

낮은 C/N비에서 운영되는 유로변경식 생물여과 공정의 질소 제거 특성 Nitrogen Removal Characteristics in DynaFlow Biofilter System Using Sewage Wastewater of Low C/N Ratio

김진식 · 김규리 · 강한솔 · 원인섭 · 김금용 · 이상일[†]
Jin-Sik Kim · Kyu Ri Kim · Han Sol Kang · In Seop Won · Keum-Yong Kim · Sang-Il Lee[†]

충북대학교 환경공학과
Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

(2011년 8월 30일 접수, 2012년 3월 28일 채택)

Abstract : In this study, a 3-stage biological aerated filter (BAF) system was proposed to enhance nitrogen removal in the treatment of low carbon to nitrogen ratio (C/N ratio) municipal wastewater. Laboratory experiments were conducted to evaluate the effects of dynamic-flow at the HRT of 6 h. Results of the long-term operation of 3-stage BAF systems showed that the dynamic-flow enabled the total nitrogen removal (T-N) removal efficiency of the system to be about 7 % higher than that of non-dynamic-flow system in treating domestic wastewater due to the more efficient use of organic substrates. The overall NH₄-N removal performance was stable during the operational period due to the unique system configuration where independent nitrification occurred. It was concluded that the 3-stage BAF system proposed in this study provided excellent performance in the removal of nitrogen by employing dynamic-flow and three columns functioning as sorption, denitrification and nitrification, respectively.

Key Words : 3-Stage Biological Aerated Filter, Dynamic-Flow, Nitrification, Total Nitrogen Removal

요약 : 본 연구는 유로변경식 3단 BAF를 사용하여, C/N (TCOD_{cr}/TKN)비가 낮은 생활하수를 대상으로 질소 처리 효율을 향상시키기 위해 제안되었다. 체류시간 6시간에서의 유로변경 3단 BAF의 효과를 평가하기 위해 실험실 규모로 실시하였다. 유로변경식 3단 BAF 공정이 3단 BAF보다 총 질소 제거효율이 약 7% 높은 것으로 나타났는데, 이것은 유기물을 효율적으로 사용하였기 때문이다. 또한 암모니아성 질소의 제거는 독립적인 호기조에서 질산화만을 수행하였기 때문에 질산화 효율이 안정적이었다. 이것은 본 연구에서 제안한 유로변경식 3단 BAF공정이 유기물 흡착을 이용하여 질소의 제거, 탈질 및 질산화에서 우수한 효율을 보였다.

주제어 : 유로변경식 생물여과공정, 유기물 흡착, 탈질, 총 질소 제거

1. 서론

현재 설치되는 마을하수도는 정부의 4대강 물 관리 종합 대책 및 하수도법 시행규칙상의 방류수 수질 기준 등을 감안하여 BOD 및 SS는 10 mg/L, COD_{MN} 40 mg/L, T-N 20 mg/L, T-P 2 mg/L 이하가 되도록 규제되고 있다. 정부에서는 2012년부터 폐수 방류수 수질기준을 최대 20배 강화하는 내용으로 「수질 및 수생태계보전에 관한 법률」 시행규칙을 개정 공포했으며, 이는 T-P (2 mg/L → 0.2 mg/L), COD_{MN} (40 mg/L → 20 mg/L) 및 BOD (10 mg/L → 5 mg/L)만 해당되는 개정안이다.¹⁾ 현행 기준 농도는 미국 등 선진국의 유출수 기준(질소: 3~10 mg/L)에 비해 높은 편으로 수질보전과 수서 생태계의 보호를 위해서는 조만간 선진국 수준으로 규제될 것으로 예상된다.¹⁾

현재 마을하수도에 적용되는 영양염류 처리 공정은 A²/O 계열의 단일 슬러지 공정(single-sludge system)과 SBR (Sequencing Batch Reactor) 공정이 대부분이다. 그러나 위와 같은 공정으로 선진국 수준으로 강화될 질소 수질 기준에 맞추기는 힘들 것으로 판단된다. 그 이유는 우리나라 하수는 C/N

(TCOD_{cr}/TKN)비가 낮아서 질소를 처리하는데 한계가 있다는 점과 마을하수도 처리에 가장 많이 사용되고 있는 SBR 공정은 후탈질 기법을 이용하기 때문에 탈질시 반드시 필요한 유기물이 무산소조(anoxic) 조건 전에 운영되는 호기(aerobic) 조건에서 파괴되어 탈질시에 이를 이용할 수 없기 때문이다.²⁾ 또한, 활성슬러지를 이용한 생물학적 처리방법은 유기물제거에는 탁월한 효과를 나타내지만, 유입수의 부하율 상승으로 인한 슬러지 팽화(bulking), 넓은 부지면적 소요 및 낮은 C/N (TCOD_{cr}/TKN)비에서의 질소제거 효율이 매우 낮아 외부 탄소원 없이는 탈질 반응을 완수할 수 없듯이 많은 문제점을 내포하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 미생물의 유실을 방지할 수 있는 부착성장 미생물과 낮은 C/N (TCOD_{cr}/TKN)비에서 탈질 반응 완수를 위하여 유로변경식 3단 생물여과공정(Biological Aerated Filters: BAF) 공법을 운전하였다.

본 연구에서는 유로변경식 3단 생물여과공정 공법의 질소 제거능을 평가하기 위해 기존의 생물여과공정을 대조군으로 하여 상호 비교하였다.

[†] Corresponding author E-mail: gatorlee@chungbuk.ac.kr Tel: 043-261-2469 Fax: 043-272-2469

Table 1. The characteristics of Influent wastewater

Parameter	Concentration (\pm Standard deviation)
TCOD _{cr} (mg/L)	226.9 \pm 53.9
SCOD _{cr} (mg/L)	62.2 \pm 22.5
TKN (mg/L)	36.4 \pm 6.9
NH ₄ -N (mg/L)	22.9 \pm 6.1
NO ₃ -N (mg/L)	0.7 \pm 0.4
PO ₄ ³⁻ -P (mg/L)	1.4 \pm 0.8
T-P (mg/L)	4.0 \pm 0.8
SCOD _{cr} /NH ₄ -N	3.1 \pm 0.7
TCOD _{cr} /TKN	6.5 \pm 1.6
pH	7.6 \pm 0.4

2. 실험 장치 및 방법

2.1. 실험에 사용된 생활하수의 성상

본 연구에 사용된 생활하수는 C시 도시 하수처리장으로 유입하수를 사용하였으며 구체적인 성상은 Table 1에 나타내었다. 유입된 하수의 성상은 TCOD_{cr} 및 SCOD_{cr} 농도가 각각 226.9 및 62.2 mg/L였으며, TKN과 NH₄⁺-N의 농도는 각각 36.4와 22.9 mg/L로 나타났다. PO₄³⁻-P와 T-P의 농도는 1.4와 4.0 mg/L로 조사되어 본 연구의 대상하수인 C 도시의 TCOD_{cr}/TKN 비는 평균 약 6.5, SCOD_{cr}/NH₄-N 비는 3.1로 나타났다. 또한 본 공정은 240일 동안 지속적으로 운전하여 데이터를 축적하였다.

2.2. 유로변경형 3단 BAF 공정

유로변경식 3단 BAF 반응조는 다음과 같이 구성하였다. 생활하수 유입수 저장 탱크는 1,000 L 규모이며, 탱크 내부에 교반기를 장착하여 지속적인 순환을 유도함으로써 유입수질을 균등하게 유지하였다. BAF 반응조의 1개의 부피는 12 L이고 내경 90 mm, 높이 2100 mm(여유고 300 mm)인 아크릴 재질의 원통으로 제작하였다. 반응조에는 6 mm 크기의 PP (Polypropylene) 재질의 여재를 50% (v/v)로 충전하였다. 또한 상부에 1~1.5 mm 두께의 철망(strainer)을 설치하여 여재가 반응조 외부로 유실되는 것을 막아 여재사이를 통과한 폐수와 탈리된 미생물만이 철망을 통과하여 유출되도록 조절하였다. 유입하수는 정량펌프를 사용하여 상향류식으로 유입하였으며, 여과층을 통과하여 자연 유하식으로 반응조 사이를 거쳐 흐름이 진행되도록 하였다. Fig. 1은 유로변경식 3단 BAF 공정운영시 A mode와 B mode의 공정을 나타낸 것이다. 3단으로 구성된 반응조는 제1무산소-제2무산소-호기 조건으로 유지하다가 45분마다 PLC (Programmable Logic Controller) 프로그램으로 A mode(제1무산소조-제2무산소조-호기조)와 B mode(제2무산소조-제1무산소조-호기조)로 변경시키며 운전하였다. 또한 탈질반응을 효과적으로 수행하기 위해 호기조에서 유입수가 직접 유입되지 않는 무산소조로

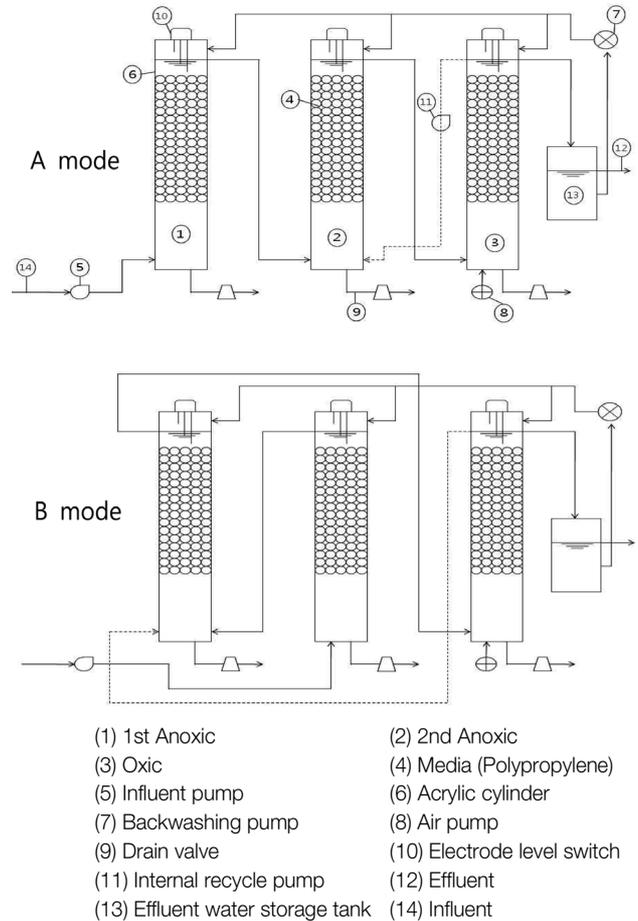


Fig. 1. A schematic of dynamic-flow 3-stage BAF operated in mode A (top) and B (bottom).

내부순환을 2 Q로 운전하였다. 이와 같이 운전을 하게 되면 A mode일 때 호기조에서 제2무산소조로 반응되는 질산화 반응 후의 상등수는 B mode에서 유입수에 포함된 유기물에 의하여 탈질반응이 일어나게 된다. 공정의 수리학적체류시간(Hydraulic Retention Time: HRT)은 3~6시간으로 변경하면서 운전하였다. 각 반응조 상부에는 전극 레벨스위치를 설치하여 4일마다 자동 역세가 되도록 하였으며, 공정의 마지막 단계인 호기조에서 유출되는 처리수를 저장해두었다가 역세수로 활용하였다. 호기조의 산소공급은 반응조 하부에서 Air pump를 사용하여 DO 3~4 mg/L로 유지시켜 주었다.

대조군으로 사용한 3단 BAF 반응조는 Fig. 2와 같이 구성하였으며, 기존의 유로변경식 BAF 공정을 유로변경 없이 제1무산소-제2무산소-호기조건을 유지하면서 운전하였다. 생활하수 저장탱크는 유로변경 BAF 공정과 같이 사용하였으며, BAF 반응조의 규격과 여재충진 등의 조건을 동일하게 운전하였다. 단, 역세는 제 1무산소 반응조와 제 2무산소 반응조에서 50%씩 나누어서 유입수 부하를 견디는 유로변경식 BAF와 달리 3단 BAF 반응조는 제 1무산소 반응조에서 100% 유입부하를 받기 때문에 2일을 주기로 자동 역세를 실시하였다.

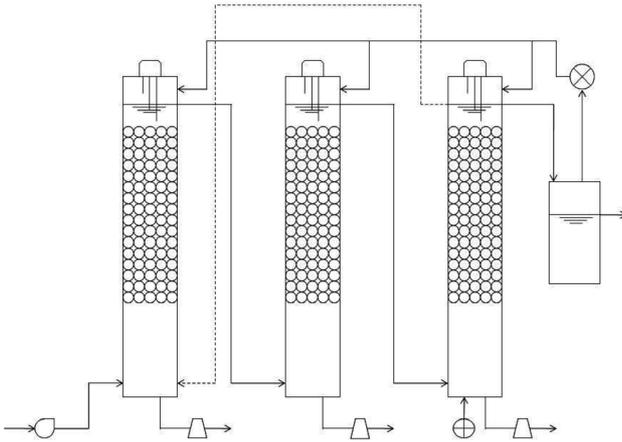


Fig. 2. A schematic of non-dynamic-flow 3-stage BAF operated.

2.3. 분석 항목 및 분석 방법

본 연구에서 분석한 주요 항목은 $TCOD_{cr}$ (5220-COD-D, HACH), $SCOD_{cr}$ (5220-COD, HACH), NH_4^+-N (Nessler 법, HACH), $NO_2^- -N$ (OPTIZEN 3200UV (Mecasys. KOR)), $NO_3^- -N$ (OPTIZEN 3200UV (Mecasys. KOR)), $PO_4^{3-} -P$ (OPTIZEN 3200UV (Mecasys. KOR)), T-P 등이었으며 이중 $TCOD_{cr}$, $SCOD_{cr}$ 은 Standard Methods와 HACH DR-4000에 준하여 측정하였으며, NH_4^+-N , T-P는 각각 HACH manual의 Nessler 법 및 HACH phospho Ver 3 방법을 이용하여 측정하였다. 또한 TKN은 Italy Milano에서 제조된 VELP (UDK127)를 이용하여 측정하였다. $SCOD_{cr}$, NH_4^+-N 은 공극 크기가 $1.2 \mu m$ 인 GF/C 여과지(Whatmann)에 여과하여 측정하였으며, $NO_2^- -N$, $NO_3^- -N$ 은 유기물 간섭을 막기 위하여 공극 크기가 $0.45 \mu m$ 인 membrane 여과지를 통과한 여액으로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 질소 제거 특성

질산화를 거쳐 유출되는 질산염($NO_3^- -N$)을 N_2 로 탈질시키기 위해서 충분한 탄소원이 필요하다.³⁻⁵⁾ 그러나 유기물의 농도가 낮은 유입수라면 충분한 탄소원 확보가 불가능하기 때문에 이러한 문제를 해결할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 낮은 C/N ($TCOD_{cr}/TKN$)비의 유입수에 함유된 유기물을 효과적으로 이용하기 위한 방법으로 여재 표면의 생물막에 흡착된 유기물을 탈질에 이용하는 방법을 고안한 것이다.

Fig. 3은 체류시간에 따른 총 질소 제거율을 나타낸 것이다. 체류시간 3시간과 6시간에서 유로변경식 BAF 공정과 대조공정을 구분하여 나타냈다. 질산염 1 g을 제거하기 위해서는 3.71 g의 BOD가 필요한데, 본 연구가 진행되는 동안 생물반응조로 유입되는 C/N ($SCOD_{cr}/NH_4^- -N$) 비는 평균 3.1로 매우 낮았다. 그럼에도 불구하고 유기물을 효과적으로 이용하기 위한 생물흡착기작을 이용함으로써 흡착된 유기물이

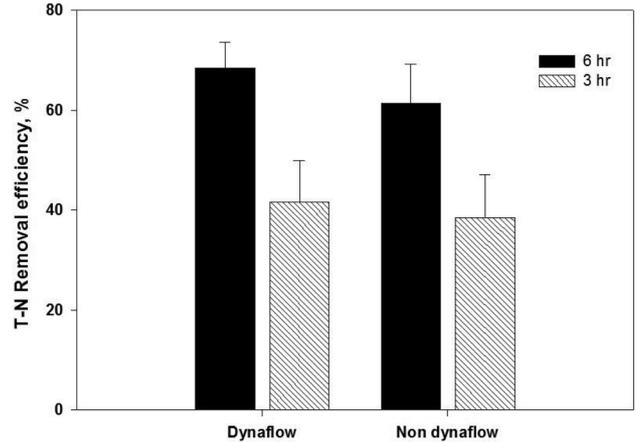


Fig. 3. Comparison of effluent T-N removal efficiency between the dynamic and non-dynamic-flow BAF systems at the HRT of 3 hr and 6 hr.

탈질시 이용되었기 때문에 질소 제거효율의 향상을 가져올 수 있었던 것으로 판단된다. HRT 6 hr에서 유로변경식 BAF 공정 및 대조공정의 평균 제거율은 68.4 및 61.3%로 유로변경식 BAF 공정이 7.1% 높았다. 또한 수리학적 체류시간을 3시간으로 운전한 경우에도 유로변경식 BAF 공정이 대조공정보다 평균 제거효율이 약 4% 더 높은 것으로 조사되었다. 그러나 6시간보다 적은 차이를 보이는 것은 짧은 체류시간으로 인해서 암모니아성질소($NH_4^- -N$)가 질산염으로 전환되는 양이 상대적으로 적었기 때문이다. 또한, 한 두 번의 분석으로 나타낸 결과가 아닌 240일 동안 운전하면서 얻은 결과이므로 반응기의 크기를 확대하면 더 확실한 결과가 나타날 것으로 사료된다. Fig. 4는 유로변경식 3단 BAF 공정과 대조공정의 암모니아성 질소 제거효율을 나타낸 것이다. 체류시간 6시간일 때 각각 96.5%와 96.3%였으나 체류시간이 3시간으로 짧아지면서 각각 18.8%와 21.0%로 제거되었다. 이때 체류시간 3시간에서 두 시스템의 호기조 유출수 질산성질소 농도는 모두 6시간일 때보다 낮게 관찰되었으

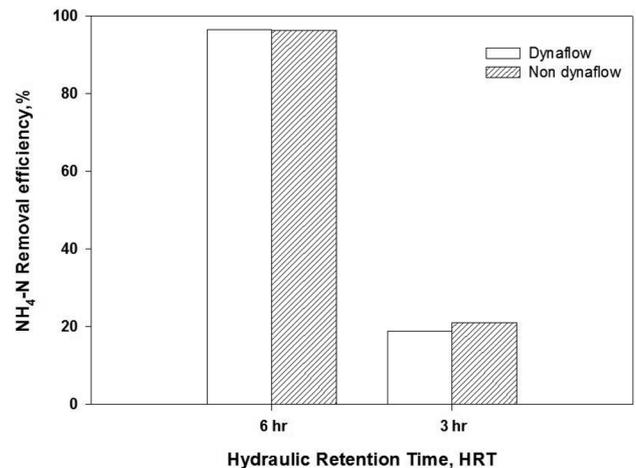


Fig. 4. Comparison of effluent $NH_4^- -N$ removal efficiency between the dynamic and non-dynamic-flow BAF systems at the HRT of 3 hr and 6 hr.

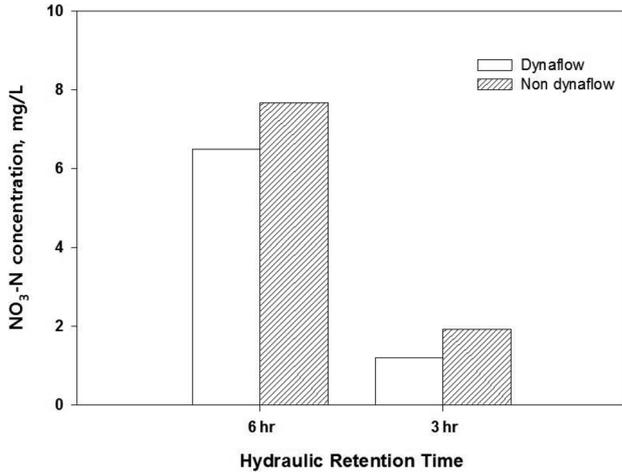


Fig. 5. Comparison of effluent NO₃-N concentration between the dynamic and non-dynamic-flow BAF systems at the HRT of 3 h and 6 h.

며 낮은 질산성질소 농도는 전체 총 질소 제거율을 상승시키지 못한 채 오히려 TN 제거효율을 감소시키는 결과를 가져왔다.

Fig. 5는 체류시간에 따라 유출되는 질산성질소의 농도를 나타낸 것이다. 체류시간 6시간 및 3시간에서 유로변경식 BAF는 6.5 및 1.2 mg/L이고, 대조공정은 7.7 및 1.9 mg/L로 나타났다. 이것은 충분한 체류시간(6시간)에서와 불충분한 체류시간(3시간)에서 모두 유로변경식 BAF 공정이 대조공정보다 유기물을 더 효율적으로 사용되었음을 알 수 있다. 체류시간 3시간에서의 질산성질소 농도가 체류시간 6시간 일 때보다 낮은 것은 암모니아성 질소가 짧은 체류시간으로 인해 질산화를 완벽히 수행하지 못했기 때문이며 상대적으로 질산염으로 전환되는 농도가 낮기 때문으로 판단된다.

3.2. 유기물 및 부유물질 제거 특성

Fig. 6은 체류시간에 따른 유기물 거동을 나타낸 것이다. 유로변경식 BAF 공정에서는 전(前) mode에서 사용한 유기물을 다시 흡착시키는 공법으로 인해 각각의 무산소조에서의 유기물 농도가 대조공정보다 낮게 나타났다.

Fig. 6(a)은 체류시간 6시간에서의 SCOD_{cr}의 거동을 나타낸 것이다. 제1무산소조의 농도가 유로변경식 BAF 공정 및 대조공정에서 36.6 및 46.2 mg/L로 유로변경식 BAF 공정이 대조공정보다 약 10 mg/L 낮게 나타났다. 이것은 mode가 변경되고, 충분한 질산화반응을 진행시킨 후 생성된 질산염을 내부반응으로 반응시켜 탈질에 이용하였기 때문이다. 이로 인해 흡착을 더 활발히 수행할 수 있는 환경이 형성되어 유기물 농도가 낮아진 것이라 판단된다.⁶⁾ 또한, 호기조에서도 유로변경식 BAF 공정이 대조공정보다 낮은 농도를 보였다. 강 등⁶⁻⁸⁾의 연구에 의하면 유기물은 질산화반응의 방해인자로 작용한다는 보고가 있다. 그러나 유로변경식 BAF 공정은 질산화반응의 방해인자로 작용하는 유기물을 대조공정보다 더 제거함으로써 질산화를 수행할 수 있는 범위의 확

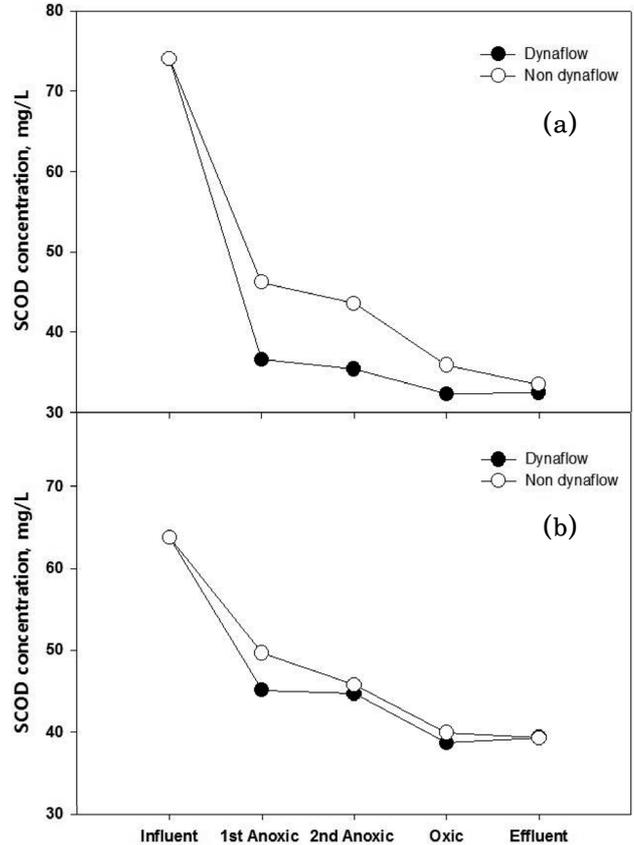


Fig. 6. Variation of SCOD concentration in each reactor of two BAF systems at the HRT of 6h(top) and 3h(bottom).

대를 기대할 수 있을 것이라 판단된다.

Fig. 6(b)은 체류시간 3시간에서의 SCOD_{cr}의 내부거동을 나타낸 것이다. 비록 더욱 짧아진 체류시간으로 인하여 유기물 흡착시간이 줄어들어 전반적으로 유기물 제거효율은 감소하였으나, 발견되는 현상은 체류시간 6시간과 유사한 경향을 보여주었다. 제1무산소조에서의 SCOD_{cr}농도가 유로변경식 BAF 공정이 대조공정보다 약 5 mg/L 낮게 나타났다. 이는 위와 같은 결과는 6시간에서의 유기물 제거 경향과 유사한 경우라고 볼 수 있다. 또한 호기조에서도 유로변경식 BAF 공정에서 2~3 mg/L 더 낮게 유출되었다.

부유물질의 제거효율은 체류시간 6시간일 때 유로변경식 BAF 공정과 대조공정 모두 평균 96% 이상의 효율을 나타냈으며, 체류시간 3시간일 때도 평균 93% 이상의 높은 효율을 보였다. 이는 본 공정의 물리적 제거특성으로 여재에 흡착 및 거름 기작을 통해 고형물의 효과적인 제거가 가능하였다. 이러한 여재 특성으로는 여재의 공극률과 여재층 높이에 따라 특히 영향을 받는다. 또한 생물막 형성을 통해 미생물의 생물학적 제거를 통해 높은 처리가 가능하다는 것은 잘 알려져 있다.⁸⁾ 특히 Moore⁷⁾의 연구에 의하면 충전 여재에 따른 공극률은 부유물질 차단 및 부착 미생물의 성장에 중요한 설계 인자로서 작용한다. 이에 적당한 여재 크기로 3~6 mm라고 제안하였다. 본 유로변경식 BAF 공정과 대조공정에서 여재크기가 6 mm인 PP 여재를 사용하였기 때문에 공

극 내 많은 양의 부유물질 및 미생물 부착이 가능하였다. 또한 부착된 유기물은 일부는 탈리되지만 3.1절의 결과에서 언급했듯이 부착된 유기물은 탈질에 효과적으로 이용되기 때문에 탈리되어 유출되는 부유물질의 양은 상대적으로 적은 것으로 나타나, 부유물질의 제거효율이 더욱 향상되었을 것으로 판단된다.

3.3. 인 제거 특성

인 제거의 기본 원리는 혐기 조건에서 균체가 유기물 저장과 동시에 인의 방출이 시작되고 호기성 상태에서는 균체 증식과 poly-P를 축적하면서 일부의 인을 제거하는 것으로 알려져 있다.⁶⁾ Ding⁸⁾의 연구에 따르면, 이 때 인 제거에 관련된 균체들은 호기성 상태에서 poly-P 형태로 과잉 섭취하여 저장하며, 혐기성 상태에서 단순한 효소기질을 제거할 수 있는 능력을 가지고 세포 내부에 저장생성물로 동화하여 인을 방출한다. 보통 부유성장 공정에서는 혐기 또는 호기성 조건을 교차시켜 흐름이 진행되면서 미생물에 긴장을 주어 인의 흡수율을 높여 슬러지를 반송·배출함으로써 인의 제거를 도모할 수 있으나 여재를 사용한 인 제거효율은 그다지 높지 않은 것으로 보고되어 있다.

본 유로변경식 BAF 공정과 대조공정의 체류시간 6시간과 3시간의 총 인 제거효율은 Fig. 7과 같이 약 58%로 동일하게 처리되었다. 본 공정은 질소 처리를 주 목적으로 운전된 것으로 인 처리 효율을 높지 않은 것을 볼 수 있다. 이는 생물여과공정의 특성상 슬러지를 배출시키지 않고, 부착미생물을 이용한 흡착 및 소모를 통해 제거되기 때문이다. 그러나 선행 연구자들을 보면, 생물학적 반응으로 부족한 부분을 추가적으로 제거하기 위하여 알루미늄, 철, 및 칼슘과 같은 화합물질을 첨가하여 수중의 인을 처리하는 사례는 종종 찾아볼 수 있다.⁹⁻¹²⁾ 유사한 사례로 김 등¹³⁾의 연구에 따르면 응집제(Alum)를 반응조에 직접 투입하여 생물학적으로는 영향을 미치지 않으면서, 높은 인 제거효율을 기대할 수 있는 것

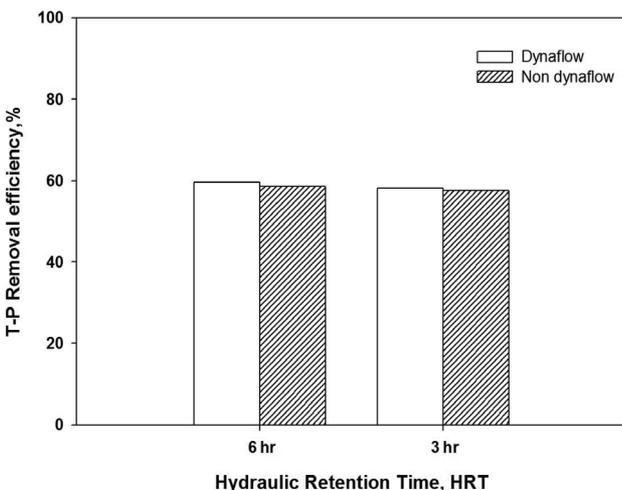


Fig. 7. Comparison of T-P removal efficiency between two systems at the HRT of 3 and 6 h.

으로 확인되었다. 따라서 본 연구결과를 낮은 C/N (TCOD_{cr}/TKN)비의 하수처리에 적용할 경우 유로변경식 BAF 공정이 전 단계 공정으로 역할을 수행하고, 후 단계 공정으로 물리화학적 인 처리 기작을 결합한 공정으로 응용한다면 유기물, 질소 및 인 제거효율을 기존의 운영 결과보다 더 훌륭한 결과를 도출해 낼 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 유로변경식 3단 생물여과공정(Biological Aerated Filters: BAF)공법의 질소 제거 능력을 평가하기 위해 기존의 생물여과공정을 대조군으로 하여 상호 비교한 것으로 이로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 낮은 C/N (TCOD_{cr}/TKN)비의 하수를 이용한 본 연구에서 C/N (TCOD_{cr}/TKN)비에 따른 질소제거 특성을 보면, 수리학적 체류시간을 6시간으로 운전한 경우에는 유로변경식 BAF 공정의 총 질소 평균 제거율 68.4%였고, 대조공정이 61.3%인 것으로 나타나 유로변경식 BAF 공정이 약 7.1% 높은 효율을 보이는 것으로 나타났다. 체류시간 3시간에서도 유사한 결과를 나타냈으며 유로변경식 BAF 공정이 대조공정에 비하여 약 4% 더 높은 제거 효율을 나타내었다. 이것은 대조공정보다 유로변경식 BAF가 유로를 변경시키면서, 유기물을 효율적으로 이용함에 따라 탈질효율이 좋아졌기 때문으로 사료된다.

2) 유로변경식 BAF 공정은 mode를 변경시키면서, 흡착한 유기물을 탈질에 최대한 이용가능하게 하였다. 또한 탈질에 소모된 유기물을 mode가 변경됨에 따라 활발한 흡착을 이룰 수 있도록 유도하여, 대조공정보다 유기물을 효율적으로 사용하여 질산화 및 탈질을 활발히 진행시켜 총 질소제거 효율 향상에 기여하였다. 특히, 낮은 C/N (TCOD_{cr}/TKN)비인 국내 생활하수의 특성에 적합한 공법이라 사료된다.

3) 부유물질 제거는 체류시간 6시간 및 3시간에서 96% 및 93% 이상의 효율을 얻었으며, 이는 여재에 흡착 및 거름 기작으로 고형물의 효과적인 제거가 가능 했다고 판단된다.

4) 질소 처리를 주목적으로 운전되어 다소 떨어지는 인 처리는 물리화학적 인 제거 기작을 결합한 공정으로 응용한다면 높은 유기물, 질소 및 인 제거효율을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2011년도 산학공동기술개발사업(00045499-1)의 연구 수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

참고문헌

1. 환경부, “하천 수질개선을 위해 2012년부터 방류수 수질 기준 대폭강화”(2010)
2. 환경관리연구소, 환경산업총람(2008)
3. 강민구, “회전원판법을 적용한 Modifies DEPHANOX 공정의 하수처리특성,” 석사학위 논문, 충북대학교(2011)
4. 임성문, “담체를 이용한 질산화 공정에서 유기물 부하가 미치는 영향,” 석사학위 논문, 서울산업대학교(2000)
5. Wiesmann, U., “Biological nitrogen removal from wastewater,” *Advances in Biochemical Engineering Biotechnology*, Fiechter, A. (Ed), Springer Verlag, Berlin, Heideberg, **51**, 113~154(1994)
6. 강주형, “유로변경식 생물여과공정을 이용한 중·소규모 하수처리 특성 및 개선,” 석사학위 논문, 충북대학교(2008)
7. Moore, R., Quarmby, J. and Stephenson, T., “The Effect of Media Size on the Performance of Biological Aerated Filters,” *Water Res.*, **35**(10), 2514~2522(2001)
8. Ding, Y. W., Wang, L., Wang, B. Z. and Wang, A., “Removal of Nitrogen and Phosphorus in a Combined A²O-BAF System with a Short Aerobic SRT,” *J. Environ. Sci.*, **18**(6), 1082~1087(2006)
9. 황응주, 천효창, “생물공정 처리수의 PAC (Poly Aluminum Chloride) 응집에 의한 고효율 인 제거 특성,” 대한환경공학회지, **31**(9), 673~678(2009)
10. J. Ma, D. Li, W. Zhang, and C. Lei., “Simultaneous removal of phosphate and phenanthrene by alum aided with low amounts of surfactant modified bentonite,” *J. Chem.*, **85**(2), 288~293(2010)
11. D. A. Georgantas, and H. P. Grigoropoulou., “Orthophosphate and metaphosphate ion removal from aqueous solution using alum and aluminum hydroxide,” *J. Colloid Interface Sci.*, **315**(1), 70~79(2007)
12. L. Yan, Y. Xu, H. Yu, X. Xin, Q. Wei, and B. Du., “Adsorption of phosphate from aqueous solution by hydroxylaluminum, hydroxyiron and hydroxyironaluminum pillared bentonites,” *J. Hazard. Mater.*, **179**(1/3), 244~250(2010)
13. 김진식, 안명기, 김금용, 류홍덕, 이상일, “Alum 주입이 부착성장 공정의 처리효율에 미치는 영향,” 한국수처리학회지, **19**(1), 27~34(2011)