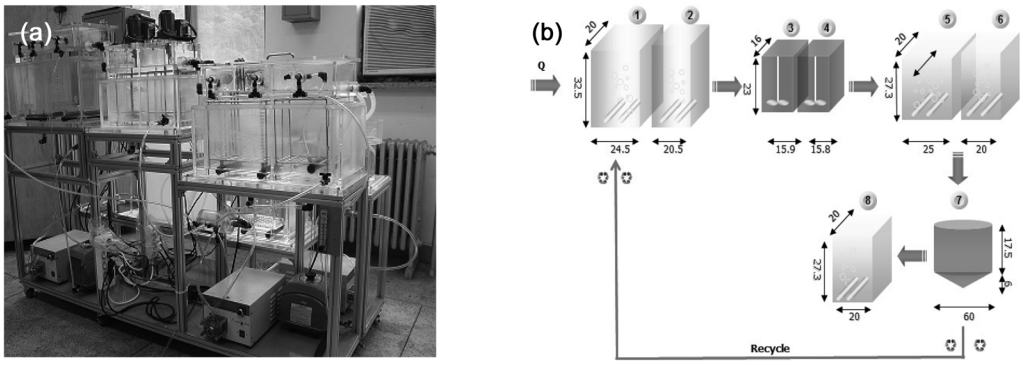
Table 2. Composition of the synthetic wastewater

Parameter	Concentration (mg/L)
Glucose	145.0±10
$NaNO_3$	40.0±2
$K2HPO_4$	4.6±0.2
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	15.0±0.1
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	3.0±0.3
$CaCl_2$	4.0±0.2

2.2. 담체(media) 선정 및 부착 미생물량 측정

본 연구에 사용된 담체는 (주)대성산업에서 공급받은 DS media로 나선형형태로 제작되어 표면적을 개량하였다. 재질은 왕겨와 및 폐비닐 및 폐타이어를 주 원료로 하여 제작되었으며, 표면적의 거칠기는 기존의 담체와 다르게 탄화된 표면으로 구성되었고 균열과 돌기가 많아 대공극과 간극을 유지하도록 가공하였다. 담체의 표면적을 Fig. 2에 나타내었다.

미생물이 부착된 담체의 표면수를 제거한 후 부착된 습윤 매체무게를 측정하고, 매체를 Vial에 담은 후 0.125 N NaOH를 주입하고 2시간 동안 초음파와 알카리 세정을 반복한 뒤 총 고형물(Total Solid)을 측정하여 미생물의 건조무게 및 함수율을 측정하였다. 이때 사용된 NaOH 및 TS를 VS로 환산할 경우 보정을 해야 한다. 담체에 부착된 미생물은 다음 식에 의해 계산하였다.[9] 비표면적 BET 평균값은 0.02 m^2/g로 Micromeritics ASAP2010 (BET surface area measurements, USA) 로 측정하였다.



1: Influent tank 2: Flow control tank 3: 1st anoxic tank 4: 2nd anoxic tank
5: 1st aeration tank 6: 2nd aeration tank 7: Settling tank 8: Discharge water tank

Fig. 1. Schematic diagram of the pilot-scale wastewater treatment unit.

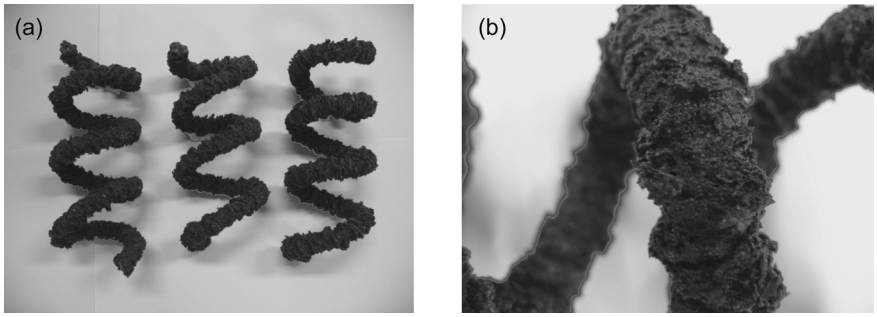


Fig. 2. Photograph of the fixed media (a) with a magnification on the surface (b).

$$\text{담체 단위면적당 부착미생물량}(mg/cm^2) = \frac{\text{부착미생물의 건조무게}(g)}{\text{담체표면적}(m^2)} \times \frac{1}{10} \quad (1)$$

2.3. 분석방법

본 연구에서의 분석항목으로는 유기물 분석을 위해 CODcr, 총 질소, 총 인 및 부유미생물 농도 및 담체에 부착된 미생물 농도를 검토하기 위해 Mixed Liquor Suspend Solid (MLSS)를 분석하였다. 모든 분석 항목은 Standard Methods[10]로 하였고, CODcr, 총 질소, 총 인의 분석장비는 HACH사의 흡광광도기(DR-4000)로 분석하였다. 수용성 pH와 DO 농도는 pH meter와 DO meter (Orion star A329, Thermo scientific)로 각각 측정하였다. 산화환원 전위(ORP)는 pH/ORP meter (Cyberscan pH 310, Eutech Instrument, Singapore)로 측정하였다.

2.4. Fluorescence In Situ Hybridization

반응기의 시료를 채취한 후 고정액인 4% paraformaldehyde를 시료 1 volume 당 고정액 3 volume의 비율로 첨가해 준 후 4℃에서 1~3시간 동안 고정하였다. 고정된 시료를 슬라이드를 0.1% gelatin + 0.01% chromium potassium sulfate를 녹인 70℃의 용액에 담근 후 공기 중에 말려서 코팅하여 시료의 고정과 탈수의 전처리를 거친 후 hybridization buffer (0.9 M NaCl, 20 mM Tris-HCl, 0.01% SDS, formamide)와 probe로 hybridization시켰다. 이 때 첨가하는 probe 농도는 25 ng/μL로 일정하게 희석하여 사용하였다. Hybridization 과정은 46℃에서 120분 동안 hybridization chamber에서 수행하였다.[11] 슬라이드는 Kr/Ar ion laser (Excitation wave length 494, 550, 650 nm)가 장착된 MRS-1024 (Bio-Rad, U. K.) confocal laser scanning microscope를 사용하였고, oligonucleotide probe와 형광염료는 Table 3에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 고정식 담체 유무에 따른 질산화 및 탈질 반응

24시간을 1 cycle로 하는 소규모 하수처리 시스템에서 무산소 조건(3시간)과 호기조 조건(4시간)으로 나누어 고정식 담체의 유무에 대한 질산화 및 탈질 반응을 진행하였다 (Fig. 3). 무산소 구간에서는 질산화 반응이 진행되지 않고

Table 3. 16S rRNA targeted oligonucleotide probes used in this study

Probe	Specificity	Sequence (5'-3')	Dye
PseaerA	*Pseudomonas aeruginosa*	GGTAACCGTCCCCCTTGC	Cy3
Nit3	*Nitrobacter* spp	CCTGTGCTCCATGCTCCG	FITC
EUB 338 I	bacteria	GCTGCCTCCCGTAGGAGT	
EUB 338 II	bacteria not covered by EUB338 I and EUB 338 III	GCAGCCACCCGTAGGTGT	Cy3 or FITC
EUB 338 III	bacteria not covered by EUB338 I and EUB 338 II	GCTGCCACCCGTAGGTGT	

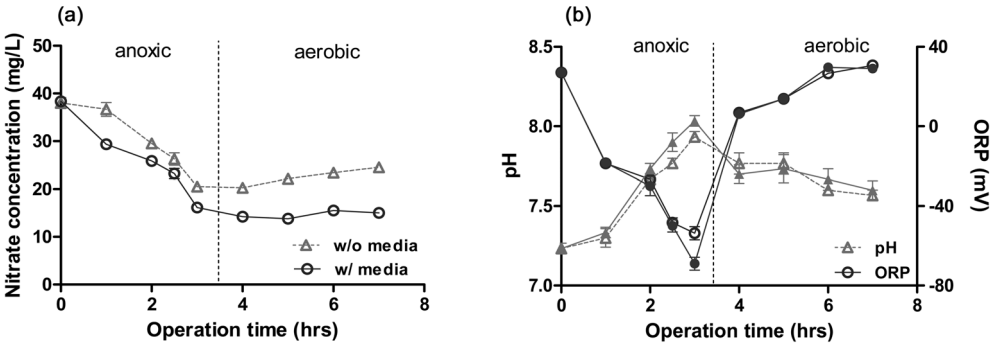


Fig. 3. Removal of nitrate (a), and monitoring of solution pH and ORP (b) in the anoxic and aerobic reactors (filled symbol; without media, open symbol; with media).

탈질 반응이 진행되므로 질산성질소의 제거가 진행된다.[12] 본 연구에 사용된 합성폐수는 암모니아 성분이 없는 폐수로 무산소 구간에서 제거된 질산성 질소를 총 질소로 분석하였다. 유량조정조로부터 유입된 폐수(유입농도 38±2 mg/L)는 무산소조 유입 1시간 이후부터 질산성 질소 제거가 시작했으며, 무산소조와 호기조를 거친 후에는 약 45%의 질산성 질소가 제거되었다(Fig. 3). 무산소조에서는 탈질화 과정이 진행되므로 암모니아성 질소는 고정이 되며, 질산성 질소는 질소 가스로 변환된다.[13] 고정식 담체를 넣은 후 무산소조에서 질산성 질소의 농도를 분석한 결과, 폐수 유입 후 약 1시간 이후에 질산성 질소 제거 반응이 진행되기 시작했으며, 유량조정조에서 유입되는 농도의 약 58%를 제거 되었다. 반면에 호기조 구간에서는 질산성 질소 농도가 5 mg/L 내외로 증가하였다. 호기조 구간에서의 질산성 질소 농도 증가는 미생물에 의한 질산화 반응이 아닌 질산염을 함유한 폐수가 지속적으로 유입되었기 때문이다.

반응기 내의 수용성 pH와 ORP변화를 Fig. 3(b)에 나타내었다. 수용성 pH는 무산소 조건에서 7.2에서 7.9로 증가하였으며, ORP는 -40~-60 mV로 감소하였다. 포기조로 진행함에 따라 pH는 점차적으로 감소하여 pH 7.5±0.1로 되었으며, ORP는 증가하여 35±5 mV를 보여줬다. 고정식 담체를 넣은 후 pH와 ORP변화는 무산소조에서 8.1과 -75 mV로 나타났으며, 포기조에서는 7.5±0.1와 36±2 mV로 각각 나타났다. 이는 무산소조에서 담체에 부착된 탈질 미생물이 pH와 ORP에 영향을 준 것으로 보인다. 무산소 구간 동안 탈질 반응이 일어나면 유입수로부터 용존 되어있는 유기 탄소 물질들이 HCO_3^-로 전환되면서 수소 이온을 소모하여 수중 pH가 상승하며, 포기조에서는 질산화 반응에 의해 HCO_3^-가 소비되면서 pH가 감소된다고 보고된다.[14] 본 연구에서는 포기조 내 미량의 *Nitrobacter* spp. 거동에 의해 pH가 감소된 것으로 사료된다. 무산소 조건이 진행되면서 탈질 반응에 의해 NO_3^-가 환원되어 ORP가 지속적으로 감소되었으며, 포기조에서 DO 농도(0.1-2.5 mg/L)가 증가됨에 따라 ORP 값이 증가하였다. 상기된 결과는 pH와 ORP가 탈질 및 질산화 반응에서 주요한 매개 변수임을 나타내었다.

3.2. 고정식 담체 유무에 따른 MLSS 변화 및 미생물 분포

담체 주입에 따른 각 반응기내 MLSS의 변화를 Fig. 4에 나타냈다. 고정식 담체는 각각 유입조에 10개, 유량조정조에 4개, 무산소조에 6개, 포기조에 4개, 여과조에 8개를 적용하였다. 실험 초기 각 반응기의 MLSS는 3600±200 mg/L 이었으며, 반응기가 수리학적 체류시간(24시간)에 안정됨에 따라 MLSS는 2200±300 mg/L으로 유지되었다. 담체를 넣은 후 약 5일이 경과함에 따라 각 반응기의 MLSS는 감소하였으며 10일 후 전체 MLSS는 유량조정조에서 점차 감소하여 무산소조에서 1530±150 mg/L, 담체 부착미생물은 제 1 무산소조에서는 73.4 mg/cm^2, 제2 무산소조에서는 68.6 mg/cm^2 각각 나타났다. 담체를 넣지 않은 경우 무산소조에서의 MLSS는 1920±200 mg/L로 나타났다. 담체 주입에 따른

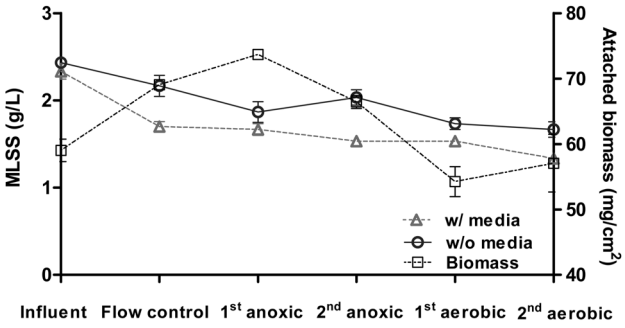


Fig. 4. Mixed Liquor Suspend Solid (MLSS) and attached biomass on the media in each reactor.

른 MLSS 감소율은 무산소조에서 약 0.4 g MLSS/day을 보였으며 나머지 반응조에서도 매스량이 일정하게 감소하였다. 이는 폐수 내 암모니아성 질소가 존재하지 않아 질산화 미생물 증식이 뚜렷하게 나타나지 않아 매스량 변화가 크게 나타나지 않은 것으로 추정된다.

반응기 내의 부유 미생물과 고정식 담체에 부착된 미생물 분포를 관찰하기 위해 FISH image를 분석하여 Fig. 5에 나타냈다. 반응기는 무산소조와 포기조 등으로 구성되어 있어 질산화 미생물과 또한 탈질 미생물을 포함하는 종속영양 미생물이 같이 분포할 것으로 예상되어 대표적 질산화 미생물과 탈질화 미생물의 분포를 검토하였다. 전체 박테리아에 특이적으로 결합하는 FITC로 labeling된 probe EUBmix (EUB338 I + EUB338 II + EUB338III)와 *Pseudomonas aeruginosa*에 특이적으로 결합하는 Cy3로 labeling된 probe PseaerA를 이용한 hybridization 결과, 무산소조 내에서 탈질 박테리아인 PseaerA의 분포를 확인하였으며, 이미지의 정량분석 결과 전체 박테리아 중 평균 58.7%가 *Pseudomonas aeruginosa*에 속함을 알 수 있다(Fig. 5(a)). *Pseudomonas aeruginosa*는 nitrate을 N_2로 전환 및 반응기내에 영양분 결핍 시 nitrate을 미량의 NH_4^+로의 전환할 수 있으며,[15,16] 본 연구에서는 질산염이 무산소조에서 *Pseudomonas aeruginosa* 인해 미량 NH_4^+로 전환되어 폐수내에 NH_4^+가 없음에도 불구하고 미량의 Nitrobacter (1% 내외)가 반응기내에 분포된 것으로 판단된다(Fig. 5(b)). 활성슬러지 공법에서 nitrite의

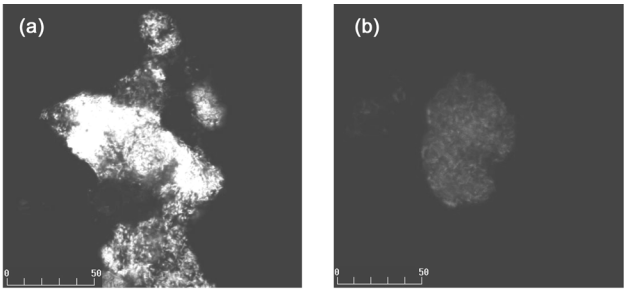


Fig. 5. Fluorescence in situ hybridization images of *Pseudomonas aeruginosa* (PseaerA) and *Nitrobacter* spp. (Nit3). a) Simultaneous in situ hybridization with Cy3 probe PseaerA and EUBmix (EUB338I+II+III; FITC), and b) Simultaneous in situ hybridization with FITC labeled probe Nit3 and EUBmix (EUB338I+II+III; Cy3). Bar = 50 μm.

농도가 낮은 경우에 활성화되는 대표적 질산화 미생물은 genus *Nitrospira*로 보고된다.[17] 또한 폐수 내 암모니아성분이 많으면 대부분 질산화에 의해 NH_4^+-N이 NO_2^--N으로 산화되는 경우 질산화 미생물이 검출되지 않고 ammonia oxidizing bacteria가 우점 미생물로 분포된다고 보고한다.[18] 본 연구에서는 합성 폐수 내 NH_4^+-N이 충분히 존재하지 않아 Nitrite Oxidizing Bacteria (NOB) 계열의 *Nitrobacter* spp. 및 ammonia oxidizing bacteria가 미량 분포된 것으로 사료된다.

3.3. 고정식 담체 유무에 따른 인 제거

인은 질소와 더불어 하천이나 호소의 부영양화를 일으키는 원인물질로 규제의 대상이 되고 있으며 본 연구에서는 담체를 이용하여 유입부터 유출 구간까지 각각의 반응기에서 인 농도 변화를 Fig. 6에 나타냈다. 담체를 넣지 않은 조건에서 T-P는 각 반응 구간을 거쳐 최종 방류 시 3.1±0.2 mg/L로 제거율은 30%로 보여진다. 고정식 담체를 넣은 후 T-P의 최종 방류 농도는 2.9±0.1 mg/L, 제거율은 약 34% 나타나 T-P의 제거효율이 약 4% 증가되었다. 인산염 축적박테리아는 전자 수용체를 질산염보다 산소 사용시 인의 제거 효율이 2배 증가되는 것이 보고된다.[19] 본 연구에서 담체 적용 경우, T-P 제거 효율이 더 높게 나타난 것은 무산소 조건에 순응된 슬러지의 많은 양이 담체에 부착되었기 때문이다. 질산화 반응은 인 제거와 경쟁적인 관계가 있으며, 질산화 반응이 활발할 경우 무산소조 단계에서 인의 방출을 방해할 가능성이 높다. 이러한 매커니즘은 질산성 질소가 탈질을 위해 인과 경쟁적으로 유기물질을 사용하여 무산소조에서 인 증가 현상이 보여진다고 판단된다. 본 연구에서는 NO_3^-의 농도가 높아 무산소 단계에서 미량의 인 방출이 진행되었다. 반면 포기조 내에서는 NO_2^-나 NO_3^-를 전자 수용체로 이용하는 박테리아에 의해 인의 흡수 현상이 발생할 수 있다.[20]

3.4. 반송비에 따른 질소와 인 제거

고정식 담체가 설치된 반응기의 반송비를 두 배로 변화하면서 폐수 내 함유된 COD, nitrate, T-P 제거 및 미생물량을 Table 4에 나타냈다. COD 제거율은 89.3과 92.3%로 반송비가 Q에서 2Q증가함에 따라 증가하였다. 대부분의 COD 제거는 무산소조에서 진행되었으며, 반송비 증가 따라 COD 제거율 증가는 무산소조에서 바이오 매스량이 증가하여 질산성질소의 탈질 과정 중 에너지원으로 유기물질을 소모하

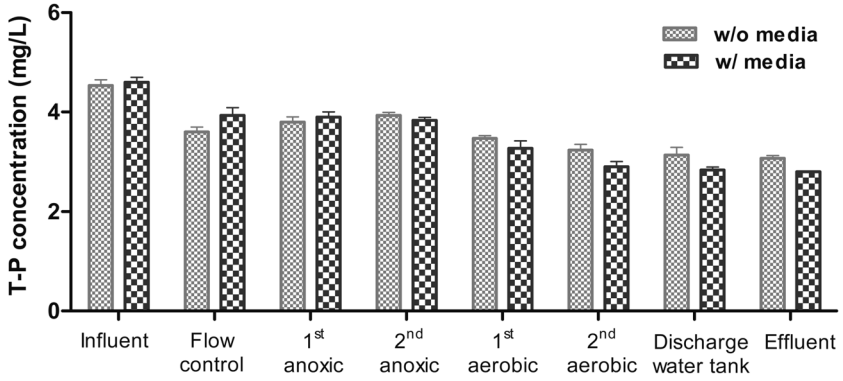


Fig. 6. Effect of fixed media on phosphate removal at each treatment stage.

Table 4. Summary of experimental results obtained for two recycling ratios in the presence of fixed media

Operation time (days)	0-67							68-157						
Recycling rate	Q							2Q						
Reactor	COD (mg/L)		NO_3^- (mg/L)		T-P (mg/L)		MLSS (g/L)	COD (mg/L)		NO_3^- (mg/L)		T-P (mg/L)		MLSS (g/L)
	Int.	Eff.	Int.	Eff.	Int.	Eff.		Int.	Eff.	Int.	Eff.	Int.	Eff.	
Influent tank	145±5		36±3		4.4±0.3		2.2±0.3	156±8		38±3		4.5±0.3		2.3±0.2
Flow control tank	76±9	52±2	40±3	39±1	3.8±0.2	3.2±0.1	1.9±0.1	80±9	47±2	44±2	42±2	3.7±0.2	3.6±0.1	2.0±0.4
1st anoxic tank	52±2	31±4	39±1	22±1	3.2±0.1	3.6±0.1	1.7±0.3	47±2	28±6	42±2	26±1	3.6±0.1	3.7±0.1	1.9±0.3
2nd anoxic tank	31±4	30±1	22±1	14±2	3.6±0.1	3.7±0.2	1.8±0.2	28±6	27±2	26±1	10±2	3.7±0.1	3.7±0.1	2.0±0.2
1st aeration tank	30±1	26±3	14±2	15±3	3.7±0.2	3.3±0.1	1.6±0.1	27±2	25±4	10±2	12±1	3.7±0.1	3.5±0.2	1.7±0.3
2nd aeration tank	26±3	23±1	15±3	15±4	3.3±0.1	3.0±0.1	1.5±0.2	25±4	20±1	12±1	14±1	3.5±0.2	3.3±0.1	1.6±0.2
Discharge water tank	23±1	15±2	15±4	12±2	3.0±0.1	3.0±0.1	0.1±0.0	20±1	11±2	14±1	10±2	3.3±0.1	3.3±0.1	0.1±0.1
Effluent		15±2		12±2		3.0±0.1	0		11±2		10±2		3.3±0.1	0
Removal efficiency (%)	89.6		66.6		31.8			92.3		73.6		26.6		

Table 5. Nitrogen mass balance with different recycling rate for fixed media and without fixed media

	Recycling rate	N Input	N Output			
		mg/cycle	$M_{Eff,T}$[a)]	M_{Waste}[b)]	$M_{De,T}$[c)]	sum
w/o media	-	38.4	13.9	5.5	4.2	23.6
	-	38.2	14.7	6.9	5.6	27.2
w/ media	Q	36.5	14.2	7.0	7.4	28.6
	2Q	38.2	10.6	8.1	12.1	30.8
	Recycling rate	%	$M_{Eff,T}$	M_{Waste}	$M_{De,T}$	% N
w/o media	-	100	36.2	14.3	10.9	61.4
	-	100	38.5	18.1	14.7	71.3
w/ media	Q	100	35.9	19.2	20.3	78.4
	2Q	100	27.8	21.2	31.7	80.6

[a)] $M_{Eff,T}$: 상등배출 질소 총 양(mg/cycle)
[b)] M_{waste} : 슬러지 폐기 제거 질소량(mg/cycle)
[c)] $M_{De,T}$: 총 탈질소 양(mg/cycle)

였기 때문으로 판단된다.[21] 질산성 질소는 반송비 증가에 따라 제거율이 약 7% 증가하였다(Table 4). 일반적으로 폐수에는 암모니아성 질소를 함유하고 있어 내부반송율 증가 시 질산화 반응이 촉진되어 질산염 농도가 증가한다.[22] 유입질소(N input)를 기준으로 무산소조 구간에서 반송과 담체에 따른 질소물질수지(% N balance)를 Table 5에 나타내었다. 질소물질수지를 비교하였을 때 담체를 넣은 경우 61.4에서 71.3%로 증가하였으며, 반송비를 증가한 경우 슬러지폐기 제거 질소량과 탈질소 양이 증가하여 질소물질 수지가 80.6%를 나타냈다, 유입질소와 유출질소의 총계를 비교하여 질소물질수지 결과 담체를 넣었을 때 탈질 효율이 증가하였고, 반송비를 증가시 탈질 효율의 증가를 확인할 수 있었다, 이는 탈질을 위해 필요한 유기물질이 반송시 유입수와 함께 공급되어 탈질 효율이 증가된 것으로 판단된다. 본 연구에 사용된 폐수는 암모니아성 질소 성분은 존재하지 않았지만 높은 질산성 질소를 함유하고 있어 폐수를 반송 시 무산소조에 유입되는 질산염 농도가 높아 탈질율이 높아진 것으로 사료된다.

담체가 있는 조건에서 반송이 2배 증가된 경우, 인 제거 효율은 36.3에서 26.6%로 감소하였다. 인 제거 효율이 낮은 것은 반송에 따른 SRT 증가에 의한 낮은 슬러지 인발량과 반응기내에 저농도 유기물 농도 유지 및 질산염에 의한 폴리 인산염 고갈에 따른 인산염 이용 박테리아 대사의 비활성으로 판단된다.[23]

4. 결 론

고정 담체를 이용한 소규모 하수처리 시스템을 설치하여 담체의 유무와 반송에 따른 단일 반응기내 영양염 제거율과 미생물의 활성변화에 대해 조사하였다. 담체를 넣은 경우 미생물의 양은 무산소조에서 약 0.4 g MLSS/day 증가를 보였고, FISH 분석결과 무산소조에 분포된 미생물 중 58.7%가 탈질계열인 *Pseudomonas aeruginosa*로 나타났다. 총 질소는 담체를 넣은 경우 초기농도의 약 60%가 제거되어 담체를 넣지 않을 때보다 약 18% 이상 증가하였으며 2배 반송을 하였을 때 73.6%로 증가하였다. 반면 인의 경우 반송 운전시 인의 제거율이 감소하였다. 본 연구 결과 담체 설치와 슬러지 반송은 하수처리 시스템에서 질소를 효율적으로 제거하는데 중요한 인자로 사료된다.

사 사

본 연구는 환경부 “차세대 에코이노베이션사업(글로벌탑 환경기술개발사업, GT-SWS-11-01-006-0)”과 한국연구재단 “중견연구자 지원사업(핵심연구, 2010-0026904)”의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

KSEE

참고문헌

1. Kim, Y. G. and Cho, I. H., “A study on the removal of nitrogen and phosphorus of municipal wastewater with biological coated media,” *Kor. J. Environ. Health*, **32**(1), 27~35(2006).
2. Fux, C., Boehler, M., Huber, P., Brunner, I. and Siegrist, H., “Biological treatment of ammonium-rich wastewater by partial nitritation and subsequent anaerobic ammonium oxidation (anammox) in a pilot plant,” *J. Biotechnol.*, **99**, 295~306(2002).
3. Anh, Y. H., “Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: A review,” *Proc. Biochem.*, **41**, 1709~1721(2006).
4. Kim, A. R., Kim, H. C., Seo, D. C., Park, J. H., Kim, S. H., Lee, S. T., Jeong, T. U., Choi, J. H., Kim, H., Cho, J. S. and Heo. J. S., “Selection of optimum filter media in small-scale livestock wastewater treatment apparatus by natural purification method,” *Kor. J. Soil Sci. Fert.*, **44**, 285~

292(2011).
5. Jang, A., Kim, H. S. and Kim I. S., "Effect of nitrate and nitrite load on denitrification reaction in anoxic biofilm reactor," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **22**(9), 1617~1625(2000).
6. Yoon, C. H., Kim, M. S. and Kim, S. H., "Characteristics of biological nitrogen removal for low C/N ratio municipal wastewater using methanol as an external carbon source in A_2O fluidized media process," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **28**(6), 687~692(2006).
7. Jung, Y. J., Min, K. S., Lee, J. K. and Lim, K. H., "Evaluation of sewage treatment with surface modified waste-tire media using batch activated sludge system," *J. Kor. Soc. Environ. Eng*., **25**(6), 682~687(2003).
8. Seon, Y. H., "A study on removal of organics, nitrogen and phosphorus of domestic wastewater in pilot-scale upflow packed bed column reactor," *Kor. J. Biotechnol. Bioeng.*, **22** (4), 191~196(2007).
9. Park, W. and Ganczarczyk, J. J., "Gravity separation of biomass washed-out from an aerated submerged filter," *Environ. Technol.*, **15**, 945~955(1994).
10. APHA, AWWA, and WPCF, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater," 17th edition, American Public Health Association, Washington, D. C., (1989).
11. Amann, R. I., Fuch, B. M. and Behrens, S., "The identification of microorganisms by fluorescence in situ hybridization," *Curr. Opin. Microbiol.*, **12**(1), 231~236(2001).
12. Blackburne, R. Yuan, Z. and Keller, J., "Kinetic characterization of an enriched Nitrospira culture with comparison to Nitrobacter," *Water Res.*, **41**(14), 3033~3042(2007).
13. Kim, D. J., Kwon, H. J., Yoon, J. Y. and Cha, G. C., "Nitrite accumulation on characteristics and quantitative Analyses of Nitrifying and denitrifying bacteria in a sequencing batch reactor," *J. Kor. Soc. Water Qual.*, **24**(3), 383~390(2008).
14. Kim, J. H., Chen, M., Kishida, N. and Sudo, R., "Integrated real-time control strategy for nitrogen removal in swine wastewater treatment using sequencing batch reactors," *Water Res*., **38**(14-15), 3340~3348(2004).
15. St. John, R. T. and Hollocher, T. C., "Nitrogen 15 Tracer Studies on the Pathway of Denitrification in Pseudomonas aeruginosa," *J. Biol. Chem.*, **252**(1), 212~218(1977).
16. Gaston, B., Ratjen, F., Vaughan, J. W., Malhotra, N. R., Canady, R. G., Snyder, A. H., Hunt, J. F., Gaertig, S. and Golderg, J. B., "Nitrogen Redox Balance in the Cystic Fibrosis Airway: Effects of Antipseudomonal Therapy," *Am. J Resp. Crit. Care.*, **165**(3), 387~390(2002).
17. Kim, D. J. and Kim, S. H., "Effect of nitrite concentration on the distribution and competition of nitrite-oxidizing bacteria in nitratation reactor systems and their kinetic characteristics," *Water Res.*, **40**(5), 887~894(2006).
18. Kim, D. J. and Seo, D. W., "Selective enrichment and granulation of ammonia oxidizers in a sequencing batch airlift reactor," *Proc. Biochem.*, **41**(5), 1055~1062(2006).
19. Ahn, J., Daidou, T., Tsuneda, S. and Hirata A., "Characterization of denitrifying phosphate-accumulating organisms cultivated under different electron acceptor conditions using polymerase chain reaction-denaturing gradient gel electrophoresis assay," *Water Res.*, **36**(2), 403~412(2002).
20. Chuang, S. H., Ouyang, C. F. and Yuang, H. C., "Effects of SRT and DO on nutrient removal in a combined AS-biofilm process," *Water Sci. Technol.*, **36**, 19~27(1997).
21. Zhang, J., Zhang, Y., Liu. W., Quan, X., Chen, S., Zhao, H., Jin, Y. and Zhang, W., "Evaluation of removal efficiency for acute toxicity and genotoxicity on zebrafish in anoxic-oxic process from selected municipal wastewater treatment plants," Chemosphere, doi.org/10.1016/j.chemosphere(2012).
22. Asadi, A., Zinatizadeh, A. A. L. and Sumathi, S., "Simultaneous removal of carbon and nutrients from an industrial estate wastewater in a single up-flow aerobic/anoxic sludge bed (UAASB) bioreactor," *Water Res.*, **46**(15), 4587~4598 (2012).
23. Chuang, S. H., Ouyang, C. F. and Wang, Y. B., "Kinetic competition between phosphorous release and denitrification on sludge under anoxic condition," *Water Res.*, **30**, 2961~ 2968(1996).