

공극제어형 섬유사 여과기를 이용한 복류수의 탁도 제거효율 평가

Evaluation of Turbidity Removal Efficiency on under Flow Water by Pore Controllable Fiber Filtration

김정현¹ · 배철호¹ · 김충환¹ · 박노석^{*1} · 이선주¹ · 안효원¹ · 허현철²

Kim, Jeong-Hyun¹ · Bae, Chul-Ho¹ · Kim, Chung-Hwan¹ · Park, No-Suk^{*1} · Lee, Sun-Ju¹ ·
Anh, Hyo-Won¹ · Huh, Hyun-Chul²

1 한국수자원공사 수자원연구원
2 효림산업(주)

(2004년 10월 14일 논문 접수: 2005년 4월 11일 최종 수정논문 채택)

Abstract

It was evaluated that the effect of turbidity removal by Pore Controllable Fiber Filter(PCF) installed in NS(Naksang) small water treatment plant (system) using under flow water as raw water in the study. The results of the study are as the followings.

Firstly, the removal efficiency of turbidity by PCF without coagulation(in operation mode not using coagulants) was mostly below 20 percent. On the other hand, when operation using proper coagulants, that of turbidity was mostly over 80 percent.

Secondly, slow sand filtration after PCF, total turbidity removal efficiency of final treated water was 84.3 percent, and the contribution by PCF was 57.1 percent and that of slow sand filtration was 27.7 percent. Therefore the introduction of PCF as pre-treatment process would be helpful to reduce the loading of high turbidity of slow sand filtration.

Thirdly, the results of particle counter measurements showed that when operated PCF with coagulants, fine flocs captured or adsorbed at the pore of PCF were flow out into the effluents from 120 minutes after backwashing because of the increase of headloss of PCF. Therefore the decision of backwashing time should made consideration into the outflow of fine flocs from PCF.

Fourth, coagulant dosages on PCF at the same turbidity was largely variable because of the effect of the raw water characteristics and the turbidity increase velocity at rainy days, therefore flexible coagulant dosages should be considered rather than fixed coagulant dosage by the influent jar-test result.

Key words: Pore controllable fiber filter, small water system, under flow water, high turbidity

주제어: 공극제어섬유사여과기, 소규모정수장, 복류수, 고탁도

*Corresponding author Tel: +82-42-860-0390, FAX: +82-42-860-0399, E-mail: nspark@kowaco.or.kr (Park. N.S.)

1. 서 론

완속여과방식은 운전과 유지관리가 매우 용이하여 운영관리를 적합하게 할 경우, 완속여과지 상부표면에 형성된 생물여과막에 의하여 탁도, 유기물질, 철, 망간, 암모니아 등 무기물질, 그리고 바이러스, 병원성 미생물 등의 제거에 있어 고도정수처리공정과 비교할 정도의 우수한 정수생산이 가능할 만큼 높은 처리효율을 보이는 것으로 알려져 있다(Gary, 1991; Poynter 등 1997; 전 등 2003). 이러한 이유로 미국 등에서는 완속여과방식의 도입에 대하여 그 중요성을 강조하고 있다(AWWA, 1993).

우리나라의 경우 2002년도 기준으로 보면, 지방상수도 576개 정수장의 처리공정 중 177개 정수장(30.7%)이 완속여과방식을 이용하고 있으며, 이들 정수장중 5,000m³ 미만 소규모정수장인 156개 정수장(27.1%)에서 완속여과방식을 택하고 있다. 그러나 완속여과방식의 경우 탁도를 포함한 고농도의 오염물질은 제거하기 어렵고, 특히, 장마철 고탁도 유입시 여과지의 급격한 폐색으로 운전이 어려움을 겪고 있으며, 이로인해, 급속여과방식으로 변경하여 운영하는 사례도 증가하는 추세에 있다. 그러나 급속여과방식에 대해서도 운영기술 미흡, 운영인력 부족, 약품미사용 등 운영상의 문제점을 가지고 있어, 강우시 고탁도 유입시 안정적인 처리가 어려운 실정이다.

따라서 현재 일본을 포함한 주요 선진외국 일부에서는 완속여과지 등 고탁도에 대비하기 위한 전처리 공정으로 다공성의 특수물질이나 자갈 등을 충전한 Roughing filter 또는 활성탄소섬유필터등을 개발 또는 평가하고 있으며(전 등 2003; 이 등 2003), 국내에서도 일부 섬유사 여과기 형태의 전처리공정이 개발되었으나, 이들 장치 대부분은 현재 하천정화, 폐수처리, 그리고 정수처리공정으로는 표류수를 대상으로 일부 적용되고 있는 실정이다(임 등 2003; 김 등 2003).

특히 섬유사를 이용한 여과공정은 1978년 유럽에서 처음 소개되었으며, 채래식 여과시설과 비교해 소요부지면적이 작으며 수도손실이 적어 비용이 저렴하고 자동화가 가능하다는 장점이 있다(Grabbe 등 1998). 임(2003) 등은 응집제를 사용하지 않은 상

태에서 섬유사 여과기(3F/M)의 충전밀도와 HRT(Hydraulic retention time)에 따른 처리성능을 평가하였는데, 섬유사 여과기에서는 충전밀도와 HRT가 증가할수록 탁도와 SS(Solid suspended)에 대한 제거효율은 증가하고, 2 μ m 이하의 입자를 제거하는 것은 어려우나 HRT를 증가할 경우 1 μ m의 입자상 물질도 40~50% 범위에서 제거가 가능한 것으로 보고한 바 있다. 김(2003) 등도 응집제를 사용하지 않고 섬유사 여과기에 의해서만 하천수질 개선에 섬유사 여과기를 적용하였는데, 주어진 실험조건하에서 SS에 대한 평균 제거효율은 89% 이상의 제거효율을 보여주었으며, 입경별 입자 제거효율은 5 μ m 미만의 입자는 약 62%, 5 μ m 이상은 89.7% 이상의 제거효율을 보고한 바 있다. 따라서, 고탁도 유입이 잦은 정수시설에서 전처리공정으로 활용할 경우, 고탁도 유입에 따른 부하절감에 도움을 줄 수 있을 것으로 보여진다.

현재 섬유사 여과기에 의한 입자제거에 관한 구체적인 메커니즘에 관한 연구는 진행된 바 없다. 그러나 이들 섬유사 여과기 대부분이 섬유사 표면에서의 흡착 또는 공극에 의해서 입자를 억류하여 제거하는 것으로 보여진다. 따라서 미세입자 특성을 갖는 원수의 특성에 따라서는 섬유사 여과기 자체의 공극 등을 통하여 제거하는데에는 어려움이 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 완속여과방식으로 운영중이며, 특히 복류수를 원수로 하는 NS(Naksang) 소규모 정수장에 현재 개발된 공극제어형 섬유사 여과기(Pore control fiber filter, PCF)를 설치하여 응집제를 주입하지 않는 무응집제 운영과 응집제를 주입하여 운영하는 방식 등을 통하여 각각의 탁도 제거효율 등을 평가함으로써, 섬유사 여과기의 효율적인 적용방안을 도출하였다.

2. 실험방법 및 장치

2.1. 복류수 원수특성

NS 소규모정수장 복류수(표류수가 일정 모래깊이(약 1.5m)를 통과한 복류수)에 대한 원수 특성을 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다. Table 1에서 NS 소규모정수장으로 유입되는 복류수의 수온은 계

Table 1. The characteristics of raw water (under flow water)

Items of water quality	Range
Temp. (°C)	6~27
pH	6.8~7.4
Turbidity (NTU)	0.45~37
Alkalinity (as CaCO ₃ mg/L)	33.8~53.2

절에 따라 6°C(3월)에서 27°C(8월) 범위이었으며, pH는 계절에 관계없이 pH 6.8~pH 7.4(평균 pH 7.02) 범위로 안정적으로 유입되었다. 탁도는 비강우 시에는 주로 0.45~37NTU 범위(강우시에는 표류수 탁도 증가에 따른 영향으로 최고 37NTU까지 상승)이었으며, 알칼리도는 33.8~53.2mg/L(as CaCO₃)이었다.

2.2. PCF pilot plant

2.2.1. PCF

PCF는 미세유연사 다발을 일정크기의 스트레이너에 감싸고, 이를 회전기구나 공기압착 실린더를 이용하여 압착함으로써 공극을 작게하여 일정시간 여과한 후 다시 이완하여 공극을 크게하여 압축공기와 가압수로 역세하는 섬유여과기로, Cartridge 필터의 정밀

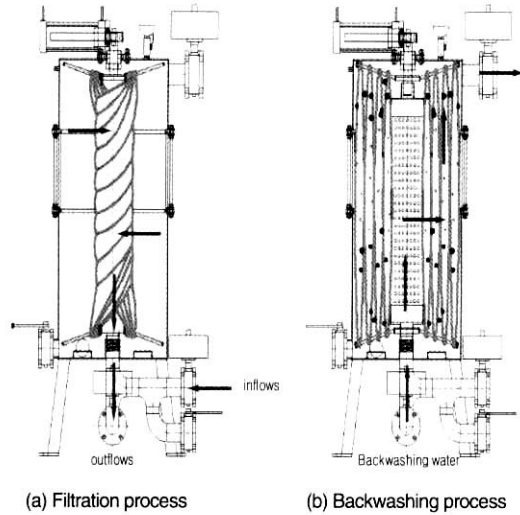


Fig. 1. Filtration and backwashing process of PCF.

여과기능과 모래여과의 역세기능을 조합한 여과기이다. 본 연구에 사용된 섬유상 여과기의 구조 및 상부 여재조절 디스크의 이동에 따른 압착 시(여과과정시)와 이완 시(역세과정시)의 PCF모식도를 Fig. 1에 나타내었다. 또한, PCF에 사용되는 섬유상 여재의 물

Table 2. Physical properties of PCF fibers

Items	Properties	Items	Properties
Material	Polypropylene	Weight	0.283g/m
Gravity	0.91	Diameter of a fiber strip	43μm
Melting point	162.09°C		

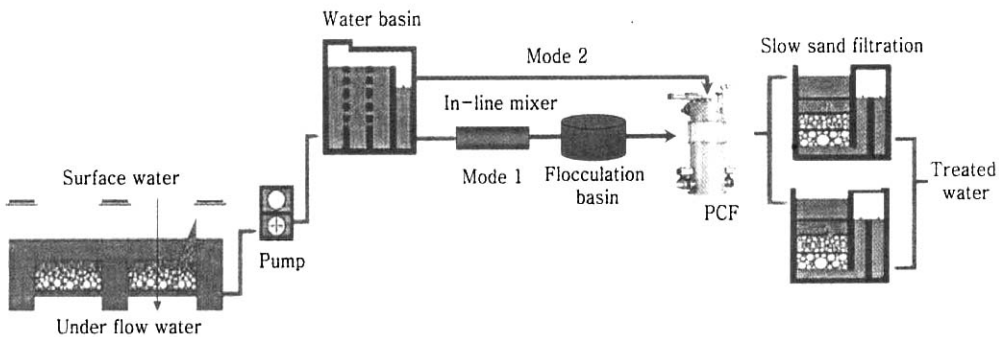


Fig. 2. Schematic diagram of PCF pilot plant.

Table 3. The operation condition of PCF

Filtration conditions		Backwashing conditions	
Filtration area	4.044m ²	Backwashing frequency	2~80hr
		Backwashing interval	Filtration pressure criterion (0.3kg/cm ²)
Filtration velocity	207.7m/d	Backwashing time	3min.
		Backwashing vel.	296m/d
		Vol. of backwashing water/Vol. of treated water	1~3%

리적인 특성은 **Table 2**와 같다.

2.2.2. Pilot plant 설치 및 운영방법

Fig. 2에 NS 소규모정수장(1,000m³/d 규모)에 설치된 PCF Pilot plant의 처리공정 흐름도를 나타내었고, **Table 3**에 PCF의 운전조건을 나타내었다. **Fig. 2**에서 PCF Pilot plant의 처리공정을 보면, NS 소규모정수장으로 유입되는 원수는 일정 깊이(1.5m)의 모래층(집수매거)을 통과한후 NS 소규모정수장 착수정으로 송수되고, 이후 PCF 처리된 물이 완속여과지로 이동하도록 구성되어 있다. 본 pilot plant에는 PCF 2개 Module(ø600, 높이 900mm)을 설치하였고, 처리용량은 700m³/일 규모이며, 총 여과면적은 4.044m²(섬유사 충전량, 90 bundle, 320~480 strips/bundle)으로 여과속도는 207.7m/일이다. 역세척 간격은 여과압력 기준으로 0.3kg/cm²으로 역세척 시간은 3분/회로 역세척 속도는 296m/일이다. 역세기 유량비율은 1~3%(역세수량/처리수량)이다. 응집제 주입에 따른 운영시 사용된 응집제로는 PAC(Polyaluminum chloride, 11%)을 사용하였으며, 응집제 혼화는 In-line-mixer를 이용하였다. 또한, In-line mixer 후단에는 체류시간이 각각 5분씩인 1m³ 규모의 물탱크를 2개조를 직렬로 설치하여 응집지로 이용하였다.

또한, 일반적으로 복류수는 대부분 모래층을 거쳐 착수정으로 유입되는 원수이기 때문에 비강우시에는 대부분 저탁도(1 NTU 이하)로 유입이 되는 기간이 길고, 고탁도가 유입되는 경우는 강우시 하천유량의 증가로 인한 모래 손실 또는 표류수가 매우 높은 탁도로 증가하기 때문에 모래층을 통과하더라도 착수정으로 유입되는 원수의 탁도가 상승하게 된다. 따라서 PCF pilot plant의 운영은 2 mode 방식으로 운영하였다. 즉 유입원수 탁도가 5NTU 이상 유입시 응집제를 투여하여 운영하였고(Mode I), 5NTU 이하일 때

에는 응집제를 주입하지 않고 운영하는 것을 원칙으로 하였다(Mode II). 그러나, 본 Pilot plant로부터 처리수는 바로 완속여과지로 유입되도록 설치되어 있어, NS 소규모정수장의 운영에 따라서는 원수가 5NTU 이하로 유입되더라도 간헐적으로 응집제를 투여하였으며, 강우시 고탁도가 유입되는 경우 탁도 상승에 따른 Jar-test를 수행하여, 그 결과를 토대로 응집제 투여량을 조절하여 PCF을 운영하였다.

2.4. 분석방법

본 연구에서는 PCF의 탁도 제거효율을 분석하기 위하여 유입원수와 처리수에 각각 On-line Turbidimeter(Micro TOL, HF Scientific, U.S.A.)를 설치하여 운영하였고, 여과전후 입자의 제거 거동특성을 평가하기 위하여 입자계수기(WQA-2000, USF/Stranco, U.S.A.)를 간헐적으로 설치 운영하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. PCF에 의한 복류수 탁도에 따른 제거특성 평가

PCF 운영기간 동안 각 유입수 탁도에 따른 제거특성을 **Fig. 3**에 나타내었다.

Fig. 3(a)에서 유입수(복류수) 탁도가 1NTU 이하인 0.62~0.75NTU 범위로 유입하는 경우, 무응집제로 운영(Mode II)하였으나, 운영시간 동안 PCF 처리수 탁도는 0.44~0.55NTU로 나타나 PCF에 의해서 유출수 탁도가 다소 감소하는 것으로 나타났다. 이는 비록 PCF에 응집제를 투여하지는 않았으나, PCF의 섬유사 여재로 형성된 공극 등을 통하여 일부 입자들이 제거가 되고 있기 때문으로 판단된다. 그리고 이때 탁도 제거효율은 25~30%를 유지하는 것으로 나

타났다.

또한, Fig. 3(b)에서 강우시 PCF 유입수 탁도가 1~5NTU일 때, 무응집제(Mode II) 또는 응집제를 주입(Mode I)하여 운영한 결과를 보면, 무응집제에서는 PCF 유출수 탁도가 PCF 유입수 탁도가 증가함에

따라 동일하게 상승하는 것으로 나타났다. Fig. 3(b)에서, 무응집제로 운영하였을 때 PCF 유입수 탁도는 최대 2.85NTU이였으며, 이때 유출수 탁도는 2.29NTU로 19.6%의 제거효율을 보인 반면, 응집제로 운영한 경우(최대 3.80NTU)이였을 때에는 PCF 유출수 탁도가 0.55NTU로 85.5%로 무응집제 운영에 비하여 4배 이상 높은 제거효율을 보여주었다. 이는 대부분 응집제인 PAC를 투여함으로써, PCF의 내부 섬유사 여재의 공극보다 큰 미세플록 등이 형성되므로서 이들 미세플록이 대부분 여재 표면에 억류 제거되었기 때문으로 판단된다.

Fig. 3 (c), (d), (e)에서 강우시 PCF 유입수 탁도가 5NTU 이상 경우에도 무응집제로 운영시에는 대부분 PCF 유입수 최대 탁도에서 20% 이하로 탁도 제거효율이 크게 감소하였으나, 응집제를 주입하여 운영하는 경우에는 75~90%의 탁도 제거효율을 보였다.

따라서 PCF를 무응집제로 운영할 경우에는 탁도 제거효율이 20~30% 정도로 한계가 있는 것으로 보여지므로 PCF를 이용하여 복류수를 처리하고자 할 때에는 응집제를 투여함으로써 미세입자들을 PCF 공극 이상으로 응결시켜 여재 표면에 억류하여 제거하는 것이 효율적일 것으로 판단된다.

3.2. 완속여과지에 탁도 저감에 미치는 영향 평가

Fig. 4에는 PCF 운영기간 동안 PCF 유입원수 탁도에 따른 PCF 처리수, 그리고 완속여과지 여과수에 대한 탁도 측정 결과(일 평균자료)를 나타내었다. Fig. 8에서 보면, PCF 운영기간 동안 강우시 최대 유입수 탁도가 30NTU까지 상승하였으나, 대부분 PCF에 의해서 8NTU 이하로 처리가 됨으로서, 완속여과지 여과수 탁도도 0.5NTU 이하로 매우 안정적으로 처리가 가능한 것으로 나타났다.

또한, Fig. 4에서 각 처리계통(PCF&완속여과지)에 따른 탁도 제거효율을 비교해 보면, 운전기간동안 PCF와 완속여과지를 거친후 탁도 제거율은 평균적으로 84.3%이였으며, 이중 PCF의 기여율은 평균적으로 57.1%, 그리고 완속여과지의 기여율은 27.7%로 나타나 PCF에 의해서 전체적인 탁도 제거율에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 따라서, 향후 PCF가 완속여과지 전처리공정으로 유입원수에 대한 고탁도를 크게 저감하는데 기여가 가능할 것으로 판단된

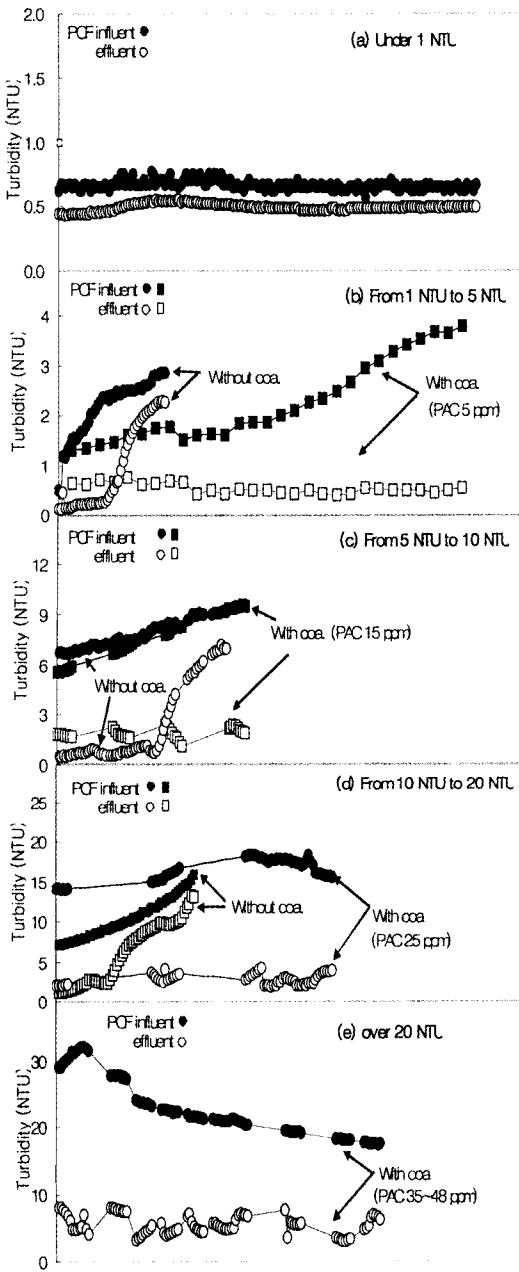


Fig. 3. Effect of turbidity removal by PCF.

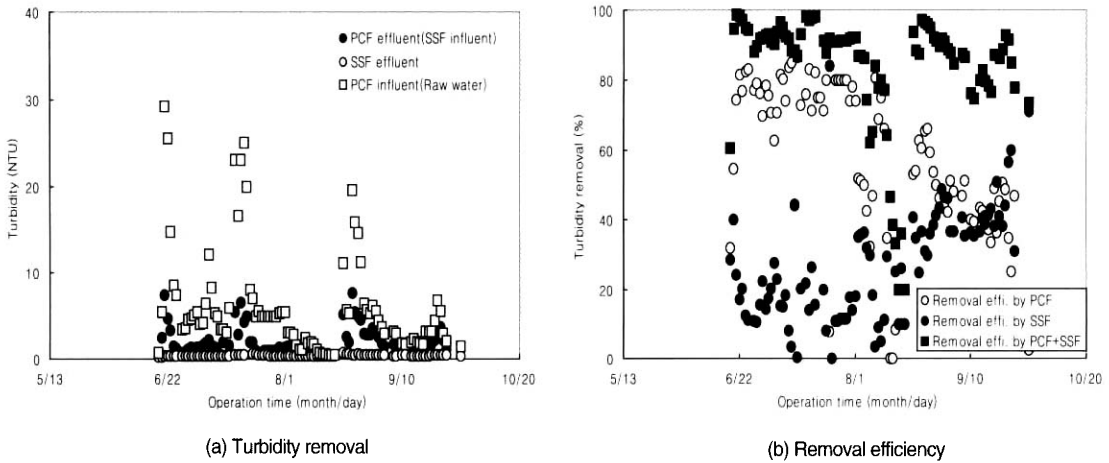


Fig. 4. The effect of turbidity removal by PCF and slow sand filtration(SSF).

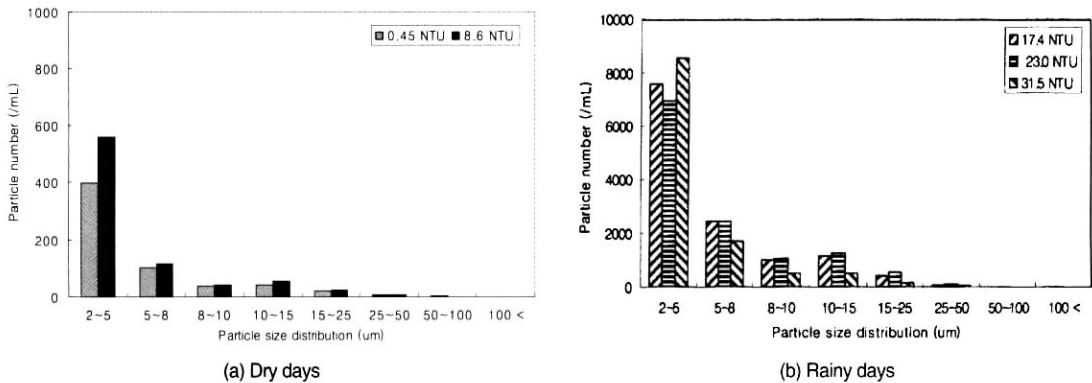


Fig. 5. Variations of particle size distribution of raw water(dry days & rainy days).

다.

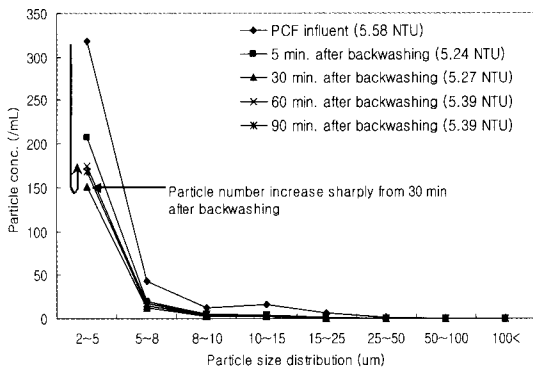
3.3. PCF에 의한 복류수 입자 제거특성 평가

3.3.1. 원수의 입자크기 특성

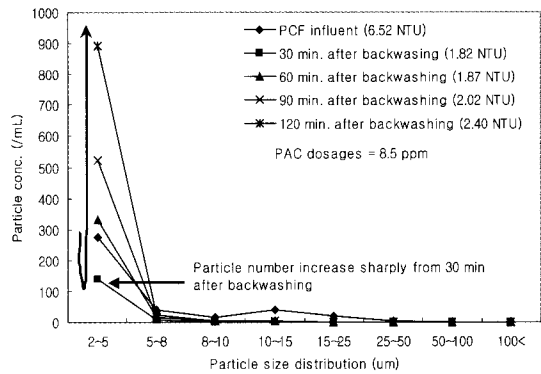
Fig. 5에는 강우시 NS 소규모정수장 원수인 복류수의 비강우시 입자크기 분포와 강우시 탁도 증가에 따른 입자크기 분포를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 보면, 비강우시 유입원수가 최대 탁도를 보인 7.5~8.6NTU일 때 복류수의 입자크기 분포를 보면, 비강우시에는 대체로 2~10 μ m의 입자들이 상대적으로 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났으며, 비록 복류수 탁도가 높더라도 미세입자인 2~5 μ m도 mL 당 1,000개 이상을 초과하지는 않는 것으로 나타났다.

그러나 강우시 탁도가 상승함에 따라 복류수 원수에서의 2~5 μ m가 크게 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 8에서 보면, 가장 크게 증가하는 입자는 2~5 μ m 크기의 입자로 탁도가 비강우시에 비하여 17.4 NTU로 2배 이상 증가시 2~5 μ m 크기를 갖는 입자수는 평균적으로 17배 이상 높게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 NS 소규모정수장은 복류수로 1.5m의 모래층을 통과한 후의 원수가 유입되므로 큰 입자들은 모래층에서 제거되고, 제거되지 않은 미세입자들이 상대적으로 크게 증가하였기 때문으로 판단된다.

따라서, PCF를 이용하여 강우시 복류수의 고탁도 원수를 효율적으로 처리하기 위해서는 앞서 언급한 바와 같이 응집제 주입하여 운영하는 것이 효율적일



(a) Without coagulant



(b) With coagulant

Fig. 6. Comparison of particle removal behavior by PCF.

것으로 판단된다.

3.3.2. PCF에 의한 입자제거 특성

Fig. 6에는 비강우시 PCF를 무응집제로 운영할 때의 입자의 제거특성과 강우시 입자제거 특성을 나타내었다. Fig. 6(a)에서 보면, 무응집제로 운영하는 경우 역세척 후 다음 역세척이 시작되는 시점까지 처리수 탁도가 5.24~5.39NTU로 PCF에 의한 탁도 제거효율은 매우 미미한 것으로 나타났다. 그리고 이때 입자제거는 입경별로 30~40% 정도 제거는 되는 것으로 나타났다. 그러나, 역세척 후 60분부터 2~5μm 크기를 가진 입자의 유출 개수가 상대적으로 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 6(b)에는 응집제 주입에 따른 운영시 입자의 제거 거동을 나타내었다. 이때 유입원수의 초기 탁도는 6~7NTU 범위이었다. 역세척후 PAC 8.2ppm 투여함에 PCF 처리수 탁도가 급격히 감소하면서 30분 후 1.82NTU까지 감소하였고, 입자들도 크기별로 함께 감소하는 특성을 보였다. 그러나, 운영 60분 후부터 처리수의 탁도가 상승함에 따라 처리수내 입자들도 함께 상승하는 것으로 나타났다. 특히, 120분이 지난후에는 처리수 탁도가 2.4NTU로 나타나 탁도 제거효율에 큰 변화는 없었으나 2~5μm의 크기를 가진 입자들의 개수가 원수 이상으로 유출되는 것으로 나타났다. 이는 대부분 유연성 여과사 표면에 계속해서 흡착 또는 미세플럭으로 역류된 미세플럭 등이 PCF 내부의 수두상승으로 인하여 유출됨에 따라 처리수에서의 미세입자 개수가 상대적으로 크게 증가되

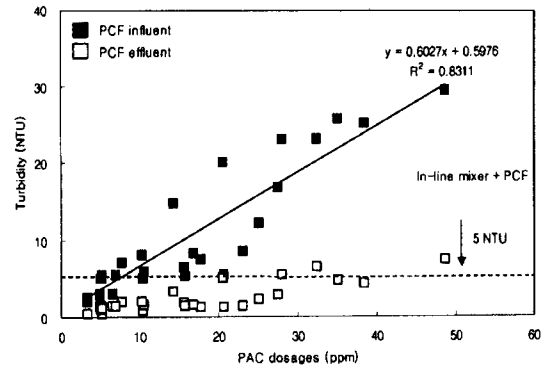


Fig. 7. PCF coagulant dosages for under flow water of NS small water system.

는 것으로 보여진다. 따라서, PCF의 운영시에는 비록 탁도의 상승은 미미하지만, 미세 입자유출은 높을 수 있으므로 이를 고려한 여과지속시간의 결정이 중요할 것으로 판단된다.

3.4. 복류수 처리시 적정 응집제 투여량 평가

Fig. 7에는 PCF 운영기간 동안 유입수 탁도에 대하여 PCF 처리수 탁도를 5NTU 이하로 낮추기 위하여 투입된 응집제(PAC)량을 나타내었다. Fig. 7에서 보면, 복류수 탁도가 5~10NTU일 때, 탁도를 5NTU 이하로 낮추기 위해서는 PAC 5~22ppm 정도가 요구되는 것으로 나타났으며, 10~20NTU일 때에는 15~25ppm, 그리고 그 이상의 탁도에서는 30~50ppm 정도가 요구되는 것으로 나타났다. 이러한 응집제 투여량은 Fig. 8의 기존 혼화·응집공정에서 5

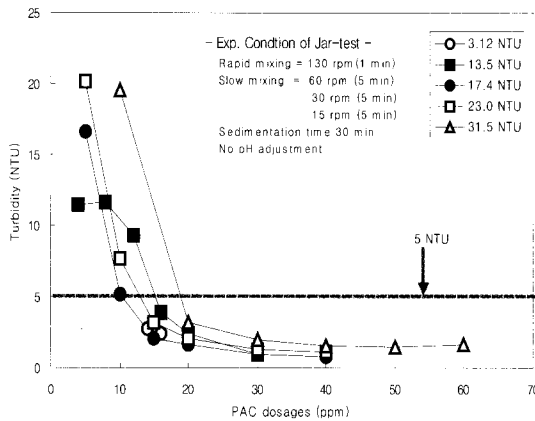


Fig. 8. Results of jar-test at several turbidity of under flow water.

NTU 이하로 낮추기 위해서 요구되는 응집제 투여량보다 작거나 또는 강우시 유입원수에 따라서는 다소 높은 농도가 요구되는 것으로 판단된다. 이는 비록 PCF 유입원수가 동일 탁도라 하더라도 5NTU로 낮추기 위해서 요구되는 응집제 투여량의 범위가 Fig. 7에서 보면 다소 크게 나타났기 때문이다. Fig. 7에서 보면, PCF 유입원수 탁도가 10NTU 전·후일 때 5NTU 이하로 낮추기 위해 요구되는 PAC 투여량은 10~25ppm으로 높게는 2.5배 정도 차이가 있는 것으로 나타났다. 25NTU 전·후에서도 20~40ppm으로 2배이상 차이가 있는 것으로 나타났다.

따라서 PCF에 의해서 복류수를 처리하고자 할 경우에는 Jar-test 결과에 따라 일정 유입원수 탁도에 대하여 일정량의 응집제를 투여하기보다는 Jar-test를 토대로 응집제 투여량을 결정하되 유입원수 탁도 성상또는 탁도증가 속도 등에 따라서 PAC 투여량을 조절하며 탄력적인 운영을 하여야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 복류수를 원수로 하는 NS 소규모 정수장에 현재 개발된 공극제어형 섬유사 여과기(Pore control fiber filter, PCF)를 설치하여 탁도 제거효율 등을 평가하였고, 그 결과는 다음과 같다.

첫째, PCF를 무응집제로 운영시 탁도 제거효율이 평균적으로 20%이하로 낮게 나타난 반면, 응집

제를 투여한 경우에는 80% 이상 높은 제거효율을 보였다.

둘째, PCF와 완속여과지의 최종 처리수 탁도 제거효율이 평균적으로 84.3%로 이중 PCF는 평균적으로 57.1%로 완속여과지의 27.7%보다 두배 이상 높게 나타나 PCF가 완속여과지 전처리공정으로 유입원수에 대한 고탁도를 저감에 효과적인 것으로 나타났다.

셋째, 응집제를 투여하여 PCF를 운영하더라도 역세척후 120분부터 PCF 내부의 수두상승으로 인하여 미세입자의 유출 가능성이 높음으로, 비록 탁도 제거효율은 높더라도 미세입자의 유출을 고려하여 여과지 속시간을 결정하는 것이 필요하다.

넷째, PCF를 이용하여 복류수를 처리할 때 유입수 탁도가 동일 탁도라 하더라도 5NTU로 낮추기 위해서 요구되는 응집제 투여량의 범위는 다소 넓게 나타나므로 유입원수 탁도에 대하여 일정량의 응집제를 투여하기보다는 유입원수 탁도 성상 또는 탁도 증가 속도 등에 따라서 PAC 투여량을 조절하며 탄력적인 운영을 하여야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- Gary, S.L., Slow Sand Filtration, ASCE, New York, USA(1991).
- Poynter, S.F.B., and Slade, J.S., "The removal of viruses by slow sand filtration", Progress in Water Technology", 9, 75-88 (1997).
- Biologically Enhanced Slow Sand Filtration for Removal of Natural Organic Matter, AWWA (1993).
- Grabbe, U., Seyfried, C. F. and Rosenwinkel, K. H., (1993), "Upgrading of wastewater treatment plants by cloth-filtration using an improved type of filter-cloth", Water Science Technology, 37(9), 143-150.
- 전향배, 이영주, 신승식, "표면처리된 완속여과 시스템에서 입자 및 자연유기물(NOM)의 제거 특성 연구", 대한환경공학회지, Vol. 25, No. 9, pp. 1132~1137 (2004).
- 이무재, 임정수, 이상덕, 박덕수, 김기진, 전향배, "활성탄 소섬유 필터를 이용한 고도정수처리시스템에 관한 기초연구(1)", 대한환경공학회 춘계 학술발표회 논문집, pp.353~354 (2003).
- 임정훈, 김효관, 문태섭, 김지원, 우혜진, 김창원, "충진밀도와 HRT에 따른 섬유사 여과기의 처리성능 변화", 대한환경공학회 추계 학술발표회 논문집, pp. 1309~1314(2003).

김지원, 유상용, 박성호, 한기백, 우혜진, "3FM 여과기를
이용한 하천수질 개선연구", 대한환경공학회 추계 학술

발표회 논문집, pp.1439-1440 (2003).