

페타이어 담체를 이용한 파일럿 규모 유동상 생물막 공정에서 하수의 질소제거에 미치는 온도 영향

박운지 · 안중화[†] · 이찬기

강원대학교 지구·환경공학부

(2007년 12월 14일 접수, 2008년 4월 7일 채택)

Effect of Temperature on the Nitrogen Removal of Municipal Wastewater in a Pilot-scale Moving Bed Biofilm Reactor with Waste-tire Media

Woon-Ji Park · Johng-Hwa Ahn[†] · Chan-Ki Lee

Division of Environmental and Geosystem Engineering, Kangwon National University

ABSTRACT : This research was conducted to elucidate the effect of temperature on the nitrogen removal of municipal wastewater with waste-tire media. The experiments were carried out in laboratory-scale batch reactor and pilot-scale moving bed biofilm reactor filled at a 0.15 filling ratio with waste-tire media, respectively. In batch tests, specific nitrification rate(SNR) with media was $3.4 \text{ mg NH}_4^+\text{-N/g Mixed-Liquor Volatile Suspended Solid(MLVSS) \cdot hr}$, compared with $1.7 \text{ mg NH}_4^+\text{-N/g MLVSS} \cdot \text{hr}$ without media. In pilot-scale test with media, total nitrogen removal efficiency increased from $53 \pm 8\%$ to $76 \pm 5\%$ as the temperature increased from $9 \sim 10^\circ\text{C}$ to $20 \sim 24^\circ\text{C}$. At the temperature of $9 \sim 10^\circ\text{C}$, $10 \sim 20^\circ\text{C}$, and $20 \sim 24^\circ\text{C}$, the SNRs were 0.8 ± 0.5 , 3.1 ± 1.9 , and $3.4 \pm 2.1 \text{ mg NH}_4^+\text{-N/g MLVSS} \cdot \text{hr}$ and the specific denitrification rates(SDNR) were 0.6 ± 0.2 , 1.1 ± 0.6 , $1.4 \pm 0.6 \text{ mg NO}_3^-\text{-N/g MLVSS} \cdot \text{hr}$, respectively. The overall activities of biomass in anaerobic, anoxic, and oxic zones at $20 \sim 24^\circ\text{C}$ increased to 22, 20, and 15%, compared with those at $9 \sim 10^\circ\text{C}$, respectively. The activity distribution of *Nitrosomonas* and *Nitrobacter* also increased with the increase of temperature.

Key Words : Temperature, Moving Bed Biofilm Reactor, Specific Nitrification Rate, Specific Denitrification Rate, Pilot Scale, Waste-tire Media

요약 : 페타이어 담체 유·무에 따른 질소 제거 효과와 담체를 충전한 유동상 생물막 공정의 질소제거 특성을 알아보고자 실험을 수행하였다. 하수처리장 유입하수를 이용해 페타이어 담체 유·무에 따른 질소 제거 정도는 실험실 규모 회분식 실험을 이용하고, 온도가 질소제거에 미치는 영향은 담체를 15% 충전한 파일럿 규모 유동상 생물막 공정을 약 370일 동안 장시간 운전을 통해 알아보았다. 페타이어 담체 유·무에 따른 질산화율은 3.4 및 $1.7 \text{ mg NH}_4^+\text{-N/g Mixed-Liquor Volatile Suspended Solid(MLVSS) \cdot hr}$ 로 담체를 투입한 경우 질소 제거가 더 효과적이었다. 온도범위가 $9 \sim 10^\circ\text{C}$ 에서 $20 \sim 24^\circ\text{C}$ 로 증가하였을 때 총 질소제거효율은 $53 \pm 8\%$ 에서 $76 \pm 5\%$ 까지 증가하였다. 온도가 $9 \sim 10^\circ\text{C}$, $10 \sim 20^\circ\text{C}$, $20 \sim 24^\circ\text{C}$ 에서 질산화율은 0.8 ± 0.5 , 3.1 ± 1.9 , $3.4 \pm 2.1 \text{ mg NH}_4^+\text{-N/g MLVSS} \cdot \text{hr}$ 로, 탈질율은 0.6 ± 0.2 , 1.1 ± 0.6 , $1.4 \pm 0.6 \text{ mg NO}_3^-\text{-N/g MLVSS} \cdot \text{hr}$ 로 나타났으며, 전체미생물 중 부착미생물은 17 ± 7 , 20 ± 6 , $22 \pm 6\%$ 로 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 미생물 총활성도는 온도가 $9 \sim 10^\circ\text{C}$ 에서 $20 \sim 24^\circ\text{C}$ 으로 증가함에 따라 혐기조, 무산소조, 호기조에서 22, 20, 15% 증가하였고 질산화 미생물인 *Nitrosomonas*와 *Nitrobacter* 활성분율도 증가하였다.

주제어 : 온도, 유동상 생물막 공정, 질산화율, 탈질율, 파일럿, 페타이어 담체

1. 서론

최근 하수처리장 방류수 수질기준이 점차 강화됨에 따라 하수의 고도처리 필요성이 부각되고 있으며, 특히 미처리된 질소의 수계 유입은 부영양화와 적조를 유발하므로 질소 제거가 절실한 실정이다. 강화된 수질기준을 만족시키기 위해서는 재래식 활성슬러지공정에 질소를 제거하는 3차 처리공정을 도입하여야 하는데, 부지난이 심각한 국내 실정을 고려해 볼 때 기존설비를 개조하더라도 추가적인

부지확보가 필요 없는 담체를 이용한 생물학적 영양염류 제거(Biological Nutrient Removal, BNR) 공정이 효과적이면서도 경제성을 확보할 수 있는 대안이라 할 수 있다.¹⁾ 영양염류를 제거하는 BNR 공법에는 Anaerobic/Anoxic/Oxic (A²O), 연속회분식반응기(Sequencing Batch Reactor, SBR), Anaerobic/Oxic(A/O) 공법 등이 있으며,²⁾ BNR 공법에 담체를 결합한 부착증식의 유동상 생물막 공법(Moving Bed Biofilm Reactor, MBBR)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

유동상 생물막 공법은 담체에 고농도의 미생물을 부착하여 오염물질을 처리하므로 기존의 활성 슬러지 공정보다 동일 용적당 높은 미생물을 유지하여 고효율을 얻을 수

[†] Corresponding author

E-mail: johngghwa@kangwon.ac.kr

Tel: 033-250-6357

Fax: 033-254-6357

있을 뿐만 아니라,^{3,4)} 담체를 공기를 이용하여 유동시키므로 산소전달이 유리하다.^{5,6)} 또한, 유동상 생물막 공법은 부유성장공법에 비해 높은 고형물 체류시간(Sludge Retention Time, SRT)을 유지할 수 있어 기질의 부하변동에 강하고 운전관리가 용이하며 슬러지 발생량이 적다는 장점을 가지고 있기 때문에 하·폐수 고도처리에 많이 사용하고 있다.⁷⁾ 이러한 생물막 공법의 적용 예로, 노르웨이에서는 기존의 활성슬러지 공정의 질소제거를 위해 유동상 생물막 공정으로 개조하여 몇몇의 파일럿 규모로 운전하여 그 성능을 입증한 바 있다.⁸⁾

유동상 담체를 투입한다고 해서 반드시 높은 처리효율을 얻을 수 있는 것은 아니다. 유동상 담체의 경우 공기를 이용하여 유동시키므로 상대적으로 산소전달에는 유리하나 담체의 형태나 재질에 따라 많은 전단응력이 가해지기 때문에 미생물 부착이 상대적으로 힘들다.⁹⁾ 또한, 미생물막 탈리 현상에 의한 처리효율 저하가 나타난다. 따라서 질산화 미생물이 효과적으로 고정될 수 있는 담체를 선정하고 높은 농도의 질산화 미생물을 유지하는 것이 관건이며, 특히 질산화 미생물을 효과적으로 고정화하기 위해서는 담체표면에 도포된 흡착제 표면의 거칠기가 중요하다. 담체 중 페타이어에 대한 기존 문헌을 살펴보면, 페타이어 분말을 이용하여 제조된 기존의 페타이어 담체와 흡착제로 코코넛재질의 활성탄분말을 사용하여 새롭게 개발한 질산화 페타이어 담체와의 하수처리 성능 비교를 위해 온도, 부하 및 수리학적 체류시간(Hydraulic Retention Time, HRT) 변화에 따른 비질산화율(Specific Nitrification Rate, SNR) 등을 측정된 결과, 흡착제로 코코넛재질의 활성탄분말을 사용한 페타이어 담체가 기존 담체에 비해 SNR이 1.2~1.6 배 이상 높은 3.3~4.8 mg NH₄⁺-N/g MLVSS · hr 값을 나타내어 표면 거칠기, 다공성, 비표면적과 같은 흡착제 재질의 중요성을 확인하였으며,¹⁰⁾ 페타이어 담체를 이용한 도시하수 처리를 통해 본 담체 효과를 입증하기도 하였다.¹¹⁾

질산화 반응은 미생물 활동에 영향을 받으므로 미생물 성장과 활성에 영향을 미치는 운전인자, 환경인자 등에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 생물막을 이용한 질소제거 시에는 미생물종의 분포가 생물막 깊이에 따라 다르게 분포되며, 유기물질 농도, 온도, 용존산소, pH, HRT, 알칼리도 등이 미생물 성장 및 활성에 영향을 미친다.^{12~15)} 이 중에서도 온도는 질소제거에 관여하는 미생물인 *Nitrosomonas*와 *Nitrobacter*의 성장 속도 및 활성에 영향을 준다.^{16,17)}

우리나라는 높은 연교차로 인하여 겨울철 평균기온이 10℃ 이하로 유지되어 겨울철 유입하수 수온이 평균 8~9℃로 생물학적 처리공정의 미생물 활성도에 악영향을 미치고 저조한 처리효율로 이어져 겨울철 처리장 운전에 문제가 발생하므로 질소제거를 위한 생물학적 처리 공정에서 온도 변화에 따른 미생물 특성 및 공정 성능에 대한 연구가 필요하다.¹⁸⁾ 따라서 본 연구에서는 페타이어 충전 여부에 따른 질소제거정도와 페타이어 담체를 충전한 파

일럿 규모의 유동상 생물막 공정에서 온도 변화에 따른 질소 제거 특성을 살펴보고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 하수 및 페타이어 담체

하수는 경기도내 한 하수종말처리장 1차 침전지 유출수를 실험에 사용하였고(Table 1), 담체는 페타이어를 사용하였다. 기존 논문을 살펴보면 담체 충전율은 재질, 밀도, 크기 등을 고려하여 10~70% 범위를 사용하고 있으며,^{19~21)} 많은 미생물 유지를 위해 과도하게 담체를 충전하면 반응기 실 유효체적이 감소되어 HRT가 짧아져 유출수질이 악화될 수 있다. 따라서 페타이어 담체특성, 유동성, 유입부하 등을 고려한 기존문헌²²⁾을 바탕으로 충전율을 15%로 하였다.

2.2. 실험실 규모 회분식 실험

페타이어 담체 유·무와 온도변화(14℃, 24℃)에 따른 질소 제거 효과를 평가하기 위해 유효용적이 5 L인 원통형 형태의 반응조 2개를 제작하여 호기성 조건에서 회분식 실험을 수행하였다. 담체는 반응조의 15%에 해당하는 양을 주입하였고, 실험에 필요한 슬러지는 파일럿 장치에서 온도별(14±2℃, 24±2℃) 1개월 이상 순운기간을 가진 슬러지를 직접 채취하여 사용하였다. Mixed-Liquor Volatile Suspended Solid(MLVSS)는 2,400 mg/L 정도로 유지하였고, NH₄⁺-N 초기농도는 30 mg/L로 하여 동일한 조건에서 담체 유·무 및 온도변화에 따른 SNR을 측정하였다. SNR은 반응조내 산기관(diffuser)을 설치하여 폭기하면서 3시간 동안 15분 간격으로 시료를 채취한 후 NH₄⁺-N 농도를 측정하여 구하였다.¹¹⁾

2.3. 파일럿 규모 실험

파일럿 규모의 실험장치는 혐기조, 무산소조, 호기조로 구성되어 있는 A²/O공법에 호기조 유출수의 용존산소 농도를 저감시켜 무산소조로의 반송 시 탈질 효율을 증가하기 위한 산소저감조를 추가한 것이 특징이다(Fig. 1). 호기조는 미생물이 부유 및 부착성장을 하도록 유동성 페타이어 담체를 15% 충전하였다. 원수저장탱크와 침전조 용량을 제외한 반응조 총 용량은 63.7 m³이며, 호기조에는 산소공급과 담체 유동을 위해 산기관과 수중믹서를 설치하였고 원통형 배플(baffle)을 설치하여 담체의 유출을 방지하였다.

반응조는 약 370 일간 유입 유량 230 m³/d로 운전하였으며, 내부반송율은 유입 유량의 200%로, 슬러지 반송율은 Mixed-Liquor Suspended Solid(MLSS) 농도를 2,000~3,000 mg/L 범위로 유지하기 위해 유입 유량의 50%로 운전하였다. 잉여슬러지는 1일 2회씩 주기적으로 폐기하였으며, SRT는 4.9~25.5 day, 반응조 수온은 9~24℃로 운전하였다.

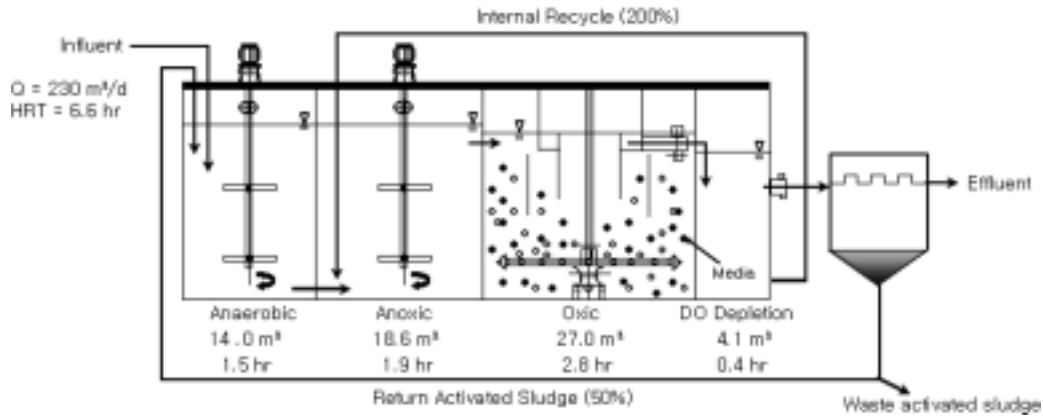


Fig. 1. Schematic diagram of the moving bed biofilm reactor.

2.4. 미생물 활성도 및 부착미생물량 측정방법

미생물 활성도를 측정하기 위해 Koopman 등²³⁾의 방법을 수정하여 2-(p-Iodophenyl)-3-(p-Nitrophenyl)-5-phenylTetrazolium chloride(INT)을 이용한 탈수소 효소 활성도(DeHydrogenase Activity, DHA)법을 이용하였다.²⁴⁾ INT 0.2%(w/v) 용액은 멸균수를 사용하여 준비하였다. 부착미생물의 경우 0.1% sodium pyrophosphate(Na₄P₂O₇) solution(pH = 7.4) 10 mL에 담체를 담아 2분간 강력한 진동으로 털어내는 것을 세 번 반복하여 30 mL 시료를 준비하였다. 혼합하여 균일한 시료 5 mL를 15 mL의 cap tube에 넣은 후, 0.2% INT를 1.0 mL 가한 후 천천히 혼합 후 20°C의 암소에 20분간 배양하였다. 배양 후에 37% 포름알데히드(formaldehyde) 용액을 1.0 mL 첨가하여 시료를 고정시킨다. 고정시킨 시료는 원심분리기에서 2,500 rpm에서 10분간 원심 분리하여 상등수를 제거하면 INT-formazan(INTF)만 잔류하게 된다. INTF는 물에 불용성이므로 유기용매인 2+3 아세톤/demethyl sulfoxide(DMSO)를 10 mL 가하여 혼합 후 암소에서 20분간 반응시켜 INTF를 추출하였다. 다시 원심분리기에서 10분간 2,500 rpm으로 원심 분리한 다음 상등수만 취하여 465 nm에서 흡광도 측정하여 식 (1)을 이용하여 DHA를 구하였다.³⁾ 이 식에서 D₄₆₅는 465 nm에서 시료 흡광도, V₁는 용매 부피(mL), C는 MLVSS 농도(g MLVSS/L), V₂는 추출 시 INT 처리한 시료 부피(mL), t는 배양 시간(min), F는 INT와 포름알데히드 용액 희석 보정 계수(0.714)를 나타낸다.

$$DHA(mg\ O_2/g\ MLVSS \cdot d) = \frac{905 \times D_{465} \times V_1}{C \times V_2 \times t \times F} \quad (1)$$

부착미생물량 측정은 알칼리 초음파 세정에 의한 방법을 사용하였고, 담체에 부착된 미생물의 젖은 무게와 건조 무게는 다음과 같은 절차에 의해 측정하였다. 우선, 미생물이 부착된 담체의 표면수를 제거한 후 부착된 습윤 매체 무게를 측정하고, 매체를 vial에 담은 후 0.125 N NaOH 20 mL를 주입하고 2시간 동안 초음파 세정과 알칼리 처

리를 병행하였다. 그리고 알칼리 세정액을 따로 모으고 여기에 증류수를 20 mL 주입하여 30분 간격으로 2회 초음파 세정을 실시한 후 알칼리 세정액과 증류수 세정액을 모아 총 고형물(Total Solids, TS)을 측정하여 미생물의 건조무게 및 함수율을 측정하였다. 그리고 세정이 완료된 매체의 표면수를 제거하고 매체의 습윤 무게를 측정하여 미생물이 부착된 매체무게와 미생물이 탈리된 매체무게의 차를 측정하여 미생물의 습윤 무게를 계산하였다.²⁵⁾ 위와 같은 절차에 의해 도출된 부착미생물의 젖은 무게 및 건조무게로부터 다음의 식 (2)~(4)를 이용하여 생물막 두께, 생물막 건조밀도, 단위면적당 부착된 미생물량을 산정하였다.²⁶⁾ 젖은 생물막 밀도는 탈리된 미생물 응집체 밀도값 1.017 g/cm³을 적용하였다.²⁷⁾

$$\text{생물막 두께}(\mu m) = \frac{\text{부착미생물의 젖은 무게}(g)}{\text{젖은 생물막의 밀도}(g/cm^3) \times \text{매체의 표면적}(m^2)} \quad (2)$$

$$\text{생물막 건조밀도}(mg/cm^3) = \frac{\text{부착미생물의 건조 무게}(g)}{\text{생물막 두께}(\mu m) \times \text{매체의 표면적}(m^2)} \times 1,000 \quad (3)$$

$$\text{단위면적당 부착미생물량}(mg/cm^2) = \frac{\text{부착미생물의 건조 무게}(g) \times \frac{1}{10}}{\text{매체의 표면적}(m^2)} \quad (4)$$

2.5. 미생물 활성분율 측정방법³⁾

생물막내 heterotrophs와 nitrifiers(Nitrosomanas, Nitrobactor)의 활성분율을 측정하기 위해 4개의 15 mL tube에 시료를 5 mL씩 넣었다. 그 중 하나는 negative control 시료로서 37% formaldehyde solution 1 mL을 첨가하여 미생물 반응을 정지시켜 다른 실험과의 대조군으로 사용하였다(A). 그리고 나머지 3개 시료 중 한 곳에는 allylthiourea(ATU)와 NaClO₃를 각각 0.5 mL(질산화 활성을 완전히 저해하고, 유기물 산화에는 영향을 주지 않는 최소농도 : ATU(15 mg/L), NaClO₃(1.6 mg/L))씩 첨가하였다(B). 그리고 한 곳에는 ATU

만 0.5 mL을 첨가하고 잘 혼합하여 저해제를 미생물과 30 분간 반응시키고(C), 나머지 시료는 아무런 처리도 하지 않았다(D). 반응 후 nalidixic acid solution(20 mg/10 mL)을 0.1 mL, 전자공여체로서 yeast extract 용액(30 g/L), NH₄Cl 용액(2,000 mg N/L) 및 NaNO₂용액(2,000 mg N/L)을 각각 0.1 mL, 0.2%의 INT용액(20 mg/10 mL) 1.0 mL을 모든 시료에 동시에 첨가하여 균일하게 혼합한 후에 20°C, 암소에서 24시간 배양하였다. 배양 후 37%의 formaldehyde solution을 1 mL 첨가하여 시료를 고정하였다. 그리고 2,500 rpm에서 10분간 원심분리 후 상등액을 제거하고 형성된 INTF를 3.5 mL 메탄올로 20°C 암소에서 20분간 추출하고, 원심분리(2,500 rpm, 10분) 후 상등액만 취하여 negative control을 대조군으로 하여 480 nm에서 흡광도를 측정하였다. 여기서, ATU는 *Nitrosomonas* 활성을 저해하고 NaClO₃는 *Nitrobacter* 활성을 저해하기 때문에 다음의 식 (5)~(7)을 이용하여 미생물의 활성분율을 구할 수 있다.

$$Heterotrophs = (B-A) / (D-A) \tag{5}$$

$$Nitrosomonas = ((D-A)-(C-A)) / (D-A) \tag{6}$$

$$Nitrobacter = ((C-A)-(B-A)) / (D-A) \tag{7}$$

여기서, A = Blank
 B = *Heterotrophs*
 C = *Heterotrophs* + *Nitrobacter*
 D = *Heterotrophs* + *Nitrosomonas* + *Nitrobacter*

2.6. 수질항목 분석방법

수질분석항목은 MLSS, MLVSS, 화학적 산소요구량(Chemical Oxygen Demand, COD_{Cr}), 생화학적 산소요구량(Biochemical Oxygen Demand, BOD), Total Kjeldahl Nitrogen (TKN), NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, Total Phosphorus(TP), PO₄-P 등으로 Standard Methods²⁸⁾와 수질오염 공정시험방법²⁹⁾에 준하여 분석하였다. Total Nitrogen(TN)은 TKN과 NO₃⁻-N 합으로 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 하수특성

실험에 사용된 하수의 성상은 Table 1에 나타내었으며, 이 자료는 약 370일 동안 파일럿 규모의 반응조 운전 시 유입원수의 분석결과이다. COD_{Cr}의 경우 80~464 mg/L의 범위로서 평균 194±95 mg/L로 나타났고, BOD의 경우 48~342 mg/L의 범위로서 평균 119±62 mg/L로 나타났다. TKN과 TP는 각각 평균 25±6 mg/L, 3.0±2.0 mg/L로 나타났다. 일반적으로 생물학적으로 분해가 용이한 하수의 COD_{Cr}/BOD의 비가 2.0 이상이면, 생물학적으로 산화되지 않는 유기물, 고분자화합물 등이 많이 포함되어 있다는 것을 의

Table 1. Characteristics of the domestic wastewater

| Parameter | Concentration(mg/L) | |
|---------------------------------|---------------------|---------|
| | Range | Average |
| SS | 32 ~ 753 | 130±115 |
| COD _{Cr} | 80 ~ 464 | 194±95 |
| SCOD _{Cr} | 27 ~ 120 | 70±22 |
| BOD | 48 ~ 342 | 119±62 |
| SBOD | 16 ~ 78 | 41±13 |
| TKN | 9 ~ 46 | 25±6 |
| NH ₄ ⁺ -N | 4 ~ 35 | 20±7 |
| NO ₃ ⁻ -N | 0.1 ~ 2.0 | 0.4±0.4 |
| TP | 1.1 ~ 8.4 | 3.0±2.0 |
| PO ₄ -P | 0.2 ~ 2.7 | 1.4±0.5 |
| COD _{Cr} /BOD | 1.1 ~ 2.5 | 1.6±0.3 |
| BOD/TKN | 1.4 ~ 13.9 | 4.7±2.6 |

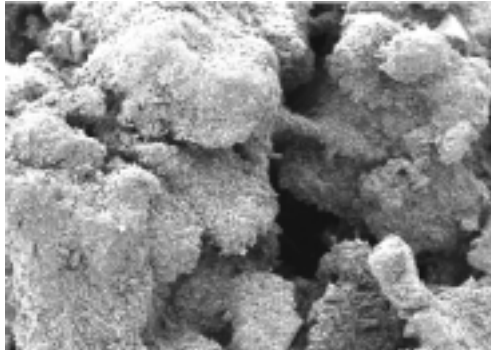
미하므로 생물학적 처리를 위해서는 폐수의 COD_{Cr}/BOD 비가 2.0 이하가 되어야 하며,³⁰⁾ 도시하수의 COD_{Cr}/BOD 비는 1.9 정도이다.³¹⁾ 이 실험에 사용한 유입수의 COD_{Cr}/BOD 비는 1.6±0.3으로 나타나 생물학적 처리가 용이함을 알 수 있다. 그리고 BOD/TKN 비가 최소 4~5이상 되어야 질소제거가 용이한 것으로 조사되었으며,³²⁾ 이 실험에 사용한 유입원수의 경우 BOD/TKN비가 4.7±2.6이었다. 따라서 유입수의 유기물 및 질소 농도는 실험을 수행하는데 큰 지장이 없는 것으로 판단된다.

3.2. 페타이어 담체 특성

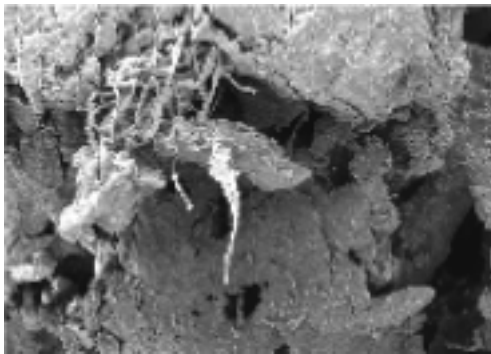
실험에 사용한 유동상 생물막 담체는 페타이어 분말과 합성수지 접착제가 주원료인 5~10 mm 크기의 입자로, 표면에 미분말 활성탄을 코팅한 비표면적 1,500 m²/m³의 페타이어를 이용한 재생 담체이다. 페타이어 담체는 페타이어 탄력성이 그대로 유지되어 조의 벽면 또는 담체 상호간의 충돌에도 마모되지 않아 내마모성이 매우 강하며, 담체 표면에 미분말 활성탄을 코팅하여 비표면적을 크게 함으로써 초기의 미생물 부착에 의한 생물막 형성을 촉진할 뿐만 아니라, 슬러지 비중 1.03 g/mL와 유사하여 호기성 반응조에서 유동하기에 적합한 조건을 가지고 있다. 페타이어의 내마모성을 평가하기 위해 투입 전·후의 입도분석을 하였다. 호기조내로 투입 전·후 담체의 입도분포율을 측정한 결과 담체의 크기가 4 mesh(4.75 mm) 이상은 투입전의 경우 98%, 투입 후 94%를 차지하는 것으로 나타났으며, 6 mesh(3.35 mm) 이상은 투입전·후 각각 100%, 99.6%로 마모 및 파쇄가 거의 없는 것으로 나타나 내마모성이 우수한 것으로 나타났다. 담체의 물리적 특성은 Table 2에 제시하였으며, 담체내 중금속은 검출되지 않았다. Fig. 2는 페타이어 담체의 Scanning Electron Microscopy(SEM) 사진으로 Fig. 2(a)는 미생물 부착 전, Fig. 2(b)는 미생물 부착 후 생물막이 형성되었을 때 담체 표면 미세구조를 나타낸 것이다.

Table 2. Characteristics of the waste-tire media

| Parameter | Value |
|--|-----------|
| Specific surface area(m ² /m ³) | 1,500 |
| Specific gravity | 1.06~1.09 |
| Media size(mm) | 5~10 |



(a) Control



(b) Biomass-attached media

Fig. 2. Scanning electron microscope photograph of (a) control and (b) biomass-attached waste tire media.

3.3. 실험실 규모에서 질소 제거 시 담체 및 온도 영향

초기 농도가 30 mg NH₄⁺-N/L일 때 담체 유·무에 따른 회분식 실험 결과 SNR이 24℃에서 3.4, 1.7 mg NH₄⁺-N/g MLVSS · hr로 담체를 사용한 경우 약 2배 더 높은 질소 제거 효율을 보였다. 기존 논문을 살펴보면 페타이어 담체 유·무에 따른 회분식 실험에서 20℃일 때 담체를 충전한 반응조에서 SNR이 2배 이상 높은 2.9~3.5 mg NH₄⁺-N/g MLVSS · hr 범위를 보고하였다.¹⁰⁾ 또한 섬모상 담체를 사용한 A²/O 공법에서 사용하지 않은 경우보다 SNR이 높게 났다.²⁾ 따라서 반응조에 담체 충전 시 더 높은 질소 제거 효율을 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 온도가 질소제거에 미치는 영향을 고찰하기 위해 온도가 14℃와 24℃일 때 페타이어 담체를 충전하여 실험한 결과 SNR이 각각 2.2, 3.4 mg NH₄⁺-N/g MLVSS · hr로 나타나 온도가 높은 경우 SNR이 높음을 알 수 있으며(Fig. 3), 이러한 결과는 SBR 형태의 반응조를 이용하여 온도변화(10~40℃)에 따른 SNR을 평가한 회분식 실험결과에서 온도가 높을수록 SNR이 높은 연구결과와 동일한 것으로 나타났다.¹⁸⁾ 이는 온도가 증가함에 따라 미생물 활성이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

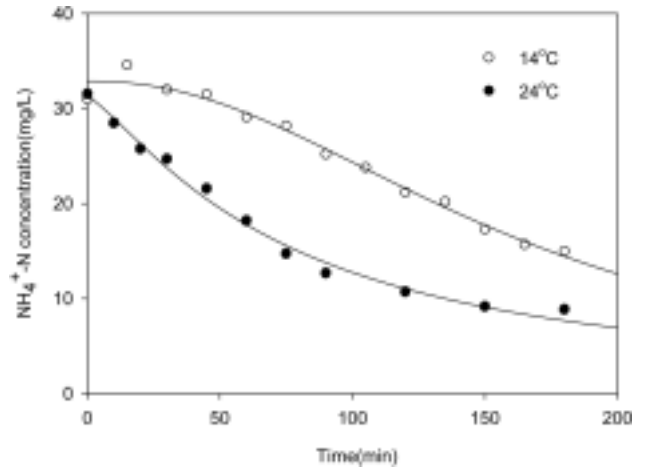


Fig. 3. NH₄⁺-N concentration with time in the batch reactor.

3.4. 파일럿 규모에서 질소 제거 시 온도 영향

페타이어 담체를 이용한 A²/O공정에서 하수처리 시 온도가 9~10℃, 10~20℃, 20~24℃에서 TN 제거효율은 53±8%, 68±11%, 76±5%로 나타났다(Fig. 4). 이는 온도가 증가함에 따라 질소 제거효율이 증가하는 경향을 보여 주고 있으며, 온도가 9~10℃에서 20~24℃로 증가하였을 때 TN 제거효율은 20% 이상 증가하였다. 온도변화에 따른 BNR 효율 특성 연구에서 12±2℃와 20±2℃일 때 각각 TN 제거효율이 64%, 77%로 온도가 증가할수록 제거효율이 10% 이상 증가한 다른 연구결과와 유사한 경향을 나타내었다.¹⁸⁾ 이는 5~30℃의 온도범위에서는 van't Hoff-Arrhenius 식이 적용되어 온도가 10℃ 증가함에 따라 질산화 미생물 성장률도 2배 이상 증가하기 때문인 것으로 판단된다.³⁾

온도에 따른 NH₄⁺-N과 NO₃⁻-N 변화를 혐기조, 무산소조, 호기조별로 살펴보면 온도에 관계없이 NH₄⁺-N 농도는 반응조를 거치면서 점차적으로 감소하고 NO₃⁻-N 농도는 점차적으로 증가함을 알 수 있다(Fig. 5). 온도가 높을수록 SNR 및 탈질율(Specific Denitrification Rate, SDNR)이 높음을 알 수 있다. 온도가 9~10℃, 10~20℃, 20~24℃에

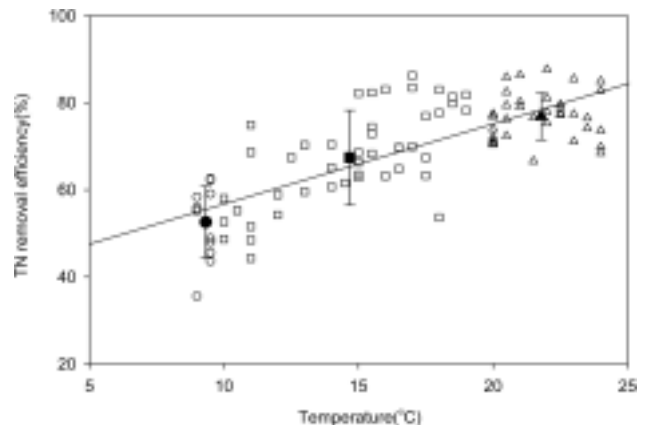


Fig. 4. Total nitrogen removal efficiency with temperature in the pilot-scale reactor.

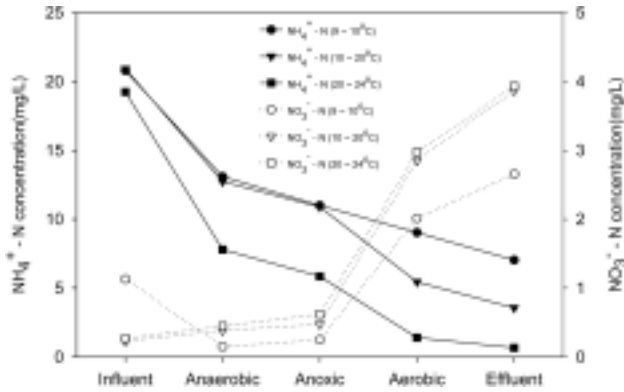


Fig. 5. Ammonium and nitrate concentrations in influent, anaerobic, anoxic, oxic, and effluent zones.

서 NH₄⁺-N 제거효율은 66.3%, 82.8%, 96.5%로 나타났으며, 온도가 9~10℃에서 20~24℃로 증가하였을 때 NH₄⁺-N 제거효율은 30% 이상 증가하였다.

혐기조로 유입되는 농도 및 부하량은 유입 하수 내 NH₄⁺-N와 혐기조로 유입되는 반송 슬러지내 NH₄⁺-N 농도와 유량을 고려하여 산정할 수 있다. 물질수지를 통해 확인한 결과 부하량의 경우 슬러지내 NH₄⁺-N 농도와 유량으로 인해 증가한 반면 농도는 반송되는 유량에 의한 희석효과로 감소하는 경향을 보였으며, 이러한 결과는 섬모상 담체를 사용하여 A²/O 공정을 운전한 다른 연구 결과와 유사한 것으로 나타났다.²⁾ 무산소조 역시 내부반송량을 고려하여 물질수지를 통해 살펴본 결과, NH₄⁺-N의 경우 온도에 상관없이 전체적으로 증가하는 현상을 보였으며, 이는 암모니아화(ammonification)현상으로 유기질소가 분해되면서 NH₄⁺-N가 증가된 것으로 판단된다.

호기조에서 암모니아 유입 부하가 증가할수록, 온도가 증가할수록 SNR이 증가함을 알 수 있다(Fig. 6). 이 연구에서 SNR 범위는 0.2~9.8(2.8±2.0) mg NH₄⁺-N/g MLVSS · hr로 나타났다. 온도별로 살펴보면, 온도가 9~10℃, 10~20℃, 20~24℃에서 SNR은 0.8±0.5, 3.1±1.9, 3.3±2.1 mg NH₄⁺-N/g MLVSS · hr로 났다. 온도가 9~10℃에서

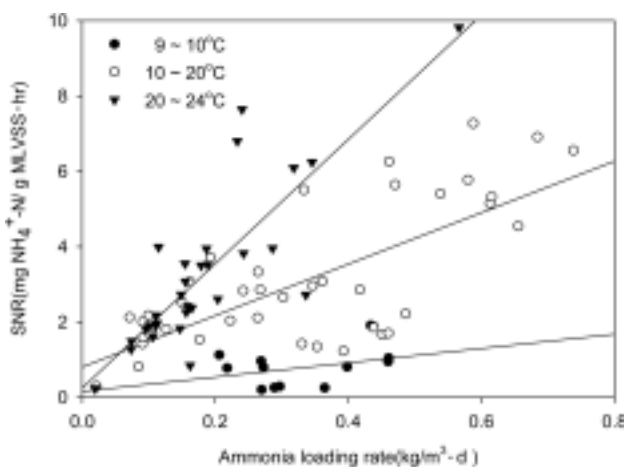


Fig. 6. Specific nitrification rate with ammonium loading rate in the pilot-scale reactor.

20~24℃로 증가함에 따라 SNR이 4배 이상 증가하여 온도가 SNR에 미치는 영향이 크음을 알 수 있다(p < 0.01). 이는 실험실 규모 실험에서 온도가 높은 경우 SNR이 더 높게 나타난 실험결과와 일치한다.

기존 논문을 살펴보면, 하수처리 시 온도가 10~20℃에서 페타이어 담체를 사용한 경우 SNR은 2.5~4.1 mg NH₄⁺-N/g MLVSS · hr, 흡착제로 활성탄분말을 사용하여 개질된 페타이어 담체에서의 SNR은 3.3~4.8 mg NH₄⁺-N/g MLVSS · hr로 보고되었으며,¹⁰⁾ SBR 반응조에 bio-ceramic 여재를 충전한 bio-ceramic SBR(BCS) II 공법에서 8.5~22.4℃ 온도범위로 운전 시 0.88~2.21 mg NH₄⁺-N/g MLVSS · hr 범위의 SNR 값을 얻었다.³³⁾ 본 연구에서는 10~20℃에서 3.1±1.9 mg NH₄⁺-N/g MLVSS · hr의 SNR을 나타내어 위에 언급한 기존 논문에서 페타이어 담체를 이용하여 얻은 SNR 값과 유사한 것으로 나타났다. 또한, 25℃에서 재래식 활성슬러지(Conventioanl Activated Sludges, CAS) 공정에서 채취한 슬러지로부터 구한 SNR(0.96 mg NH₄⁺-N/g MLSS · hr)과 막분리(Membrane Separation Activated Sludge, MSAS) 공정을 사용하여 반응조내 슬러지로부터 구한 SNR (2.28 mg NH₄⁺-N/g MLSS · hr)³⁴⁾과 비교하면 본 처리공정의 SNR이 높음을 알 수 있으며, 이는 담체에 의한 다량의 질산화미생물 확보와 유지 때문인 것으로 판단된다.

무산소조에서 온도에 따른 SDNR을 살펴보면(Fig. 7) 온도가 9~10℃일 때 SDNR은 0.6±0.2 mg NO₃⁻-N/g MLVSS · hr로 나타났으며, 10~20℃와 20~24℃의 온도조건에서는 1.1±0.6 mg NO₃⁻-N/g MLVSS · hr과 1.4±0.6 mg NO₃⁻-N/g MLVSS · hr로 나타나 온도가 증가할수록 SDNR이 증가하였다(p<0.01). 온도 전체범위(9~24℃)에서 SDNR 값은 0.2~3.3(1.1±0.6) mg NO₃⁻-N/g MLVSS · hr의 범위를 보였으며, 이 값은 SBR 반응조에 bio-ceramic 여재를 충전한 BCS II 공법에서 8.5~22.4℃로 운전 시 도출된 SDNR(1.1~1.9 mg NO₃⁻-N/g MLVSS · hr)과 유사한 것으로 나타났다.³³⁾ 그러나 유입 유기물 농도에 따른 탈질조에서 적정 질산성 질소부하를 알아보기 위해 F/M 비를 0.3~1.7 kg COD/kg MLVSS · d의 범위에서 실험실 규모로 운전한 결과인 1.3~7.5 mg NO₃⁻-N/g MLVSS · hr의 값보다 낮은 값이 나타났으며,³⁵⁾ 그 이유는 무산소조로 유입되는 F/M비 값의 차이에서 기인하는 것으로 보이며, 본 연구에서의 F/M비는 0.1~1.0(0.5±0.2) kg COD/kg MLVSS · d 범위로 위에 언급된 F/M비 범위보다 낮기 때문인 것으로 판단된다. 문헌³⁶⁾에 의하면 F/M비가 증가할수록 SDNR은 선형적으로 증가한다. 외부 탄소원에 주입에 따른 SDNR 값을 살펴보면, 폐수 및 메탄올을 사용한 경우 평균 2.9 mg NO₃⁻-N/g MLVSS · hr, 8.3 mg NO₃⁻-N/g MLVSS · hr인 것으로 보고하였으며,³⁷⁾ 활성슬러지 공정에서 하수를 탄소원으로 사용하여 20℃로 운전한 경우 4.1 mg NO₃⁻-N/g MLVSS · hr의 값을 얻었다.³⁸⁾ 이러한 결과들은 본 연구에서 얻은 SDNR 값보다 높는데, 그 이유는 본 연구에서는 외부탄소원을 주입하지 않았기 때문이다.

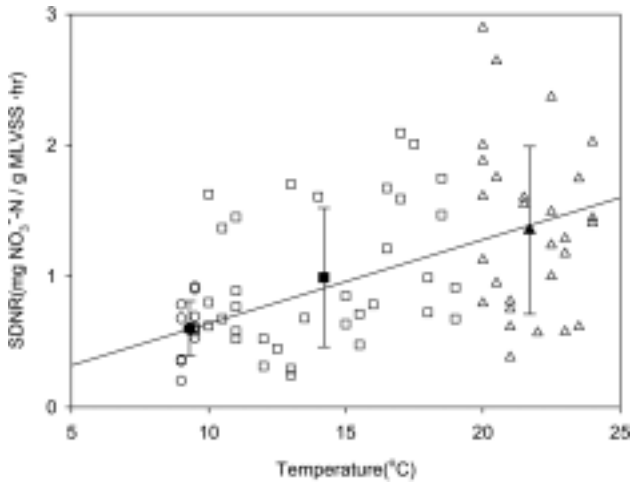


Fig. 7. Specific denitrification rate with temperature in the pilot-scale reactor.

생물학적 탈질을 통한 질소제거에서 용존산소(Dissolved Oxygen, DO) 농도는 중요한 영향인자이다. Skerman 등³⁹⁾에 의하면 bulk phase의 용존산소가 0.2 mg/L 이상일 때 SDNR이 방해받는다 하였고, Nelson 등⁴⁰⁾은 용존산소 농도가 0.13 mg/L 이상이면 탈질이 감소한다고 하였다. 이 실험장치내 무산소조의 용존산소 농도 범위는 0.02~0.19(0.06±0.03) mg/L로 탈질을 하는데 있어 용존산소 영향이 최소화 된 것으로 판단된다. 호기조 유출수 용존산소 농도가 1.75±0.60 mg/L일 때, 산소저감조 2.5 m 깊이(무산소조로 반응되는 파이프가 표면으로부터 2.5 m 하부에 위치)에서 용존산소 농도는 0.10±0.07 mg/L로 감소하였다. 따라서 무산소조 용존산소 농도를 0.2 mg/L 이하로 유지하기 위해서는 산소저감조가 필요함을 알 수 있다.

3.5. 부착미생물량 및 미생물 활성도

담체 부착 미생물량(biomass)을 측정한 결과 전체 미생물량 중 부착 미생물이 차지하는 비율(attached biomass/total biomass), 단위면적당 부착 미생물량(attached biomass per unit area), 생물막 두께(biofilm thickness), 생물막 건조밀도(biofilm dry density) 등은 온도가 높아질수록 모두 증가하는 것으로 나타났으며(Table 3), 이는 온도가 감소함에 따라 미생물의 활성이 감소하는 때문인 것으로 판단된다. 기존 문헌에서는 다공성 담체를 이용한 유동상 생물막 반응조에서 12°C에서 40°C까지 단계별 운전한 결과 20°C에서 가장 많은 부착미생물량을 유지할 수 있다고 하였는데,³⁾ 본 연구에서도 20~24°C일 때 가장 높은 값을 보여 유사한 연구결과를 보였다.

총미생물 중 부착미생물이 차지하는 비율은 9~10°C, 10~20°C, 20~24°C에서 17±7%, 20±6%, 22±6%로 나타났으며, 담체의 단위 면적당 부착미생물량은 온도가 9~10°C일 때 0.26±0.09 mg/cm², 20~24°C에서는 0.53±0.17 mg/cm²로 온도가 10°C 이상 증가함에 따라 단위면적당 부착미생물량이 2배 이상 높은 값을 보였다. 생물막 두께는 20~

Table 3. Characteristics of the attached biomass in the oxic zone

| Parameter | Temperature | | |
|---|-------------|-----------|-----------|
| | 9~10°C | 10~20°C | 20~24°C |
| Attached biomass/total biomass(%) | 17±7 | 20±6 | 22±6 |
| Attached biomass per unit area(mg/cm ²) | 0.26±0.09 | 0.37±0.13 | 0.53±0.17 |
| Biofilm thickness(mm) | 0.8±0.2 | 1.0±0.2 | 1.4±0.1 |
| Biofilm dry density(mg/cm ³) | 3.6±1.9 | 3.8±1.2 | 4.1±1.6 |

24°C일 때 평균 1.4 mm 정도로, 회전원판(Rotating Biological Contactors, RBCs) 생물막 공정을 18~25°C에서 운전한 결과 얻어진 생물막 두께 평균 1.8 mm(1.1~2.8 mm)와 유사한 값을 보였다.⁴¹⁾ 생물막 밀도는 온도변화에 따라 다소 증가하는 경향을 보이고 있으며, 전체적으로 3.6~4.1 mg/cm³의 범위로 나타나 기존 문헌⁴¹⁾에서 제시한 값 1.4 mg/cm³보다는 약 2~3배 정도 높은 값을 나타내었다.

온도가 9~10°C의 경우 혐기조, 무산소조, 호기조에서 부유미생물 활성도는 822±42, 772±39, 686±14 mg O₂/g MLVSS · d로 나타났고, 10~20°C에서는 542±72, 541±85, 480±75 mg O₂/g MLVSS · d, 20~24°C에서는 1,001±104, 926±59, 789±47 mg O₂/g MLVSS · d로 나타났다. 혐기조, 무산소조, 호기조에서 부유미생물 활성도는 9~10°C보다 20~24°C에서 22, 20, 15% 높게 나타났고, 온도에 관계없이 혐기조에서 부유미생물 활성도가 가장 높았다(Fig. 8). 따라서 부유미생물 활성도는 온도에 영향을 받을 수 있다. 부착 미생물 활성도 역시 20~24°C에서 367±7 mg O₂/g MLVSS · d로 가장 높게 나타났으며, 이는 다공성 담체를 이용한 유동상 생물막 반응조(12~25°C)에서 제시한 부착 미생물 활성도 값인 48~70 mg O₂/g MLVSS · d에 비해 높은 값을 보였다.³⁾

중속영양생물(heterotrophs)과 질산화에 관여하는 *Nitrosomonas*, *Nitrobacter*의 활성도를 분석해 보면 중속영양생물은 본 실험에서 0.75~0.93의 활성 분율을 보였다(Fig. 9). 호기조에서는 온도에 관계없이 *Nitrosomonas*가 *Nitrobacter*에 비해 활성 분율이 높았다. 이러한 특정 미생물의 활성

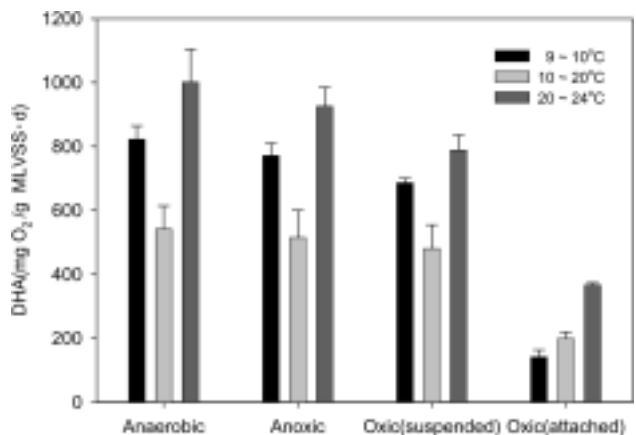


Fig. 8. Overall activity of suspended and attached biomass with temperature in anaerobic, anoxic, and oxic zones.

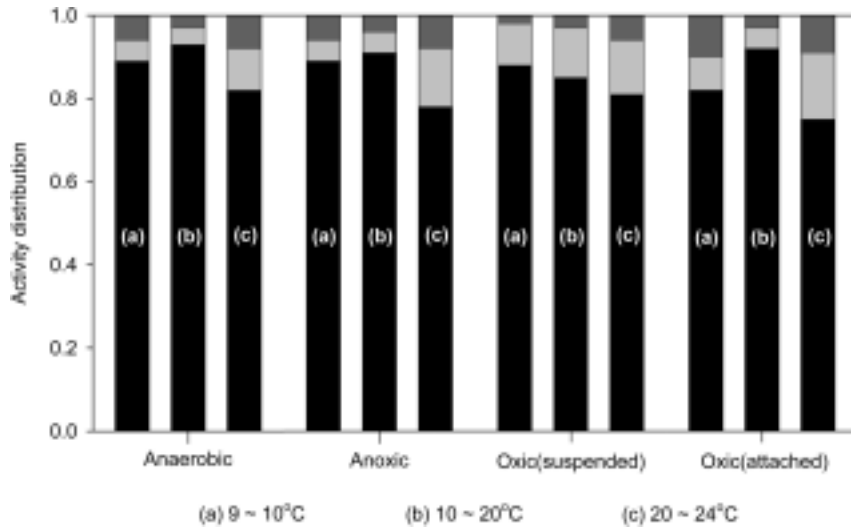


Fig. 9. Microbial activity distribution of heterotrophs(■), *Nitrosomonas*(▒), and *Nitrobacter*(□) in suspended and attached biomass with temperature in anaerobic, anoxic, and oxic zones.

은 기존문헌³⁾과 유사하게 나타났으며, 전체적으로 종속영양생물이 가장 우점하고 *Nitrosomonas*가 대체로 *Nitrobacter*에 비해 우점하는 경향을 보였다. 호기조내 부유미생물을 제외한 모든 반응조내 종속영양생물 활성 분율이 10~20°C에서 가장 높게 나타났다. 그러나 온도가 20~24°C에서는 종속영양생물 활성 분율이 가장 낮게 나타난 반면 질산화 미생물 활성 분율은 가장 높게 나타났다. 따라서 온도가 질산화 미생물의 성장 및 활성에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 온도증가에 따라 SNR이 증가한 내용과 일치하는 것으로 질산화에 있어서 *Nitrosomonas*와 *Nitrobacter*의 활성은 SNR에 직접적인 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

회분식 실험에서 페타이어 담체 유무에 따른 SNR은 3.4 및 1.7 mg NH₄⁺-N/g MLVSS · hr로 담체를 투입한 경우 질소 제거가 더 효과적이었다. 파일럿 규모 실험에서 온도가 9~10°C에서 20~24°C로 증가함에 따라 TN 제거효율은 53±8%에서 76±5%로 20% 이상 증가하였으며, SNR은 4배 이상 증가하여 온도가 생물학적 처리공정에서 질산화에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. SNR과 SDNR은 0.2~9.8 mg NH₄⁺-N/g MLVSS · hr, 0.2~3.3 mg NO₃⁻-N/g MLVSS · hr의 범위로 나타났으며 온도가 증가할수록 SNR과 SDNR 모두 증가하는 경향을 보였다. 온도가 20~24°C일 때 단위면적당 부착미생물량, 생물막 두께, 생물막 건조밀도 모두 가장 높은 값을 나타내었으며, 9~10°C일 때 보다 단위면적당 부착미생물량은 2배 이상 높게 측정되었다. 미생물 활성도는 온도가 9~10°C에서 20~24°C로 증가함에 따라 15% 이상 증가하는 것으로 나타나 온도가 미생물 성장 및 활성에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있으며, 특히 질산화 미생물인 *Nitrosomonas*와

Nitrobacter 활성 증가를 가져와 SNR에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 페타이어 담체가 있는 조건에서 온도가 높을수록 질소 제거율이 높음을 알 수 있다.

사 사

본 논문은 포스코건설에서 발주한 연구과제를 바탕으로 작성하였으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김미화, 나승우, 조갑규, 박태주, “고정생물막을 적용한 Pilot 규모 BNR공정에서 유기물농도가 낮은 하수내의 질소 제거 재현성,” 대한환경공학회지, **24**(6), 995~1003(2002).
2. 박태진, 이정민, 송경석, 조일형, 김영규, 정문호, “A₂O공정에서의 섬모상 담체 사용 유무에 따른 하수의 질소·인 제거에 관한 연구,” 한국환경위생학회지, **26**(3), 69~75(2000).
3. 임정훈, 오경아, 우혜진, 최은희, 이상일, 김창원, “MBBR에서 부착 미생물의 거동과 공정성능에 대한 온도영향,” 대한환경공학회지, **24**(10), 1819~1827(2002).
4. 전병희, “다공성 담체를 이용한 유동상 및 하이브리드 반응기에서의 질소 제거,” 대한환경공학회지, **27**(5), 542~548(2005).
5. Rusten, B., Hem, L. J., and Odegaard, H., “Nitrification of municipal wastewater in movingbed biofilm reactors,” *Water Environ. Res.*, **67**, 75~86(1995).
6. 김용환, 조재현, 김무훈, 이용우, “생물막 담체를 이용한 질산화 반응 특성 연구,” 대한환경공학회지, **19**(3), 415~424(1997).
7. 최명섭, 손인식, “RBC 반응조를 이용한 2단 A/O 공정에서 유기물질 및 질소 제거,” 한국환경위생학회지, **29**(3), 59~64(2003).

8. Rusten B., Hem L. J., and Ødegaard H., "Nitrogen removal from dilute wastewater in cold climate using moving bed biofilm reactors," *Water Environ. Res.*, **67**, 65~72(1995).
9. 조재현, 김용환, 이용우, 이원권, "생물막 신공정을 이용한 유기물 제거 및 질산화에 관한 연구," *대한환경공학회지*, **20**(3), 443~450(1998).
10. 정용준, 민경석, 이재근, 임광희, "회분식활성슬러지를 이용한 표면개질된 페타이어담체의 하수처리특성 평가," *대한환경공학회지*, **25**(6), 682~687(2003).
11. 정용준, 민경석, "활성탄 표면개질 유동상 페타이어담체가 충전된 A₂O공정의 하수처리 특성," *대한환경공학회지*, **25**(10), 1299~1304(2003).
12. Noigueira, R., Melo, L. F., Purkhold, U., Wuertz, S., and Wagner, M., "Nitrifying and heterotrophic population dynamics in biofilm reactors: effects of hydraulic retention time and the presence of organic carbon," *Water Res.*, **36**, 469~481(2002).
13. Jun, B., Tanji, Y., and Unno, H., "Stimulating accumulation of nitrifying bacteria in porous carrier by addition of inorganic carbon in a continuous-flow fluidized bed wastewater treatment reactor," *J. Biosci. Bioeng.*, **89**(4), 334~339(2000).
14. Canziani, R., Emondi, V., Garavaglia, M., Malpei, F., Pasinetti, E., and Buttiglieri, G., "Effect of oxygen concentration on biological nitrification and microbial kinetics in a cross-flow membrane bioreactor(MBR) and moving-bed biofilm reactor(MBBR) treating old landfill leachate," *J. Membr. Sci.*, **286**, 202~212(2006).
15. 김금용, 원성연, 이상일, "활성슬러지의 질산화 반응시 온도 및 독성물질(Cu)이 미치는 영향," *대한환경공학회지*, **25**(12), 1578~2583(2003).
16. 하준수, 최의소, 박재홍, 길경익, 김성원, "영양소제거 공정의 기질 정량관계에 대한 온도와 기질부하의 영향," *상하수도학회지*, **17**(6), 777~784(2003).
17. 정인철, 정병길, 성낙창, "수온 감소기와 증가기의 질소제거 특성 평가," *한국폐기물학회지*, **23**(5), 397~403(2006).
18. 신응배, 배우근, 강희만, 윤현식, 홍상기, 김송기, 윤도윤, "온도 변화에 따른 BNR(Biological Nutrients Removal) 효율 특성," *Bullet. Environ. Sci.*, **18**, 17~30(1997).
19. 김백민, "장기 SRT로 운전될 때 미디어 형태에 따른 A₂/O 공정의 영양염류 제거연구," *창원대학교 석사논문*, pp. 16~18(2005).
20. 김미화, 김영규, 박태주, "기존 처리장의 BNR 공정으로 시설개조에 따른 유기물농도가 낮은 하수내 질소제거시 호기성 반응조의 NH₄⁺-N 최적 표면적 부하율과 미디어 충전율," *대한환경공학회지*, **23**(4), 613~621(2001).
21. 최두형, 김환기, "선회류 생물학적 유동상의 최적 미디어 충전량에 관한 연구," *대한환경공학회지*, **22**(2), 331~340(2000).
22. 환경관리공단, "페타이어담체(Bio-SAC)를 이용한 유동상 생물막법 영양염류 제거기술," *환경기술검증보고서*, pp. 69~74(2001).
23. Koopman, B., Bitton, G., Logue, C., Bossart, J. M., and Lopez, J. M., "Validity of tetrazolium reduction assays for assessing toxic inhibition of filamentous bacteria in activated sludge," *Toxicity screening procedures using bacterial system*(Edited by Dickson Liu and Bernard J. Dutka), pp. 147~162(1984).
24. Caravelli, A., Giannuzzi, L., Zaritzky, N., "Effect of chlorine on filamentous microorganism present in activated sludge as evaluated by respirometry and INT-dehydrogenase activity," *Water Res.*, **38**, 2395~2405(2004).
25. 박종웅, 송주형, "페타이어로 성형제조된 부정형 과립담체에 부착된 미생물 측정방법," *상하수도학회지*, **17**(2), 255~260(2003).
26. 박종웅, 송주석, "호기성 침지형 생물막 여과장치를 이용한 오수처리," *한국물환경학회지*, **16**(4), 523~532(2000).
27. Pack, J. W. and Ganczarczyk, J. J., "Gravity separation of biomass washed-out from an aerated submerged filter," *Environ. Technol.*, **15**, 945~955(1994).
28. APHA, AWWA, WEF, *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 21th edition, Washington DC(2005).
29. 환경부, *수질오염공정시험법*(2004).
30. Hao, O. J. and Li, C. T., "Effect of slowly biodegradable organics on kinetic coefficients," *J. Environ. Eng.*, **113**(1), 147~154(1987).
31. Eckenfelder, W. W. Jr., and Ford, D. L., *Water Pollution Control*, **17**(1970).
32. 박종복, "The effects of dPAO and microbial community in the step feed 5-stage BNR process," *고려대학교 박사논문*(2002).
33. 김장규, 음영진, "유량조절과 Hybrid SBR 공정을 이용한 하수 고도처리 기술(BCS-II 공법)," *침단환경기술*, 5호, pp. 102~109(2004).
34. 안승섭, 박노삼, 이수식, 이관영, 박상현, "영양염류 제거를 위한 생물막 공정의 적용에 관한 연구," *한국환경과학회지*, **9**(5), 415~422(2000).
35. 김광수, 이상은, 안정희, "생물학적 질소제거를 위한 적정 내부반송비," *대한환경공학회지*, **25**(2), 212~216(2003).
36. Beccari, M., Passino, R., Ramadori, R., and Tandio, V., "Kinetics of dissimilatory nitrate and nitrite reduction in suspended growth culture," *J. Water Pollut. Control Fed.*, **55**(1), 58~64(1983).
37. Carucci, A., Ramadori, R., Rosetti, S., and Tomei, M. C., "Kinetics of denitrification reactions in single sludge systems," *Water Res.*, **30**(1), 51~56(1996).
38. Zhang, B., Yamamoto, K., Ohgaki, S., and Kamiko, N., "Floc size distribution and bacterial activities in mem-

- brane separation activated sludge processes for small-scale wastewater treatment/reclamation," *Water Sci. Technol.*, **35**(6), 37~44(1997).
39. Skerman. V. B., MacRae, I. C., "The influence of oxygen availability on the degree of nitrate reduction by *Pseudomonas denitrificans*," *J. Microbiol.*, **3**(3), 505~530 (1957).
40. Nelson, L. M., Knowles, R., "Effect of oxygen and nitrate on nitrogen fixation and denitrification by *Azospirillum brasilense* grown in continuous culture," *J. Microbiol.*, **24**(11), 1395~1403(1978).
41. 길경익, 이형섭, 최의소, "RBC 시스템에서 생물막 성장 및 인 제거 특성," *대한환경공학회지*, **24**(7), 1235~1242 (2002).