

접촉여과방식 거친여과지에서 혼화조건과 여과속도가 고탁도 제거에 미치는 영향

Effects of Mixing Condition and Filtration Velocity on Turbidity Removal in a Contact Roughing Filter

박노백 · 박상민 · 홍진아 · 전항배*

Park, Noh-Back · Park, Sang-Min · Hong, Jin-Ah · Jun, Hang-Bae*

충북대학교 환경공학과

(2007년 5월 30일 논문 접수; 2007년 6월 13일 최종 수정논문 채택)

Abstract

Slow sand filtrations have been widely used for water treatment in small communities, however their capacity is often limited by high turbidity in the raw water. For this reason, several pre-treatment facilities were required for a slow sand filter. Turbidity removal from the highly turbid raw water was investigated in roughing filters as a pre-treatment process. The roughing filters followed by rapid mixing tank were operated in the form of a contact filtration. In several jar tests, the predetermined optimum aluminium sulfate (alum) doses for turbid water of 30 and 120NTU were 30 and 50mg/L, respectively. At the optimum alum dose, physically optimum parameters including G value of 220sec^{-1} and rapid mixing time of 3 minutes were applied to the contact filtration system. Without addition of alum, the filtrate turbidity from the roughing filters, packed respectively with different media such as sand, porous diatomite ball and gravel, was in the range of 5~30NTU at filtration velocities of 30 and 50m/day. However, the application of a contact filtration to roughing filters showed stably lower filtrate turbidity below 1.0NTU at filtration velocity of 30 m/day. Although the filtration velocity increased to 50m/day, filtrate turbidity was still below 1.0NTU in both single and double layer roughing filters. At influent turbidity of 120NTU, the filtrate turbidity was over 5 NTU in the triple layer roughing filter, which shortened the filter run time. The flocs larger than $10\mu\text{m}$, formed in the rapid mixing tank, were almost captured through the roughing filter bed, while the almost flocs smaller than $10\mu\text{m}$ remained in filtrate.

Key words: roughing filter, high-turbidity, pre-treatment, contact filtration

주제어: 거친여과, 고탁도, 전처리, 접촉여과

*Corresponding author Tel: +82-43-261-2470 FAX: +82-43-271-7976, E-mail: jhbcbe@cbnu.ac.kr (Jun, H.B.)

1. 서 론

완속여과 공정은 모래 여재 표층에 생성된 생물막층(schmutzdecke)에서 탁도 및 유기물질 제거뿐만 아니라 철, 망간, 바이러스 및 병원성 미생물 등의 제거 효과가 우수한 상수처리 공정으로 알려져 있다. 또한, 운전조작이 간단하고 안정된 수질을 얻을 수 있는 장점 때문에 전국적으로 210여 개소가 완속여과 공정을 운영하고 있으며, 대부분이 5,000m³/day 이하의 소규모 시설이다(상수도통계, 2003). 그러나 완속여과 공정은 고탁도 원수에 대한 대응성이 부족하여 여과지가 조기에 폐색되고, 수두손실(head loss)이 증가하여 여과지속시간을 단축시키는 문제점에 노출되어 있다(Weber-shirk et al., 1997).

정수처리 공정에서 여과지의 탁질 부하량을 저감하기 위한 전처리 방법으로 강둑여과(riverbank filter), 하상여과(riverbed filter), 경사판 침전 및 거친여과(roughing filter) 기법 등이 제안된 바 있다(Collins et al., 1994). 이들 중 거친여과는 적은 부지 공간에서 효율적으로 설치 및 운전 할 수 있고, 수처리환경에 따라 다양한 운영방법을 적용할 수 있다는 장점이 있다. 한편, Elis(1985) 등은 완속여과 공정의 안정적인 운전을 위하여 여과지 유입 탁도를 10~50 NTU로 제한하였으며, Pescod(1986) 등은 25NTU 이상일 때 전처리가 요구된다고 제안하였다. 또한, 일부 연구자들은 안정적인 완속여과지 운영을 위한 유입 한계탁도를 5~10NTU라고 하였다(Wegelin, 1986; Cleasby et al., 1984). Graham(1991) 등은 완속여과지 여층표면에 부직포(non-woven fabric)를 설치하여 모래 여층 표면에서 발생하는 수두손실을 완화시킴으로서 여과지속시간을 증가시킬 수 있다고 하였다. Weber-shirk(1997) 등은 모래여재 표면을 삭취하지 않고 단지 부직포만 회수하여 완속여과지 유지관리를 용이하게 하였다. 또한, 전(2003) 등은 여재 표층을 prefilter로 처리한 여과지에서 탁도제거는 큰 차이가 없으나, 2 μ m 이하의 작은 입자제거에 효율적이라고 하였다.

Gamila(2000) 등과 Stephen(2002) 등은 정수 전처리 공정으로서 거친여과지를 적용하기 위해 다양한 재질의 여재, 입경 및 여과속도에 대한 연구를 수행

된 바 있으며, 40~80% 수준의 탁도 제거효율을 얻을 수 있었다. 한편, Kawamura(1991)는 거친여과지의 여재로서 유효입경(effective size) 3~6mm 정도의 자갈, 분쇄한 안트라사이트, 플라스틱 칩(chip) 등을 사용할 수 있다고 제안한 바 있다.

거친여과지에서 입자의 제거 기작(mechanism)은 일반 급속모래 여과에서의 것과 동일하며, 물리적인 기작으로 표면체거름 작용(surface straining)과 차단(interception), 확산(diffusion), 침전(sedimentation) 등에 의한 운반(trans-*port*) 및 부착(attachment)을 들 수 있다(Haarhoff and Cleasby, 1991). 콜로이드(colloid)와 같은 작은 입자들은 이러한 물리적인 기작에 의하여 여재의 표면에 부착되고 이들 상호간의 응집 작용에 의해 여재 사이의 공극에 억류된다. 따라서 응집제와 고분자 물질을 이용하여 입자와 여재 표면의 전기화학적 결합력을 상승시켜 부착효율을 증대시킬 수 있다(Yao et al., 1971). 이러한 원리로부터, 거친여과지의 탁도 제거효율과 여과속도를 향상시킬 목적으로 응집제를 이용한 화학적 처리가 일부 연구자들에 의해 도입되기도 하였다. Ingallinella(1998) 등은 황산알루미늄(alum)을 300NTU 이상의 고탁도 원수와 함께 거친여과지로 유입시켰을 때 탁도제거 효율을 95% 이상으로 향상시킬 수 있다고 보고하였다. 또한, Park(1997)에 의하면 응집제를 거친여과지 모래여재의 표면에 코팅(coating)하여 운영한 결과, 여과속도를 60~120m/d로 향상시킬 수 있다고 하였다.

국내의 경우, 특히 장마철과 집중호우시 완속여과지를 운영하는 중·소규모 정수장에서 고탁도 원수 유입으로 인한 어려움을 겪고 있으나, 전처리 시설로서 거친여과에 대한 연구와 적용사례가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 급속혼화공정과 결합된 접촉여과(contact filtration) 방식을 거친여과지에 도입하기 위한 최적의 혼화조건을 도출하고, 이를 적용한 거친여과지에서 여과속도에 따른 탁도 제거특성을 관찰하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험장치 및 여재구성

실험실 규모의 거친여과지 원수는 호소수에 Kaolin(H₂Al₂Si₂O₈ · H₂O)을 혼합하여 조제한 고탁도

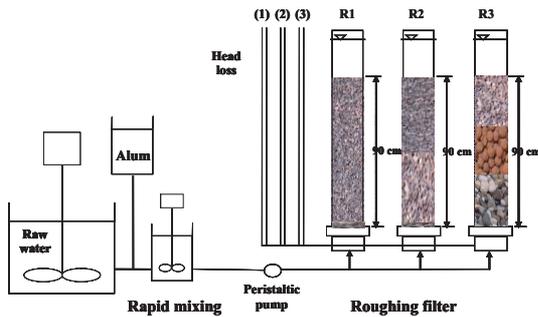


Fig. 1. Schematic diagram of roughing filter systems.

(30, 120NTU) 합성원수를 사용하였으며, 수조에서 입자의 침전을 방지하기 위하여 교반을 수행하였다. Fig. 1은 실험실 규모의 거친여과지 실험장치를 나타내었다. 거친여과지는 자갈, 모래, 난석을 조합한 3조를 구성하여 상향류식(up-flow)으로 운전하였다. 실험에 사용된 여재 중 난석은 다공성의 규조토(diatomite earth) 재질로서, 입자의 크기는 3~4mm 범위로 대체로 균일하였다.

여과지 컬럼은 내경(internal diameter) 4cm, 높이 150cm로 제작하여, 유효용량(working volume)을 1.76L로 하였다. 여과지는 정량 펌프를 이용한 가압 여과 방식으로 운영하였고, 유량을 조절하여 여과속도는 30와 50m/d로 변화시키면서 실험하였다. 유입원수의 탁도는 30, 120NTU를 적용하였는데, 거친여과지로 유입하기 전에 응집제 주입설비와 급속혼화공정을 두어 접촉여과(in-line filtration) 방식으로 운전이 가능하도록 하였다. 황산알루미늄을 정량적으로 주입하기 위한 유량계와 원수와의 원활한 접촉이 가능하도록 속도 조절이 가능한 교반기(mixer)를 설치하였다(Fig. 1).

거친여과지의 하단에 자갈을 5cm 두께로 포설하였으며, 여재는 각각 0.6~1.0mm 입경을 갖는 모래를 충전한 단일여재(Run-1), 입경이 다른 모래 여재를 충전한 이중여재(Run-2), 마지막으로 자갈, 모래, 난석을 이용한 삼중여재(Run-3)로 구성하여 운전하였다. Run-3 운전방식은 Gamila(2000)의 것과 유사한 것이었으며, Table 1은 기타 여재의 크기 및 여층깊이를 나타내었다.

Table 1. Characteristics of media used in the roughing filter systems

Operation mode	Media type	Size (mm)	Depth (cm)
Run 1 (mono layer)	Sand	0.6~1.0	90
Run 2 (double layer)	Sand	2~3	45
	Sand	0.6~1.0	45
Run 3 (triple layer)	Gravel	10~20	30
	Diatomite ball	3~4	30
	Sand	2~3	30

2.3. Jar test

Jar의 규격은 가로, 세로, 높이가 각각 11.5, 11.5, 21cm이었으며, 수면으로부터 10cm 아래에는 밸브를 이용하여 샘플을 채취할 수 있는 포트(port)를 설치하였다. 응집제 혼화용 교반날개(paddle)의 크기는 가로, 세로 각각 7.5 및 2.5cm이었다. 교반날개의 회전속도에 따른 교반강도(G)는 비교 그래프(Phipps & Bird)를 이용하여 산정하였다.

2.4. 분석 항목

원수 및 여과수의 수질측정 항목은 탁도(HACH 2100P turbidimeter, USA), pH(InoLab pH meter, Germany), UV-254(Shimadzu UV1601 Ultraviolet spectro-photometer, Japan), DO(Model 235D DO meter, Korea), Alkalinity 등이었다. 입자성 물질은 입자계수기(PAMAS, Germany)를 이용하여 측정하였으며 기타 분석항목은 Standard method(APHA, 1995)에 준하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 여재 구성에 따른 roughing filter의 여과 특성

3.1.1. 원수 30NTU일 때 여과특성

여재구성을 달리한 3개의 거친여과지(Roughing filter)의 여과성능을 평가하였다. Run-1과 Run-2는 모래를 이용하여 단일과 이중여재로 거친여과지를 구성하였으며, Run-3은 자갈, 모래, 난석을 이용하여 3중 여재로 구성하였다(Table 1). Fig. 2는 여과속도 30m/d와 50m/d로 운전한 결과이다. 여과속도 30m/d일 때, Run-1, 2, 3에서 유출수 탁도는 각각 5, 6, 8

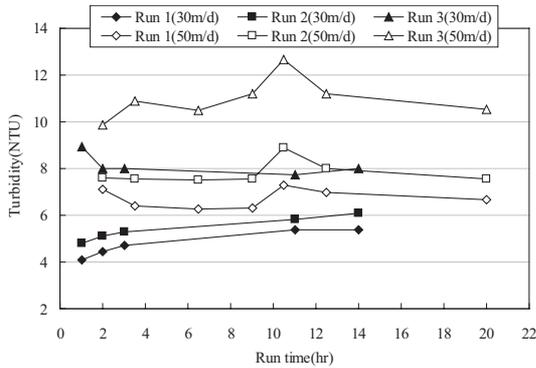


Fig. 2. Effects of filtration velocity on turbidity removal at turbidity of 30NTU.

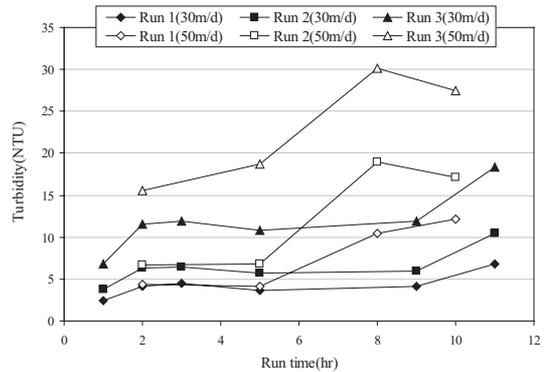


Fig. 3. Effects of filtration velocity on turbidity removal at turbidity of 120NTU.

NTU이었으며 제거 효율은 73~82% 범위이었다. 여과속도를 50m/d로 증가시킨 결과, 유출수 탁도는 각각 7.6, 7.7, 10.9NTU로 증가하였으며, 제거효율은 64~78%로 약간 감소하였다. Gamila(2000) 등은 10m/d의 여과속도에서 다양한 여재를 이용한 거친여과지에서 탁도제거 효율이 37~67%이었다고 보고하였다. 이와 유사하게, Stephen(2002) 등은 수평류식 거친여과를 이용하여 79%의 탁도제거 효율을 얻었다. 본 실험에서 거친여과의 성능은 다른 연구자들과 유사하게 나타났으나, 유출수의 탁도가 5NTU 이상으로 완속여과지로 계속적으로 유입될 경우에는 여과지의 수두손실이 빠르게 증가하고, 조기폐색 될 가능성이 있을 것으로 예상할 수 있다(Jun et al., 2003).

3.1.2. 원수 120NTU일 때 여과특성

Fig. 3은 원수 탁도 120NTU일 때 여과속도를 30과 50m/d로 운영한 결과이다. 여과속도가 30m/d일 때, 모든 거친여과지에서 유출수 탁도가 10NTU 이상이었다. 여과속도를 50m/d로 향상시키기에 따라, Run-3에서는 유출수 탁도가 30NTU 이상으로 증가하였다. 유입탁도가 높아질수록 상대적으로 탁도제거 효율은 향상되나, 다른 문헌에서 제시하는 완속여과에 적용할 수 있는 잠정적인 한계탁도를 지속적으로 초과할 경우, 후속되는 완속여과지의 수두손실이 여재 표층에만 집중되고 수두손실이 급격히 증가하는 운전상태가 발생할 수 있다. 결과적으로, 120NTU 이상의 고탁도 원수가 유입될 경우, 거친여과지를 이용한 전처리 효과를 증대시키기 위하여 응집제 주입

등의 조치가 필요한 것으로 판단된다.

3.2. Jar-test를 이용한 혼화조건 결정

3.2.1. 유입원수 30NTU일 때 혼화조건 결정

거친여과지에 필요한 응집제의 주입량을 결정하기 위하여 표준 jar test를 수행하였다. Phipps & Bird社의 jar를 이용하여 급속교반(180rpm; 240sec⁻¹) 1분, 완속교반(45rpm; 40sec⁻¹) 9분, 침전 30분 후에 잔류탁도를 측정하였다. Fig. 4는 alum 주입량에 따른 잔류탁도를 나타내었으며, 주입량 30mg/L일 때 잔류탁도가 0.5NTU로 가장 낮았다.

접촉여과 공정에서는 혼화 후에 생성된 micro-floc의 밀도와 크기가 여과효율에 상당한 영향을 미치기 때문에 혼화조건이 아주 중요하다. Clark(1987) 등과 Srivastava(1990) 등은 교반강도와 혼화시간이 급속응집에의 가수분해 중 형성에 영향을 줄뿐만 아니라,

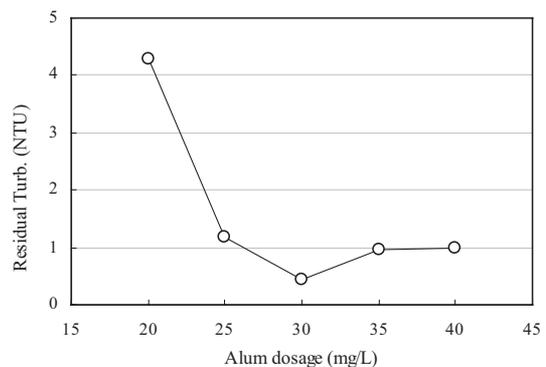


Fig. 4. Residual turbidity at different alum dosages.

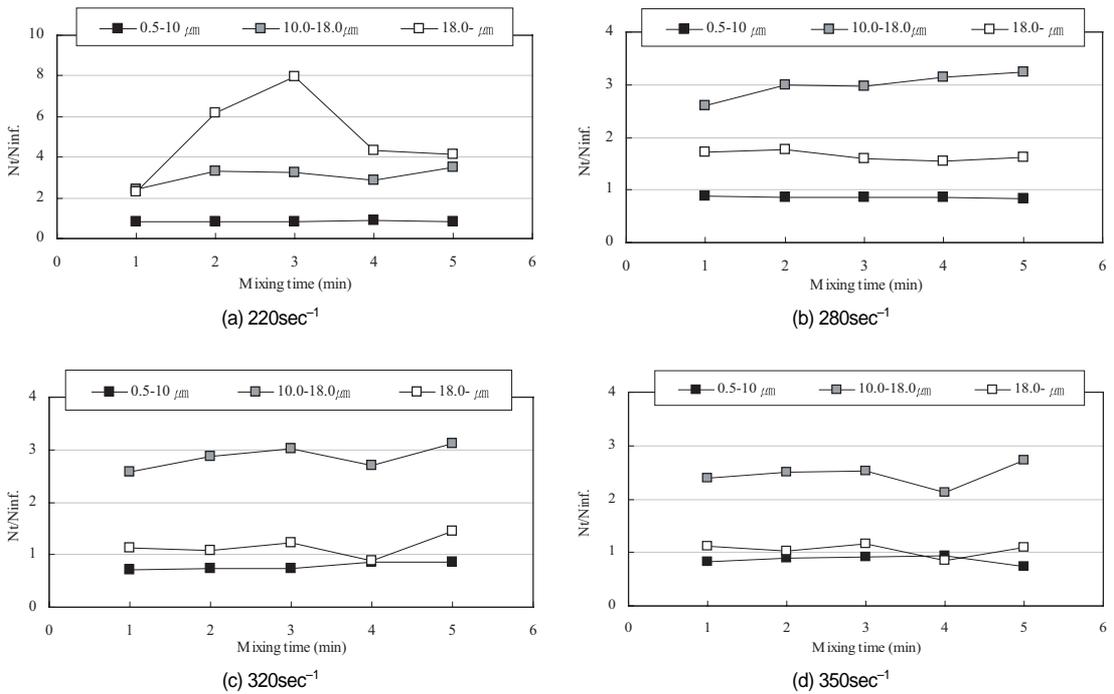


Fig. 5. Particles growth at different G values and mixing times.

특히 유기성 오염물질의 경우에 가수분해 종과 유기 물질간의 상호작용에도 영향을 미친다고 하였다. 또한 Amirtharajah와 Mills(1982)는 급속혼화 조건이 어떤 응집영역에서는 중요할 수 있으나, 다른 응집영역에서는 중요하지 않게 작용하므로 혼화조건이 응집메카니즘에 기초를 두고 설계되어야 한다고 지적하였다.

이러한 관점에서 Fig. 5는 급속교반강도를 220~350sec⁻¹, 혼화시간을 1~5분으로 변화시키면서 미세 입자의 입도를 측정하여 입자성장을 관찰한 결과이다. 280sec⁻¹ 이상의 G값에서는 0.5~10μm의 입자들은 다소 감소하였으며, 10~18μm의 입자수는 대부분 3배 가까이 증가하였다. 또한, 18μm 이상의 입자들은 G값 220sec⁻¹에서 가장 많이 성장하였고 교반시간 3분에서는 최고 8배까지 입자수가 증가하였다. 280sec⁻¹에서는 10~18μm의 입자수는 2배 가까이 증가하였고, 그 이상의 G값에서는 거의 증가하지 않았는데, 이는 강한 교반으로 생성된 floc들이 파괴되어 재 분산된 것으로 추정된다. Rossini(1999) 등은 alum을 사용하여 jar test를 수행할 경우, 최적의 회전속도가 약

100~200rpm이라고 하였는데, floc의 형성을 관찰한 실험결과에서도 유사한 결과를 나타내었다. Kang과 Cleasby(1994)의 보고에 의하면, Al(III) precipitate 중이 더욱 많이 형성되는 조건(sweep floc mechanism)에서 floc의 형성속도가 빠르게 나타났으며, 탁도의 제거효율이 보다 높게 나타난다고 하였다. 김(2001)은 급속혼화조건(G: 550, 150sec⁻¹)에 대하여 실험한 결과, 낮은 교반속도 150sec⁻¹과 sweep응집 메카니즘(sweep floc mechanism) 영역에서 탁도제거 효율이 우수함을 보여주었다. 따라서 본 연구에서의 최적 혼화 조건은 적절한 교반강도(G값)와 교반시간에서 큰 floc이 가장 많이 성장한 220sec⁻¹과 3분으로 결정하였다.

3.2.2. 유입원수 120NTU일 때 혼화조건 결정

Fig. 6은 원수 탁도 120NTU일 때, alum 주입량에 따른 급속교반 후 입자 크기를 분석하여 입자성장을 관찰한 결과를 나타내었다. 유입원수 30NTU일 때와 물리적 혼화조건을 동일하게 고정시킨 후 alum 주입량을 결정하였다. 30NTU일 때와 같이 입자의 성장

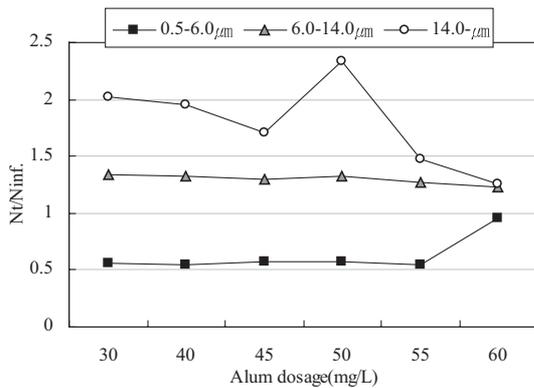


Fig. 6. Particles growth with different alum dosage.

이 큰 폭으로 나타나지는 않았지만, alum 주입량 50 mg/L일 때 14μm 이상의 큰 입자들이 2.5배 가까이 증가하였다. 반면, alum 주입량이 55mg/L로 증가함에 따라, 입자들의 성장 정도가 감소하였고, 60mg/L에서는 작은 입자들이 큰 입자들로 성장하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 응집제가 50mg/L 이상으로 과잉 주입될 경우, 입자들의 성장은 오히려 감소하였으며, 이는 응집제가 과량으로 주입되어 전하 역전현상이 발생하였거나, alum 자체만의 약한 floc이 생성되어 floc 성장에 저해를 받은 것으로 생각되어진다.

3.3. 접촉여과를 이용한 거친여과에서 탁도제거

Fig. 7은 유입원수 탁도가 30, 120NTU일 때, 결정된 최적 혼화조건을 적용한 혼화공정과 여과지를 결합한 접촉여과방식 거친여과지를 30m/d의 여과속도로 운영할 때의 탁도제거를 나타내었다. 접촉여과 방식을 적용하지 않은 경우, 거친여과지의 유출탁도는

여재의 입경이 클 때 (Run-3), 8.0NTU로 약간 높았다. 반면, 접촉여과 방식을 적용한 결과, 1.0NTU 이하로 감소하여 안정적으로 유출되었다. 또한, 유입탁도를 120NTU로 증가시켰을 경우에도 유사한 제거 거동을 나타냈으나, Run-3의 경우에는 접촉여과 방식으로 운영하였을 때, 약 15시간 후 여과지가 파괴되어 탁질이 유출되었다.

Gamila(2000) 등은 여러 가지 여재를 이용한 거친여과지를 10m/d의 여과속도로 운영한 결과, 탁도 제거 효율이 37~86%이었으며, Stephen(2002) 등은 수평류식 거친여과지를 이용하여 79%의 탁도 제거효율을 얻었다고 보고하였다. 다른 연구자는 400NTU의 고탁도 원수를 상향류식 거친여과지에 alum을 주입하여 운영한 결과, 탁도제거 효율을 95% 이상 달성하였다고 하였다. 본 실험에서는 접촉여과 방식을 적용하여 탁도 제거효율을 99%까지 향상시킬 수 있었으며, 거친여과지 유출수 탁도가 0.5~1.0NTU 범위로 매우 안정적이었다.

Fig. 8은 접촉여과 방식을 적용하였을 때, 거친여과지에서 유출되는 입자수를 유입수의 입자수와 비교한 것이다. 10μm 이상의 입자들은 대부분 거친여과지에 억류되어 제거되었으나, 유출되는 입자의 대부분은 10μm 이하인 것으로 나타났다. 특히, 자갈과 난석 등의 입경이 큰 여재를 이용한 Run-3의 경우가 작은 입자들의 억류효과가 가장 낮았다. 이는 접촉여과공정에서 10μm 이하의 미세플럭을 효과적으로 제거하기 위해서는 여재의 입경과 공극과의 크기에 여과 교반조건이 매우 중요하게 관계하는 것을 의미하며, 플럭의 최대성장 조건으로 최적의 혼화조건을 제공해 주는 것이 중요한 것으로 나타났다. 이 때 최소한 10μm

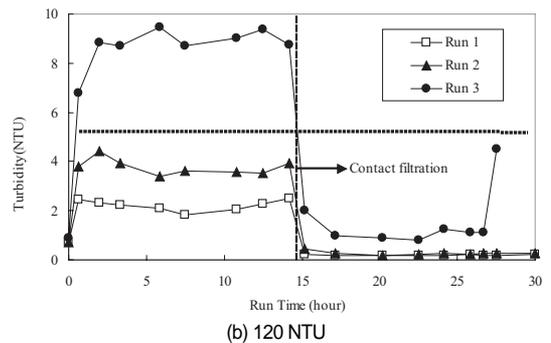
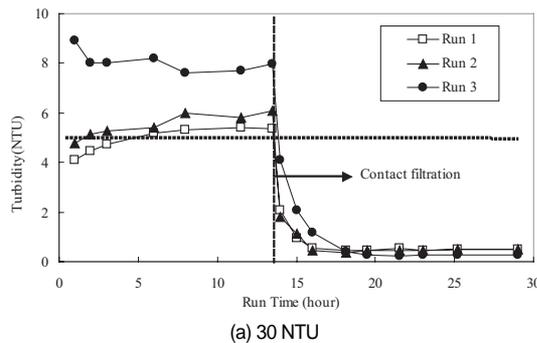


Fig. 7. Turbidity removal in direct roughing filter at filtration velocity of 30 m/day.

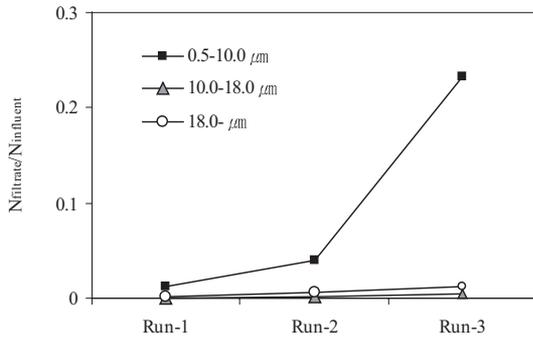


Fig. 8. Efficiency of particle removal at different filter media types.

이상의 플럭을 생성시켜야 할 것으로 사료된다.

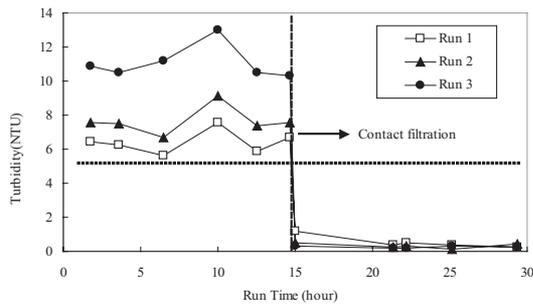
Fig. 9는 유입원수의 탁도가 30, 120NTU일 때, 결정된 최적의 혼화조건을 적용하여 여과속도를 50m/d로 증가시켜 운전한 거친여과지에서 탁도제거를 나타내었다. 여과속도 30m/d(Fig. 7)와 비교하면, 접촉여과 방식을 도입하지 않았을 때, 유출탁도가 증가하였는데, 유입원수가 120NTU의 경우에는 30NTU이었다. 이는 여과속도의 증가로 인해 여재 표면에서의 전단력(shearing force)이 증가함에 따라 입자의 부착력이 감소하였기 때문으로 해석할 수 있다. 반면, 접촉여과 방식을 도입한 결과, 여과속도를 증가시켰음에도 불구하고, 1.0NTU 이하의 안정적인 수질을 유지하였다. 유입탁도가 120NTU일 때, Run-3의 경우 짧은 시간 내에 유출탁도가 5.0NTU 이상으로 증가하여 Cleasby(1984) 등이 제안하였던 완속여과지의 유입 한계탁도에 근접하는 것으로 나타났다. 따라서 여과속도를 증가시키는 데 있어서, 여재의 입경이 클 경우에는 한계가 있음을 시사하고 있다. 다른 거친여

과지(Run-1, 2)에서는 여과속도를 50m/d로 증가시켜 운영하였음에도 불구하고 99% 이상의 탁도 제거효율을 나타냈으며 안정적인 수질을 확보할 수 있었다.

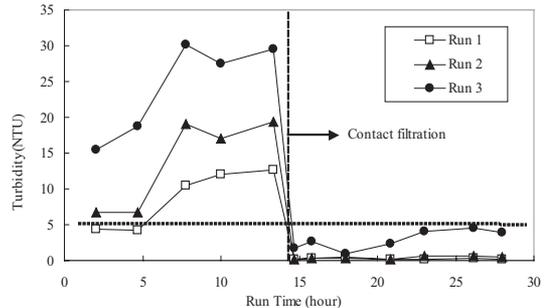
4. 결 론

완속여과지의 탁질부하량을 저감하기 위한 전처리 공정으로서, 응집제를 주입한 혼화공정과 여과지를 결합한 접촉여과 방식으로 운전한 거친여과지에서 탁도 및 입자의 제거특성을 관찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 3가지의 다른 여재구성(Run-1, 2, 3)으로 운전된 거친여과지에서, 유입원수 30NTU일 때 제거효율은 60~90%이었고, 120NTU에서는 유출탁도가 10NTU를 초과하였다.
2. 접촉여과를 도입하기 위해 도출된 최적의 응집제 주입률은 유입원수의 탁도가 30, 120NTU일 때, 각각 30, 50mg/L이며, 물리적 혼화조건은 교반강도(G) 220sec⁻¹, 교반시간 3분으로 동일하였다.
3. 접촉여과 방식을 이용하여 30m/d의 여과속도로 거친여과지를 운영한 결과, 3가지의 다른 여재로 구성된 거친여과지(Run-1, 2, 3)에서 모두 유출탁도는 1.0NTU 이하로 양호한 수질을 얻을 수 있었다.
4. 접촉여과 방식의 거친여과지에서 여과속도를 50 m/d로 증가시켜 운영하여도 1.0NTU 이하의 안정적인 수질을 유지하였으며 자갈, 난석을 이용한 거친여과지는 유출탁도가 5.0NTU 이상으로 증가하였다.



(a) 30 NTU



(b) 120 NTU

Fig. 9. Turbidity removal in direct roughing filter at filtration velocity of 50m/day.

참고문헌

1. 전항배, 이영주, 신승식 (2003) 표면처리된 완속여과시스템에서 입자 및 자연유기물(NOM)의 제거 특성 연구, *대한환경공학회지*, **25**(9), pp. 1132-1137.
2. 박동찬 (1997) 고탁도 원수유입시 전처리 여과기법에 관한 연구, 중앙대학교 건설대학원 환경공학과, 석사학위논문.
3. 김은주, 정철우, 최시환, 강임석 (2001) 정수처리공정시 급속혼화조건이 응집효율에 미치는 영향, *대한환경공학회지*, **23**(4), pp. 631-640.
4. 환경부(2003), *상수도통계*.
5. Collins, R.M., Westersund, C.M., Cloe, J.O. and Roccaro, J.V. (1994) Evaluation of roughing filtration design variables, *AWWA Research Foundation*, pp. 9-14.
6. Elis, K.V. (1985) Slow sand filtration, *CRC Critical Reviews in Environmental Control*, **15**(4), pp. 315-354.
7. Pescod, M.B., H. Abouzaid, and B.B. Sundaresan (1986) Slow sand filtration - a low cost treatment for water supplies in developing countries, Published for the World Health Organization, Geneva.
8. Wegelin, M. (1986) Horizontal flow roughing filtration, a design, construction and operation manual, Report No., 06/86; International Reference Centre for Waste Disposal, Dubendorf, Switzerland.
9. Cleasby, J.L., Hilmoe, D.J. and Dimitracopoulos, C.J. (1984) Slow sand and direct in-line filtration of a surface water, *J. of AWWA*, **76**(12), pp. 44-55.
10. Graham, N.J.D., Mbwete, T.S.A. and Bernardo L.D. (1991) Fabric-protected slow sand filtration, A review. Pro. AWWA-UNH Slow Sand Filtration Workshop, Durham, N.H.
11. Gamila E. (2000) Evaluation of roughing and slow sand filters for water treatment, *Water, Air, and Soil Pollution*, **120**, pp. 21-28.
12. Stephen J. Rooklidge (2002) Clay removal in basaltic and limestone horizontal roughing filters, *Advances in Environmental Research*, **7**, pp. 231-237.
13. Kawamura, S. (1991) *Integrated design of water treatment facilities*, John Wiley & Sons, Inc. pp. 264-276.
14. Ingallinella, A.M., Stecca, L.M. and Wegelin, M. (1998) Up-flow roughing filtration : rehabilitation of a water treatment plant in Tarata, Bolivia, *Wat. Sci. Tech.*, **37**(9), pp. 105-112.
15. Clark, M.M., David, R. and Wiesner, M.R. (1987) Effect of micromixing on product selectivity in rapid mix, in proceeding of AWWA Annual Conference, Kansas, pp. 14-18.
16. Srivastava, R.M., Niemann, C.J. and Clark, M.M. (1990) "Fast-Hydrolysis kinetics of aluminum and the impact of mixing on product speciation, in proceeding of AWWA Annual Conference, Cincinnati.
17. Amirtharajah, A. and Mills, K.M. (1982) Rapid mix design for mechanisms of Alum coagulation, *J. of AWWA*, **74**(4), pp. 210-216.
18. Rossini, M., Garcia, G.G. and Galluzzo, M. (1999) Optimization of the coagulation-flocculation treatment : Influence of rapid mix parameters, *Water Research*, **33**(8), pp. 1817-1826.
19. Kang, L.S. and Cleasby, J.L. (1994) The effects of water temperature and sulfate ion on flocculation kinetics using Fe (III) coagulant in water treatment, in proceeding of AWWA Annual Conference, New York.
20. Weber-shirk Monron L. and Dick Richard I. (1997a) Biological mechanisms in slow sand filter, *J. AWWA*, **89**, pp. 72-83.
21. Weber-shirk Monron L. and Dick Richard I. (1997b) Physical-chemical mechanisms in slow sand filter, *J. AWWA*, **89**, pp. 87-100.
22. Yao, K., Habibian, T., and O Melia, C.R. (1971) Water and Wastewater Filtration : Concepts and Applications, *J. of Environment Science Technology*, **5**(11), pp. 1105.