

BNR공정 처리수의 여과에 관한 연구

김성용 · 범봉수 · 조광명

인하대학교 환경공학과

(1999년 12월 27일 접수, 2000년 2월 29일 채택)

A Study on the Filtration of BNR Process Effluent

Seong-Young Kim · Bong-Su Bum · Kwang-Myeung Cho

Department of Environmental Engineering, Inha University

ABSTRACT

This study was performed to investigate the removal efficiencies of pollutants at various filtration rates and the quality of the filtered water along the depth of filter media during treatment of a BNR process effluent by a dual-media gravitational rapid filtration. The results of the experiments at filtration rates of 200, 300 and 400 m/day using the effluent of a pilot scale 4-stage BNR plant showed that turbidity of the filtered water was below 2.6 NTU, satisfying the Korean standard for water for reuse. Even though the SS removal efficiency deteriorated as the filtration rate increased, the average SS concentration of the filtered water was 1.3 mg/L at all filtration rates. Simultaneous biological nitrification and denitrification was observed with nitrification efficiencies of 17.4, 18.8 and 14.3%, and denitrification efficiencies of 32.3, 27.7 and 21.4% respectively at filtration rates of 200, 300 and 400 m/day. At the latter period of each filtration cycle, the effluent T-P concentration was higher than influent T-P concentration by 6.1 to 21.4% due to phosphorous release under DO-deficient condition.

Key Words : Filtration, BNR Process, Nitrification, Denitrification, Phosphorus Release

요약문

본 연구는 여재가 모래와 무연탄인 복층 중력식 급속여과법으로 BNR(biological nutrient removal) 공정 유출수를 처리할 때 여과율의 변화에 따른 오염물질 제거효율 및 여층 깊이별 처리수질을 파악하기 위하여 수행되었다. Pilot scale의 4-stage BNR 공정 유출수를 200, 300 및 400 m/day의 여과율로 급속여과시킨 결과, 처리수는 2.6 NTU 이하의 탁도를 나타내어 우리나라의 중수도 제한수질인 5.0 NTU를 만족하였다. 여과율이 200, 300 및 400 m/day로 증가함에 따라 SS 제거효율은 각각 80.6, 75.4 및 68.9%로 감소하는 경향을 보였지만, 여과수는 모든 여과율에서 유입수의 수질변화에 큰 영향을 받지 않고 평균 1.3 mg/L의 SS 농도를 보였다. 생물학적 작용에 의하여 영양염류도 제거되었는데, 200, 300 및 400 m/day의 여과율에서 질산화효율이 각각 17.4, 18.8 및 14.3%, 그리고 탈질효율이 각각 32.3, 27.7 및 21.4%로, 질산화와 탈질이 동시에 일어났다. 여과주기의 후반기에는 여층 내의 DO가 결핍됨에 따라 인의 재용출이 일어남으로써 유출수의 T-P 농도가 유입수에 비하여 6.1~21.4% 증가하였다.

주제어 : 여과, BNR공정, 질산화, 탈질, 인 방출

1. 서론

여과는 정수에 사용되는 가장 중요한 단위공법 중의 하나로서, 국내에서 하수처리장 유출수에 적용되기 시작한 것은 비교적 최근이다. 급속여과는 모래, 무연탄 등의 입상여재로 이루어진 여층에 100~500 m³/m²·day의 율로 유입수를 통과시켜 걸림작용, 여재 입자 표면에서의 부착, 침전 등의 기작에 의하여 부유물질을 제거하는 방법으로, 수질변동수대처가 유리하여 안정된 SS 제거효율을 얻을 수 있고, 운전도 용이하며, 2차 처리수의 수질을 향상시킬 수 있는 공법이다. 활성슬러지법 등에 의한 하수의 2차 처리수에는 통상 5~20 mg/L 정도의 미생물 플럭을 주체로 하는 SS가 포함되어 있는데, 여과로 이 SS를 제거하면 더욱 청정한 처리수를 얻을 수 있다. 질소 및 인 제거를 목적으로 하는 BNR공정의 처리수중에 포함된 SS를 여과시켜 제거하면 질소 및 인 제거효율을 향상시킬 수 있을 것이다.

최근 하수 처리수의 질소와 인에 대한 규제가 점차 강화되고 있으나, 유기물 제거가 주목적인 기존 활성슬러지법이 가지는 영양염류 제거의 한계성 때문에 기존시설에 새로운 처리시설을 추가하거나 BNR공정을 적용하는 등의 연구가 진행되고 있으며, 또한 2차 처리시설의 후처리로 사용되는 여과공

정에 매탄올을 투입하여 여과지 내에서의 탈질을 유도함으로써 추가적인 처리시설의 도입없이 질소를 제거하는 연구도 진행되었는데, Wilderer 등¹⁾은 München 하수처리장의 여과지에 매탄올을 공급한 결과 낮은 수온에도 불구하고 탈질이 효과적으로 이루어진 것으로 보고하였으며, Koch와 Siegrist²⁾도 실제 규모의 여과지에서 12~15°C의 운전조건 하에서 1.0 kg N/m³·day의 탈질율을 얻었으며, 매탄올 투입에도 불구하고 유출수질이 양호하게 나타난 것으로 보고하였다.

그러나 재래식 여과지에서는 빈번한 역세척이 탈질을 방해하게 되는데, 이러한 단점을 보완하기 위하여 여과와 역세척이 동시에 연속적으로 일어나는 연속역세척 상향류 모래여과(continuous-backwash upflow sand filter, 이하 CUSF)를 이용한 영양염류의 제거에 관한 연구가 진행되었는데, Koopman 등³⁾은 매탄올을 탄소원으로 사용하여 82~264 m/day의 여과율 및 최대 2.7 kg NO₃⁻-N/m³·day의 부하에서 유출수의 NO_x-N 농도를 1.0 mg/L 이하로 처리하였다. Sanz 등⁴⁾은 실제규모의 CUSF를 이용한 실험에서 여과와 함께 질산화와 탈질도 함께 일어났으며, 부유물질 제거효율에 큰 영향없이 높은 질소 제거효율을 얻을 수 있었던 것으로 보고하였다. Hultman 등⁵⁾은 실제규모의 CUSF를 이용하여

질소 및 인의 동시제거를 시도하였는데, 130~588 mg/day의 여과율에서 매탄올을 첨가함으로써 20 mg NO_3^- -N/L 이하의 유입수로부터 0.5~2 mg NO_3^- -N/L의 처리수를 얻었으며, FeCl_3 를 투입하여 0.8~1.5 mg/L인 유입수의 인 농도를 0.15 mg P/L까지 쉽게 낮출 수 있었다고 보고하였다.

현재 세계적인 물 부족현상 때문에 하수의 재이용이 관심을 끌고 있으며, 많은 하수처리장에서 2차 처리수의 일부를 여과처리하여 처리장 내에서 재이용하는 경우가 많다. 또한 최근 많은 하수처리장에서 BNR공정을 적용하여 하수를 고도처리하는 경향이 있지만, BNR공정 처리수의 여과에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 모래와 무연탄을 여재로 사용하는 복층 중력식 급속여과법으로 BNR공정 유출수를 처리할 때 여과율의 변화에 따른 오염물질 제거효율 및 여층 깊이별 처리수질의 변화를 조사하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1. 장치 및 재료

본 연구에 사용된 여과장치는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 내경이 8 cm이고 높이가 276 cm인 아크릴 관으로 제작되었으며, 그 외에 피에조미터, 유입펌프, 역세척펌프, 유출수조 등으로 구성되었다. 여과 장치의 하부에는 여재층을 지지하여 여재의 유실을 방지하고 역세척수를 균등하게 분배하기 위하여 16 cm 두께의 자갈층을 설치하였으며, 자갈층 위에 유효경이 0.9 mm이고 균등계수가 1.4인 모래층과 유효경이 1.2 mm이고 균등계수가 1.6인 무연탄층을 각각 30 cm 및 60 cm 두께로 충전하였다. 여재층에는 여재깊이에 따라 수질을 파악하기 위하여 30 cm 간격으로 3개의 시료채취구를 설치하였다.

유입수는 펌프로 여과장치 상부로 유입시켜 중력에 의하여 하향으로 흐르도록 하였으며, 유출수의 일부는 용적 80 L 크기의 유출수조에 저류시켜 역세척수로 이용하였다. 유출부에는 여과속도를 일정하게 유지하기 위하여 밸브를 설치하였으며, 여과 동안에 나타나는 수두손실의 변화를 지속적으로 관

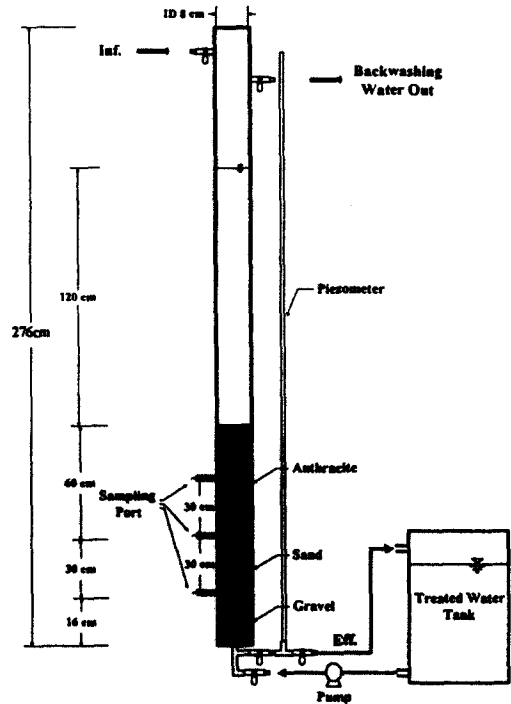


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

찰하기 위하여 유출밸브 앞부분에 눈금이 새겨진 260 cm 높이의 피에조미터를 설치하였다.

2.2. 유입수

본 연구에 사용된 유입수는 K하수처리장에 설치된 pilot scale의 4-stage BNR공정의 처리수로, 수조에 저류되어 있는 처리수를 펌프를 사용하여 여과 장치에 유입시켰다.

본 연구의 여과 전단계에 적용된 4-stage BNR공정에 대하여 간략히 설명하면 Fig. 2에 도시된 바와 같이 전무산소조(pre-anoxic tank), 혐기조(anaerobic tank), 무산소조(anoxic tank), 호기조(oxic tank)로 구성되었으며, 각 반응조의 용량은 각각 1.3, 2.5, 5.1 및 6.3 m^3 이다. 생물반응조의 전체 체류시간은 9.6 hr로 각 반응조의 체류시간은 각각 0.8, 1.6, 3.2 및 4.0 hr가 된다. 혐기조로 반응되는 반송슬러지 내의 NO_3^- -N가 혐기조에서의 인방출에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 슬러지반송을 0.5Q의 율로 전무산소조로 실시하고, 반송된 슬

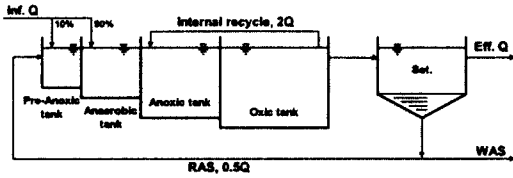


Fig. 2. Schematic diagram of the 4-stage BNR process.

러지 내의 NO_3^- -N의 탈질에 필요한 유기물을 공급하기 위하여 유입수의 10%를 전무산소조에 주입시켰으며, 나머지 90%는 혐기조로 주입시켜 인방출에 이용될 수 있도록 하였다. 한편, 호기조에서 생성된 NO_3^- -N은 2Q의 율로 후무산소조로 내부순환시켜 탈질을 도모하였으며, 잉여슬러지는 침전조로부터 정기적으로 폐기시켰다.

2.3. 실험 진행

여과율을 200, 300 및 400 m/day의 3단계로 증가시키면서 각 여과율의 주기마다 여과지속시간의 최초, 초반, 중반, 후반 및 최종 순으로 시료를 채취하여 분석함으로써 여과시간 경과에 따른 여과수의 수질변화를 관찰하였으며, 여과 초반기, 중반기 그리고 중반기에는 여층에 30 cm 간격으로 설치된 채취구에서 시료를 채취하여 여층 깊이에 따른 수질을 측정하였다.

동일 여과율에서 최초운전시 탁도와 수두손실의 변화를 관찰하여 여과수의 탁도가 허용탁도를 초과하거나 손실수두가 최대허용손실수두를 초과할 경우에 역세척을 실시하였으며, 이 역세척기를 참고로 하여 다음 운전주기의 역세척기가 가까워지면 탁도와 손실수두의 변화를 주시하여 역세척시기를 결정하였다. 역세척은 여과수만을 이용한 회분식으로, 역세척수 배수로를 통하여 배수되는 역세척수는 따로 받아내어 그 양과 SS농도 등을 분석함으로써 여과기간 동안에 제거된 SS 총량과 비교하였다.

2.4. 분석

분석은 Standard Methods⁶⁾와 수질오염공정시험법⁷⁾에 준하여 실시하였다. NO_2^- -N 및 NO_3^- -N의

농도는 시료를 0.45 μm membrane으로 여과한 후 ion chromatography(Dionex, DX-500)로 측정하였다.

BNR공정의 폭기조의 MLSS를 채취하여 유리섬유여지(GF/C)로 여과한 후 105~110°C의 건조소에서 2시간 건조시킨 다음 일부를 채취하여 분석한 T-P 값을 유입수 SS의 인 함량으로 간주하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유입수의 특성

실험에 사용된 유입수의 특성을 Table 1에 나타내었는데, 여과에서 가장 중요한 의미를 갖는 유입수의 탁도는 평균 4.1 NTU이었으며, SS는 평균 5.6 mg/L의 낮은 농도를 유지하여 약품주입없이⁸⁾ 여과지 운전이 가능하였다. NH_4^+ -N와 TKN의 농도는 각각 평균 5.1 및 9.4 mg/L이었으며 NH_4^+ -N/TKN비는 평균 0.48로 TKN 중 유기질소의 함량이 대략 52% 정도로 나타났다. 또한 T-P와 PO_4^{3-} -P의 농도는 각각 3.2 및 0.6 mg/L로 SS에 함유된 인이 대부분인 것으로 나타났다.

3.2. 탁도 및 수두손실의 변화

한 예로 200 m/day의 여과율에서의 탁도 및 수두손실의 변화곡선을 Fig. 3에 나타내었는데, 마지막 운전주기인 여과기간 451~585 hr에서는 유입수의 탁도가 평균 2.98 NTU로 다른 주기에서 보다 낮아 여과지속시간이 길어지게 되었다. 여과율 300 m/day에서는 폭우로 인하여 유입수의 수질이 일시적으로 악화되어 탁도가 평균 6.7 NTU로 높아짐으로써 여과지속시간이 짧아지게 된 경우가 있었으나 이 경우에도 유출수의 탁도는 평균 1.3 NTU로 유입수의 수질변동에 의하여 큰 영향을 받지 않고 비교적 안정된 처리수질을 유지하였다. 유입수의 탁도가 비교적 일정하였던 여과율 400 m/day의 경우에는 여과지속시간이 평균 60 hr로 비교적 일정하였다.

역세척은 여과수의 탁도가 허용탁도를 초과하지

Table 1. Characteristics of the filter influent

Item	Unit	Filtration rate (m/day)					
		200		300		400	
		Range	Avg.	Range	Avg.	Range	Avg.
Temp.	℃	22.2~26.9	24.4	24.0~27.0	26.1	20.5~26.3	23.2
DO	mg/L	3.4~5.1	4.2	2.2~5.3	3.4	3.3~5.2	4.2
pH	-	7.3~7.9	7.4	7.1~8.1	7.4	7.1~7.8	7.5
Turbidity	NTU	2.5~5.6	4.2	1.5~13.7	4.2	2.5~5.8	4.0
TSS	mg/L	3.5~9.2	5.8	1.6~12.9	5.8	2.1~11.3	5.3
VSS	mg/L	2.9~8.1	4.9	1.2~10.6	4.5	1.6~8.5	3.8
TCOD	mg/L	13.9~76.2	29.3	11.4~58.4	26.0	9.7~31.1	19.2
SCOD	mg/L	12.9~48.6	23.1	5.2~48.6	19.5	7.3~22.6	15.4
TBOD	mg/L	3.0~15.5	6.7	1.5~55.7	10.2	1.6~10.9	4.5
SBOD	mg/L	0.9~7.2	3.0	0.8~40.0	4.8	0.4~7.2	1.5
NH ₄ ⁺ -N	mg/L	2.4~15.6	6.8	0.2~17.4	7.0	0.0~5.9	1.4
TKN	mg/L	3.4~23.8	11.9	1.1~26.6	12.8	1.1~9.8	3.4
NO ₂ ⁻ -N	mg/L	0.0~0.1	0.0	0.0~0.1	0.0	0.0~0.1	0.0
NO ₃ ⁻ -N	mg/L	1.1~6.1	3.1	0.1~8.7	2.9	1.9~11.5	5.3
T-P	mg/L	0.7~8.4	3.8	0.7~4.6	2.7	1.8~5.1	3.0
PO ₄ ³⁻ -P	mg/L	0.0~3.1	0.6	0.0~1.6	0.4	0.0~1.7	0.7
Alkalinity	mg/L	85.0~120.0	107.1	65.0~180.0	107.5	50.0~95.0	69.0
TBOD/TCOD	-	0.07~0.60	0.26	0.08~0.65	0.39	0.09~0.65	0.25
NH ₄ ⁺ -N/TKN	-	0.26~0.94	0.62	0.02~0.99	0.48	0.01~0.91	0.33

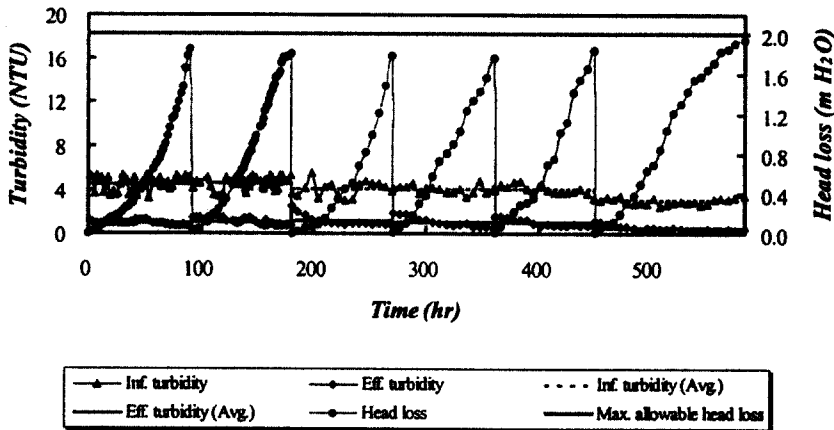


Fig. 3. Turbidity removal and head loss increase at the filtration rate of 200 m/day.

나 손실수두가 최대허용손실수두를 초과하는 경우에 실시하는 것이 일반적이나, 본 실험에서는 모든 여과율에서 여과 종료시점까지 유출수의 탁도 범위가 0.2~2.6 NTU, 평균 1.1 NTU로 주로 여과 후 반기에 일어나는 탁질누출현상이 나타나지 않았으며, 손실수두가 최대허용손실수두에 도달하기 전에

여과수량이 유입수량보다 적어지면서 여과지의 수위가 상승하였으므로 이때 여과를 중단하고 역세척을 실시하였다. 그러나 Fig. 3에서 보는 바와 같이 본 실험에서는 손실수두가 최대허용손실수두에 도달하는 시점과 역세척을 실시한 시점 즉, 여과수량이 감소하여 유입수량보다 적어지게 되는 시점이 대

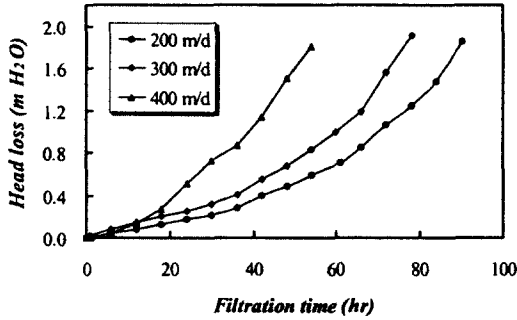


Fig. 4. Head loss buildup at various filtration rates.

체로 비슷하였다.

Fig. 4에 여과율에 따른 손실수두의 변화곡선을 나타내었는데, 여과율 200, 300 및 400 m/day에서의 여과지속시간이 각각 평균 90, 78 및 60 hr로, 여과율이 증가할수록 여과지속시간이 짧아졌다.

3.3. 부유물질 제거

각 여과율에서의 SS 제거효율의 평균값 및 표준편차를 Fig. 5에 나타내었는데, 여과율이 증가함에 따라 SS 제거효율이 감소하는 경향을 보였다. 각 여과율에서 여과수 SS 농도의 표준편차를 비교하면 200과 300 m/day의 여과율에서는 각각 0.5 및 0.6 mg/L의 값을 나타내어 여과수의 SS 농도가 유입수의 SS 농도의 변화에 의하여 큰 영향을 받지 않고 대체로 안정적으로 유지되었으나, 400 m/day의 여과율에서는 표준편차가 0.9 mg/L로 여과수질의 변화폭이 상대적으로 높게 나타났다. 또한, 여과수의 표준편차가 수치상 큰 값은 아니지만 200, 300 및 400 m/day의 여과율에서 유출수의 평균 TSS가 각각 1.1, 1.2 및 1.6 mg/L로 낮은 농도인 것을 감안하면 200 및 300 m/day의 낮은 여과율로 운전한 경우에 비하여 400 m/day의 여과율에서 여과수의 수질변화가 크게 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 6에는 여과시간에 따른 SS 제거효율을 나타내었는데, 여과가 진행됨에 따라 대체적으로 SS 제거효율이 점차 증가하는 경향을 보였다. 이는 여과시간이 경과함에 따라 여층 내에 억류되는 SS의 양이 증가함으로써 공극이 감소되기 때문인 것으로 판단된다.

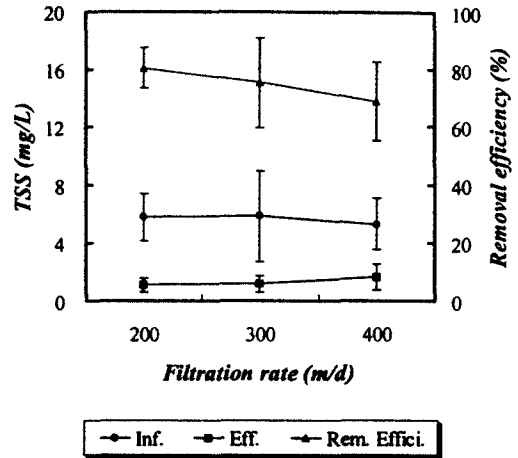


Fig. 5. SS removal efficiencies at various filtration rates.

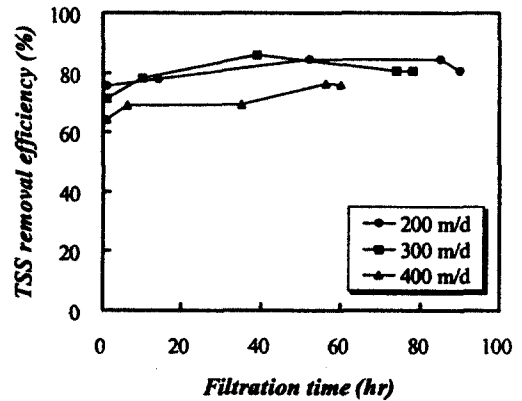


Fig. 6. Effect of filtration time on SS removal.

각 여과율에서의 여층깊이에 따른 SS의 농도비율 곡선을 Fig. 7에 나타내었는데, 모든 여과율에서 유입수에 대한 각 지점별 여과수의 평균 SS 농도비는 여층하부로 갈수록 감소하는 동일한 경향을 보였으나, 높은 여과율에서 각 지점별 평균 SS 농도비가 다소 높게 나타났다. 이는 여과율이 증가함에 따라 공극에서의 유속이 빨라지게 되므로 입자들의 침착 여과가 일어나기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 농도비율 곡선의 경사가 30 cm 깊이까지는 완만하다가 그 이상의 깊이에서 증가하는 점으로 보아 침착여과보다 표면여과가 더 중요한 SS 제거기작으로 판단된다.

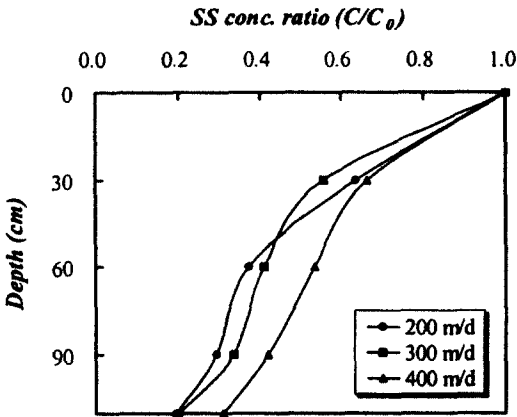


Fig. 7. The normalized SS removal ratio curves along the filter depth.

3.4. 유기물 제거

각 여과율에서의 평균 유기물 제거효율을 Table 2에 요약하였는데, 급속여과에서의 유기물 제거는 주로 부유물질의 제거에 기인하므로 TCOD 및 TBOD 제거효율이 각각 SCOD 및 SBOD 제거효율보다 높은 것은 당연하다. 그러나, SCOD 및 SBOD도 각각 평균 21% 및 40%로 제거된 점으로 보아 여층에 억류된 SS 상태의 미생물들에 의하여 생분해가능한 유기물의 제거가 일어남을 알 수 있으며, 한 여과주기에서 여과 후반기로 갈수록 SBOD 제거효율이 증가하는 현상이 관찰되었다. 여과지속시간이 가장 짧은 400 m/day의 여과율에서는 다른 여과율에 비하여 SS 상태의 미생물들이 여층에 체류하는 시간이 짧기 때문에 상대적으로 BOD 제거효율이 낮게 나타난 것으로 추측된다. 특히, TBOD의 경우는 SBOD의 경우와는 다른 경향을 보이는데, 이는 각 여과율에서의 SS 제거효율과 관계가 있으며 여과율

Table 2. Organic matter removal efficiencies at various filtration rates (Unit: %)

Item	Filtration rate (m/day)		
	200	300	400
TCOD	20.4	29.4	27.6
SCOD	14.7	26.0	22.0
TBOD	64.3	59.9	56.4
SBOD	42.5	43.7	30.7

이 200, 300 및 400 m/day로 증가함에 따라 SS 제거효율이 감소하는 경향을 보인 것으로 보아 TBOD의 제거효율도 같은 경향을 나타낸 것으로 판단되며, SBOD의 경우는 용해성 유기물이 여과 후반기에 여층에 억류된 미생물의 작용에 의해 일부 제거되었기 때문인 것으로 판단된다.

3.5. 영양염류의 제거

3.5.1. 질소 제거

TKN 농도와 암모니아성 질소 농도간의 차이로부터 유입수 및 여과수의 유기질소 농도를 계산할 수 있으며, 이 값으로부터 여과에 의한 유기질소의 제거정도를 계산할 수 있다. 이러한 방법에 의하여 계산된 유기질소 제거효율은 Table 3에 제시된 바와 같이 200, 300 및 400 m/day의 여과율에서 각각 63.8, 51.7 및 48.4%로, 여과율이 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 보였으며, Fig. 5에 제시된 여과율에 따른 SS 제거효율의 변화와 비슷한 경향을 나타내었다.

Table 3에서 질산화효율은 용해성 유기질소의 질산화가 거의 없다고 가정하고, 여과 전후의 암모니아성 질소 농도의 차이에 의하여 구한 값이다. 여층 내에서 미생물이 증식하지 않는 것으로 가정하면 미생물이 섭취하는 NH_4^+-N 의 양은 무시할 수 있으며, 따라서 여과시 제거되는 암모니아성 질소는 모두 질산화에 의한 것이므로 200, 300 및 400 m/day의 여과율에서 질산화효율은 각각 17.4, 18.8 및 14.3%로 계산되었다.

Fig. 8에 나타난 여과시간에 따른 각 여과율에서의 질산화효율의 변화를 살펴보면 여과가 진행됨에

Table 3. Nitrogen removal efficiencies at various filtration rates (Unit: %)

Item	Filtration rate (m/day)		
	200	300	400
Org.-N	63.8	51.7	48.4
TKN	29.3	31.6	27.2
T-N	18.6	16.8	15.8
Nitrification	17.4	18.8	14.3
Denitrification	32.3	27.7	21.4

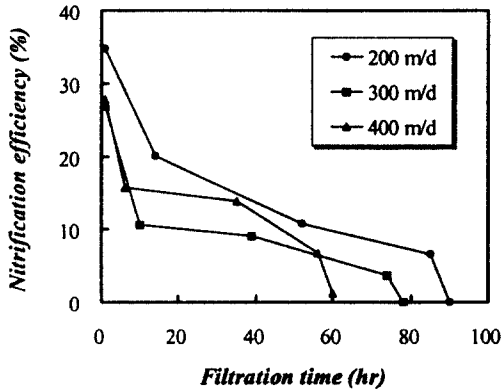


Fig. 8. Effect of filtration time on nitrification efficiency.

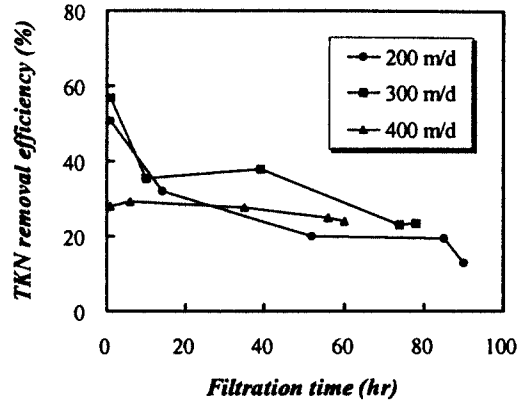


Fig. 10. Effect of filtration time on TKN removal efficiency.

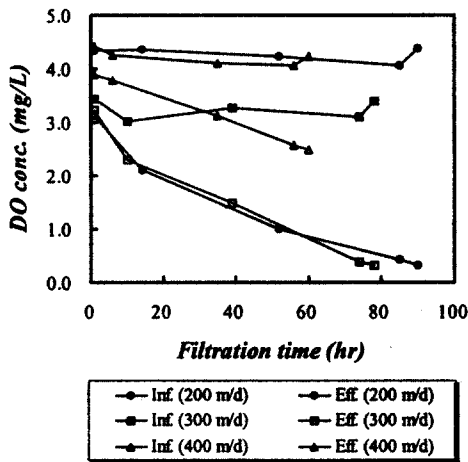


Fig. 9. Effect of filtration time on DO concentration.

따라 질산화효율이 감소되는 경향을 나타내었는데, 이는 여과 후반기로 갈수록 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 여층 내의 DO 농도가 점차 감소되기 때문으로 추측된다. 또한 400 m/day 여과율에서의 질산화효율이 200 및 300 m/day 여과율에 비하여 높은 경우가 있는데, 이는 Table 1에 나타낸 바와 같이 400 m/day 여과율에서의 유입수의 TKN 농도가 200 및 300 m/day 여과율에서의 TKN 농도의 30% 정도로 낮기 때문인 것으로 사료된다. 그리고 300 m/day 여과율에서의 질산화효율이 낮은 또 다른 이유로는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 유입수의 평균 DO 농도가 200 및 400 m/day 여과율에서는 4.2 mg/L이었으나 300 m/day의 여과율에서는

3.4 mg/L로 낮았기 때문으로 판단된다.

Fig. 10에 여과시간에 따른 TKN 제거효율의 변화를 도시하였는데, TKN 제거효율은 질산화효율과 마찬가지로 여과가 진행되는 동안 점차 감소하는 경향을 보였으나 질산화효율 보다는 작은 폭으로 감소되었으며, 이는 SS 제거에 의한 유기질소의 제거가 여과 후반기에도 지속적으로 이루어졌기 때문으로 판단된다. 또한 400 m/day 여과율에서 TKN 제거효율이 낮은 이유는 유입 암모니아의 질산화 및 SS에 함유된 유기질소의 제거정도에 따라 TKN 제거효율이 영향을 받게 되는데, 400 m/day의 여과율에서 SS 제거효율이 가장 낮았기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 11에 여과시간에 따른 탈질효율을 나타내었는데, 여과율 200, 300 및 400 m/day에서의 탈질효율은 각각 32.3, 27.7 및 21.4%로 여과율이 낮은 경우에 탈질효율이 크게 나타났다. 이는 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 여과지속시간이 길수록 여층 내의 DO 농도가 감소하되, 낮은 여과율에서 여과 중의 DO 소모가 더 크기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 Fig. 9에 도시된 바와 같이 400 m/day 여과율에서는 다른 여과율에 비하여 유출수의 DO 농도가 높기 때문에 낮은 탈질효율을 보인 것으로 판단된다. 그러나 400 m/day 여과율에서 여과 후반부에 DO 농도가 크게 감소하지 않았는데도 탈질효율이 급격하게 증가하였는데, 정확한 이유를 알 수 없지만 여과 후반부에 매질층 내에 형성된 생물막 내부에서 탈질이 일어난데 그 원인이 있는 것으로 추측된다.

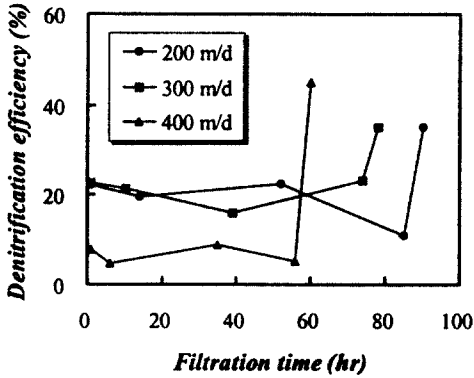


Fig. 11. Effect of filtration time on denitrification efficiency.

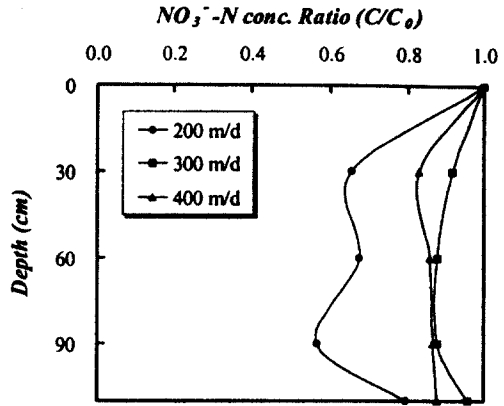


Fig. 13. The normalized NO_3^- -N removal ratio curves along the filter depth.

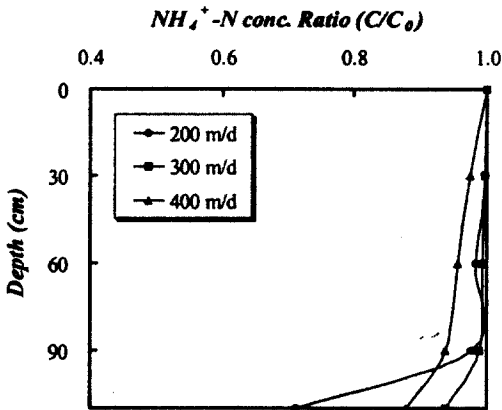


Fig. 12. The normalized NH_4^+ -N removal ratio curves along the filter depth.

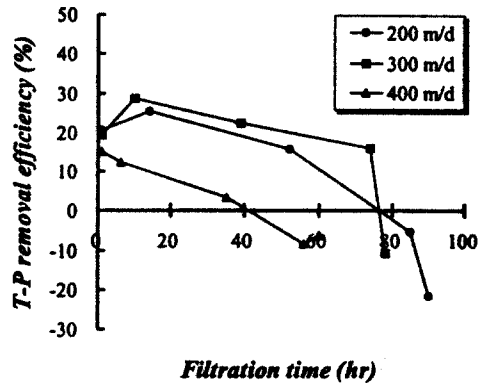


Fig. 14. Effect of filtration time on T-P removal efficiency.

여층깊이에 따른 암모니아성 질소의 농도비를 나타낸 Fig. 12를 보면 유입수의 암모니아성 질소 농도가 여층하부로 갈수록 질산화에 의해 감소되는 것을 알 수 있으며, 여층깊이에 따른 질산성 질소의 농도비를 나타낸 Fig. 13에서는 여층 깊이에 따라 질산성 질소의 농도가 점차 감소하는 경향을 보이다가 여층 하부에서는 다시 그 농도비가 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 Fig. 12에 나타난 바와 같이 여층하부에서의 질산화에 그 원인이 있는 것으로 추측된다.

이러한 결과로 미루어 볼 때 여층 내에서는 여과가 진행됨에 따라 SS의 제거에 의한 유기질소의 제거뿐만 아니라 질산화와 탈질이 동시에 일어남으로써 생물학적 작용에 의한 질소의 제거도 함께 일어남을 알 수 있다.

3.5.2. 인 제거

여과에 의한 인의 제거는 SS 제거를 통하여 이루어지므로, SS의 인 함량을 측정하면 SS 제거에 의한 인 제거효율 및 인방출 여부를 판단할 수 있는데, BNR공정의 폭기조 MLSS의 인 함량을 측정한 결과 약 3.4%로 측정되었다. Fig. 14에 여과시간에 따른 인 제거효율의 변화를 도시하였는데, Fig. 6에서와 같이 여과가 진행됨에 따라 SS 제거효율이 증가하므로 인 제거효율도 함께 증가해야 함에도 불구하고 이와 상반되는 결과를 보였으며, 심지어 여과 후반기에서는 인이 제거되지 않고 오히려 여과수의 T-P 농도가 유입수보다 더 높은 값을 나타내었다. 이러한 결과는 Fig. 9에서와 같이 여과가 진행되는 동안 여층 내의 DO 농도가 감소하는 대신 여층에

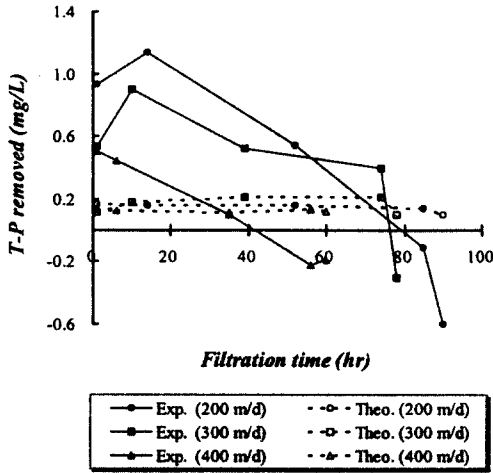


Fig. 15. Comparison between experimental and theoretical T-P removals.

억류되는 미생물의 양이 점차 많아져 부분적으로 혐기성 상태가 됨으로써 인이 방출되고 또한 여층 내에 억류된 미생물이 자산화함으로써 인이 용출되는 데 그 원인이 있는 것으로 추측된다.

인의 용출 가능성을 알아보기 위하여 여과가 진행되는 동안 제거된 인의 양과 SS 제거에 의해 이론적으로 제거될 수 있는 인의 양을 비교하여 Fig. 15에 나타내었는데, 모든 여과율에서 여과 후반기에 나타난 이론적 인 제거량과 실제 인 제거량간의 차이만큼 인이 용출되었을 것으로 추측된다.

이러한 결과는 영양염류의 제거를 목적으로 하는 BNR공정 처리수의 여과에서 매우 중요한 의미를 갖는다. 일반적으로 경제적인 측면에서는 여과지속 시간을 길게 하는 것이 유리하지만, 본 실험의 결과에 의하면 인 제거 측면에서는 여과지속시간이 길어질수록 인이 여층 내에서 용출되므로 역세척 시기를 결정할 때 이러한 점을 고려하여 인이 용출하는 시점보다 앞서 역세척을 실시하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

4. 결 론

Pilot scale의 BNR공정 유출수를 모래 및 무연탄 여재의 중력식 급속여과법에 의하여 200, 300 및 400 m/day의 여과율로 처리한 결과 다음과 같은

결론을 얻었다.

- 1) 탁도가 1.5~13.7 NTU, 평균 4.1 NTU인 BNR공정 유출수를 여과시킨 결과, 여과수는 2.6 NTU 이하의 탁도를 나타내어 중수도 제한수질인 5.0 NTU를 만족시켰다.
- 2) 여과율이 증가함에 따라 SS 제거효율은 감소하였지만, 여과수는 모든 여과율에서 유입수의 수질변화에 큰 영향을 받지 않고 평균 1.3 mg/L의 SS 농도를 나타내었다.
- 3) 급속여과에서는 SS가 제거됨으로써 영양염류가 제거되는 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 생물학적 작용에 의한 영양염류의 제거도 일어나는 것으로 판명되었다.
- 4) 200, 300 및 400 m/day의 여과율에서 TN 제거효율은 각각 18.6, 16.8 및 15.8%로, SS의 제거에 의한 유기질소의 제거뿐만 아니라 질산화와 탈질이 동시에 일어남으로써 생물학적 작용에 의한 질소의 제거도 함께 일어났다.
- 5) 여과 후반기에 여층 내의 DO의 결핍으로 인이 용출됨으로써 유출수의 T-P 농도가 유입수에 비하여 6.1~21.4% 증가하였다.
- 6) 일반적으로 경제적인 측면에서는 여과지속시간을 길게 하는 것이 유리하지만, BNR 공정 처리수의 여과시에는 여과 후반기에 인이 용출될 가능성이 있으므로 인 방출이 일어나는 시점보다 앞서 역세척을 실시하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Wilderer, P. A., Eichinger, J., and Böhm, B., "Denitrifikation in einer Sandfilteranlage als kostengünstige Ausbaualternative für bestehende Klärwerke(Denitrification in deep bed filters as a cost-effective alternative for existing wastewater treatment plants)," *Berichte aus Wassergüte-und Abfallwirtschaft*, TU München, Heft 17 (1994).
2. Koch G. and Siegrist H., "Denitrification

- with methanol in tertiary filtration." *Wat. Res.*, **31**(12), 3029~3038(1997).
3. Koopman, B., Stevens, C. M., and Wonderlick, C. A., "Denitrification in a moving bed upflow sand filter." *J. Water Pollut. Control Fed.*, **62**(5-6), 239~245(1990).
 4. Sanz, J. P., Freund, M., and Hother, S., "Nitrification and Denitrification in Continuous Upflow Filters-Process Modelling and Optimization," *Wat. Sci. Tech.*, **34**(1-2), 441~448(1996).
 5. Hultman, B., Jonsson, K., and Plaza, E., "Combined nitrogen and phosphorous removal in a full-scale continuous upflow sand filter." *Wat. Sci. Tech.*, **29**(10-11), 127~134(1994).
 6. APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Ed., Washington DC. (1995).
 7. 환경부 고시 제 96-32호, 수질오염공정시험법 (1996).
 8. Tchobanoglous, G., "Filtration of Secondary Effluent for Reuse Applications," *presented at the 61st Annual Conference of the WPCF*, Dallas, TX. (1988).