



지하저수지(ASR) 유입수 전처리기술 개발: 물리적 폐색 저하 및 수량공급원활을 위한 2 단계 급속여과지

Development of pre-treatment for the injection water into the aquifer storage and recovery(ASR) in Korea: The two-step rapid filter to reduce physical clogging and secure the volume of the injected water

박병주·도시현·홍성호*

Park, Byeong-Joo·Do, Si-Hyun·Hong, Seong-Ho*

송실대학교 화학공학과

Department of Chemical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Republic of Korea.

ABSTRACT

Two step rapid filter system as a pre-treatment for the injected water into aquifer storage and recovery (ASR) in Korea was developed to reduce physical blockage and secure the volume of the injected water. First, single rapid sand filters with three different media sizes (0.4~0.7, 0.7~1.0 and 1.0~1.4 mm) were tested. Only two sizes (0.4~0.7 and 0.7~1.0 mm) satisfied target turbidity, below 1.0 NTU. However, they showed the fast head loss. To prevent the fast head loss and secure the volume of the injected water, a rapid anthracite filter with roughing media size (2.0~3.4 mm) were installed before a single rapid sand filter. As results, both the target turbidity and reduction of head loss were achieved. It was determined that the media size for a rapid sand filter in two step rapid filter system (i.e. a rapid anthracite filter before a rapid sand filter) was 0.7~1.0 mm. In addition, the effects of coagulant doses on the removal of natural organic matter (NOM), which might cause a biological clogging, were preliminarily evaluated, and the values of UV₂₅₄, dissolved organic carbon (DOC) and SUVA were interpreted.

Key words: ASR(Aquifer storage & recovery), Pre-treatment of two-step rapid filtration, Turbidity, Head loss, SUVA(specific UV absorbance)

주제어: ASR(Aquifer storage & recovery), 2단계 급속여과 전처리기술, 탁도, 손실수두, SUVA(specific UV absorbance)

1. 서 론

우리나라 연평균 강수량은 세계평균 대비 1.6배 높지만, 높은 인구밀도로 인하여 1인당 연 강수량은 세계평균의 1/6에 불과하다(Nam et al., 2013). 또한 우

리나라 수자원 대부분은 지표수에 편중되어 있어 홍수 및 가뭄 등의 기상 변화와 오염물질 유입에 쉽게 노출되어있으며, 이러한 문제들을 해결하기 위해 다원화된 수자원 확보가 필요하다.

안정적인 수자원 확보를 위해 호주는 2005년부터 “수원 다원화(Security through Diversity)” 정책을 통해 지하수 개발을 도입하였고, 미국 국가연구위원회

Received 9 April 2015; Revised 13 May 2015; Accepted 15 May

*Corresponding author: Hong, Seong-Ho (E-mail: shong@ssu.ac.kr_)

pp. 293-303
pp. 305-317
pp. 319-323
pp. 325-335
pp. 337-345
pp. 347-357
pp. 359-370
pp. 371-380
pp. 381-393
pp. 395-406
pp. 407-414
pp. 415-425
pp. 427-436

(National Research Council, NRC)의 물과과학기술위원회(Water Science and Technical Board)는 ‘인공주입을 통한 대수층의 수자원 확보’를 최우선 순위의 주제로 선정하였으며, 일부 유럽국가에서는 지하수법으로 체계적인 지하수자원 관리를 통해 수자원 확보를 위해 노력을 가하고 있다(Park, 2012).

지하저수지로 불리는 ASR(Aquifer Storage & Recovery)은 지표수를 지하 대수층 내에 인위적으로 주입하여 저장하고 필요에 따라 양수하는 수자원 확보 기술이다. ASR은 평상시에는 대수층의 자정능력을 이용하여 주입된 물의 수질을 개선하고, 비상시에는 대수층에 저장된 물을 공급함으로써 국내 수자원 특성인 하천수에 의존하는 불안정성을 보완할 수 있을 것으로 기대된다(Park et al., 2013).

ASR 시스템에서 주입 및 여과 투수율을 저감시키는 폐색은 치명적인 제한 요소로 알려져 있다(Pyne, 1995; Page et al., 2014). 주입수의 수질에 따라 물리적, 생물학적, 화학적 폐색이 일어나며, 물리적 폐색 인자로는 탁도와 TSS(Total Suspended Solid), 생물학적 폐색 인자로는 TOC(Total Organic Carbon), 자연유기물질(NOM, natural organic matter), 총질소, 총인 등이 있으며, 물리학적 폐색이 생물학적 폐색보다 3~4배 이상 발생된다고 알려져 있다(Dillon and Pavelic, 1996). 폐색은 주입 전 침전 혹은 침전/여과와 같은 전처리 기법을 적용하여 저감 가능하다(Lin et al., 2006; Tufenkji et al., 2002; Schubert, 2004).

Table 1에서는 세계 각국의 ASR에 적용된 전처리 기술과 대수층 주입수의 수질 기준을 나타내었는데, 그 기준이 정형화되어 있지 않고 다양함을 알 수 있다. 예를 들어, 미국의 Orange County에서는 대수층 주입수를 모래여과/활성탄, Microfiltration/Reverse Osmosis와 같은 고도정수처리를 통해 먹는 물 수질 기준 이상 처리 하였지만, 호주 및 남아프리카에서는 침전과 침전/

여과 전처리기술을 적용하였고, 탁도 기준도 2-3 NTU로 설정하였다. 본 연구에서의 폐색저감을 위한 목표 수질은 1 NTU 이하로 결정하였는데, 현재 국내 우수 및 지표수에 대한 지하 주입 수질 기준이 정해져 있지 않아 환경부 법령 (Ministry of Environment, 2011)에서 지하수를 원수로 사용하는 수돗물 경우의 규정을 적용하였다.

Lin et al.(2006)은 부유물질의 부하량을 저감하는 거친여과(Roughing filtration)와 원수의 생물학적 활동을 저감할 수 있는 완속여과를 결합한 공정(Multi-stage granular filtration)을 전처리로 제안하였으며, 국내에서도 거친여과지는 변화하는 표층수의 다양한 수질을 안정화하는데 적합하여 다양한 수처리 환경에 적용 가능한 것으로 알려져 있다(Park et al., 2007). 그러나, 수질 측면에서의 장점에도 불구하고, 거친여과에 적용되는 유속은 일반적으로 0.3-1.5 m/hr 정도로 완속여과에 적용되는 유속(0.04-0.4 m/hr)보다는 빠르지만 급속여과에 적용되는 유속인 5-15 m/hr에 비해 느리기 때문에(Graham, 1988; Wegelin, 1996; Collins et al., 1991) 여과지 면적당 여과수량 및 운영특성에 따라 제한적일 수 있다. 즉, 수질에 대한 고려뿐만 아니라 대수층 주입수량을 만족시켜야 하는 상황에서는 적절한 여과속도가 설정된 전처리기법이 개발되어야 한다(Edzwald, 2011).

본 연구는 ASR시스템의 전처리 기법 개발에 대한 것으로, 물리적 폐색 저감을 위한 주입수 수질과 생산수량 만족이 가능한 2 단계 급속여과지(급속 안트라사이트여과 + 급속 모래여과)에 대한 것이다. 목표 수질(1 NTU 이하)을 만족하는 조건 도출을 위해, 입자 크기, 유효경, 등에 따른 유출수의 탁도 및 손실수두를 평가하여 2 단계 급속여과지의 최적조건을 제시하였다. 또한, 추가적으로 응집에 따른 DOC와 UV254의 저감에 대하여 고찰하였다.

Table 1. Examples of ASR from various locations

Location	Pre-treatment	Water quality standard
Orange County, Florida	Advanced Treatment	TDS < 30 mg/L TOC < 0.3 mg/L
Kerrville, Texas	Domestic standards	similar to groundwater.
Bolivar, South Australia	Ponds + Cl ₂	Turbidity < 3 NTU
Urrbrae, South Australia	Ponds + Filtration	Turbidity = 2 NTU
Omdel, Namibia	River	Storm water : DOC 8 - 10 mg/L
Windhoek, South Africa	Dam	DOC ~ 4 mg/L

^aSummary of (a)Wehner, 2010, (b) Murray, 2009, (c) Lin et al., 2006



2. 실험 방법 및 재료

2.1. 실험재료

실험에 사용된 원수는 한강과 낙동강에서 채수하였으며, 채수된 원수의 수질 특성을 Table 2에 나타내었다.

여재는 모래(규사)와 안트라사이트를 사용하였으며, 응집제는 $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ (Duksan, Korea)로 실험을 수행하였다. Lab-scale column은 아크릴 재질로 내경 5 cm 높이가 200 cm 크기의 원형으로 제작하였다.

Table 2. Characteristics of raw water

Items (Unit)	Range	
	Han-river ^a	Nakdong-river ^b
Turbidity (NTU)	3.5~4.5	5.3~6.4
DOC (mg/L)	2.1~2.6	2.4~3.0
UV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	0.040~0.050	0.067~0.080

^a: Sampling at Sept.~Nov., ^b: sampling at Dec.

2.2 실험방법

2.2.1 실험장치 운전

Lab-scale column 여과 운전은 Fig. 1에 나타낸 개요도와 같이 장치를 구성하여 실험을 수행하였다. 2단계 여과지 운전시에는 안트라사이트 여과지에서 생산된 유출수를 시간별로 저장하였다가 순서대로 모래여과지의 원수로 사용하였으며, 이 때 원수의 수질은 한강수

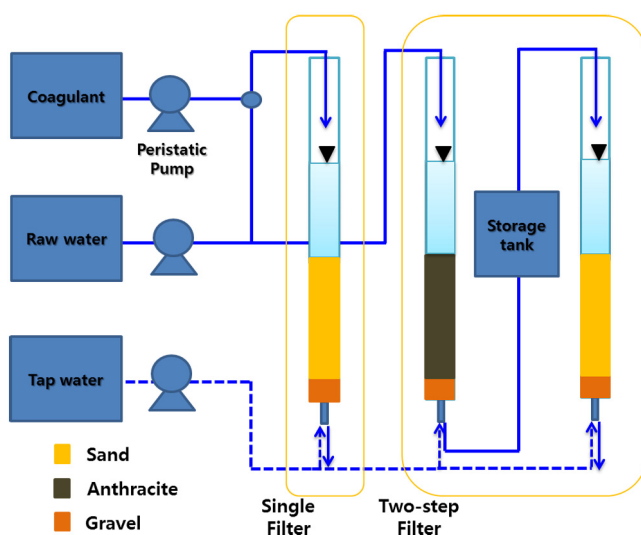


Fig. 1. Schematic diagram of single and two-step rapid filtering system.

경우에는 탁도 1.08 ± 0.03 NTU (n=10), DOC 2.19 ± 0.08 mg/L (n=3), UV₂₅₄ 0.049 ± 0.003 cm⁻¹ (n=3)이었으며, 낙동강수 경우에는 탁도 2.62 ± 0.08 NTU (n=10), DOC 2.63 ± 0.02 mg/L (n=3), UV₂₅₄ 0.074 ± 0.005 cm⁻¹ (n=3)으로 운전 시간 동안에 거의 일정하게 유지되었다. 단일 여과지와 2단계 여과지에 사용한 원수는 모두 교반기가 설치된 수조로부터 Cole Palmer사의 tubing 펌프를 이용하여 일정한 유입속도로 도입하였으며, 운전 중 일정 시간마다 column에 유입되기 전 원수와 최하단에서 여과되어 나온 유출수의 유량을 메스실린더와 스톱워치로 측정하였다. 응집실험 시 응집제는 유입원수 유량의 2% 이하로 Y자 튜브를 통해 원수와 혼합하여 주입하였다.

2.2.2 여재입도분포 측정

여과지에 사용하는 여재의 유효경과 균등계수를 측정하기 위해 독일 Tyler사의 RX 30 model의 Ro-tap 체진동기를 사용하였으며, KWWA(Korea Water and wastewater Works Association, 2009)에서 제공하는 수도용 여과모래 실험방법을 따라 입도분포 측정을 수행하였다. 안트라사이트 여재 크기는 2.0~3.4 mm범위를 사용하였으며, 모래 여재크기는 0.4~0.7 mm, 0.7~1.0 mm, 1.0~1.4 mm의 세 가지 범위를 선정하여 실험하였다.

2.2.3 응집제 주입량 평가

여과지에 적용할 수 있는 응집제 주입량을 선정하기 위해 Jar-test 실험을 수행하였다. 반응 용기는 직사각형 PVC재질의 가로, 세로, 높이는 10 × 10 × 14 cm, 교반 날개 임펠러의 크기는 가로, 세로 각각 7 × 2 cm로 제작되었다. 급속교반(100 rpm, 1분)과 완속교반(30 rpm, 30분) 및 침강(30분) 후 여과수 혹은 상등수를 채취하여 탁도, DOC 그리고 UV₂₅₄를 측정하였다. 또한 Jar-test 실험에서 얻어진 결과와 모래여과지(여재크기 0.4~0.7 mm)에서의 응집제 주입량에 따른 탁도, DOC 그리고 UV₂₅₄ 결과를 비교 평가하였다.

2.3 분석

원수 및 여과수의 수질 분석 항목으로 탁도는 HACH사의 2100N turbidimeter를 사용하여 2주에 한번 STABLCAL Formazin 표준용액으로 Calibration 하였으며, 안정적인 상태에서 샘플을 위아래로 3번 반복하여

pp. 293-303
pp. 305-317
pp. 319-323
pp. 325-335
pp. 337-345
pp. 347-357
pp. 359-370
pp. 371-380
pp. 381-393
pp. 395-406
pp. 407-414
pp. 415-425
pp. 427-436

조심스럽게 뒤집어 균일하게 한 후 측정하였다. UV₂₅₄는 AnalytikJena사의 SPECORD-200 Spectrometer를 이용하였으며, 샘플을 0.45 µm 여과지(Filter paper)에 여과한 뒤, 석영 셀에 넣어 UV파장 254 nm에서 측정하였다. DOC(Dissolved Organic Carbon)는 AnalytikJena사의 NC 3100을 이용하였는데 0.45 µm 여과지를 통과한 샘플을 pH 2이하로 조절하고 질소로 폭기하여 휘발성 유기물질을 제거한 뒤에 고온산화 NDIR 방식으로 DOC를 측정하였다. SUVA는 위의 방법으로 측정한 DOC(mg/L)와 UV₂₅₄(cm⁻¹)의 분율인 L/(mg·m)으로 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 여재 입도분포측정 및 여재 구성

안트라사이트 및 모래여과지별 여재층의 유효경과 균등계수를 Table 3에 나타내었다. 유효경(effective size, ES)과 균등계수(uniformity coefficient, UC)는 여재층의 입도분포의 특징을 나타내는 중요 인자로 알려져있다(Crittenden et al., 2005). 유효경은 입도분포 측정 실험에서 도출한 가적곡선에서 체통과중량 10%에 해당하는 입경(D₁₀)이며, 균등계수는 유효경과 체통과중량 60%에 해당하는 입경(D₆₀)의 분율(D₆₀/D₁₀)이다(Korea Water and wastewater Works Association, 2009). 입도분포측정 결과, 거친여과 수준의 여재크기인 안트라사이트(AN)의 유효경은 1.95~2.05 mm였으며, Sand-A, Sand-B 그리고 Sand-C의 유효경은 각각 0.38~0.48 mm, 0.57~0.67 mm 그리고 0.95~1.05 mm로 급속여과지에서의 유효경이었다. 급속여과지에서 유효경은 작을수록 여재층 두께가 얇고 역류효과가 좋은 반면, 탁질제거량에 한계가 있어 손실수두가 빠르게 증가하므로 장기간 여과지속이 어려운 것으로 알려져있다(National Institute of Environmental Research, 2013).

L/d ratio(여재층 깊이/유효경)는 여과지 여재층을

구성 할 때 1000~2000으로 권장되고 있으며(Crittenden et al., 2005), Kawamura(2000)는 심층여과를 위한 L/d ratio값으로 여과지에 작은 입자(fine media)를 사용하였을 때는 1000 이상, 유효경이 1~1.5 mm의 거친 입자(coarse media)일 때, 1250 이상을 제안하였다. 본 연구에 적용된 L/d ratio 값은 약 1400으로 설정하였으며, 입도분포 측정을 통해 도출한 유효경에 따라 여재층 높이를 구성하였다.

3.2 단독 모래 여과지에서 여과특성

대수층에 주입될 목표 수량을 만족시키는 ASR 시스템에서의 전처리 운영을 위해 급속여과의 유속 범위에서 실험을 수행하였다. 여과속도를 130 m/d (약 5.4 m/hr)로 일정하게 유지하였을 때, 유효경이 다른 모래여과지 유출수의 탁도, UV₂₅₄, 유속, 손실수두 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 세 가지 유효경 중 가장 작은 유효경의 Sand-A는 운전시간 3 시간 동안 유출수 탁도는 0.5 NTU 이하였으나, 유속이 운전시간 1시간 후에 급속히 감소하였고 손실수두도 빠르게 증가하였다. 여과속도가 감소하고 손실수두가 기하급수적으로 증가하는 이유로는 여재층의 상단 부분에 대부분의 입자들이 억류되면서 표면에 생긴 cake 현상 때문인 것으로 판단된다(Cleasby and Baumann, 1962).

Sand-B는 운전시간 동안 유출수 목표 탁도를 만족하였고, 여과속도가 유지되었지만 손실수두가 운전시간 2시간 이후부터 꾸준히 증가하였다. Sand-C는 6시간 운전하였을 때 손실수두 증가가 미미하였지만, 유출수 탁도는 1.0 NTU 부근으로 목표 탁도를 만족하지 못하였다. 따라서 목표 수질을 유지하면서 손실수두 증가를 지연시키기 위한 방법으로 Sand-A와 Sand-B 전단에 탁질 부하량을 감소시키면서 유속을 유지할 수 있는 기법 적용을 고려하였다. 추가적으로, 유출수의 UV₂₅₄ 값을 측정하였는데, 유효경에 상관없이 큰 차이를 보이지 않았으며, 약 30분의 운전시간 이후로는 자연유기물질이 일정하게 유지되었다.

Table 3. Characteristics of media used in the filter systems

Media type	Size (mm)	ES (mm)	UC (D ₁₀ /D ₆₀)	Depth (cm)	L/d ratio
AN	2.0~3.4	1.95~2.05	1.3	70	350
Sand-A	0.4~0.7	0.38~0.48	1.2	60	1395
Sand-B	0.7~1.0	0.57~0.67	1.2	90	1451
Sand-C	1.0~1.4	0.95~1.05	1.2	140	1400

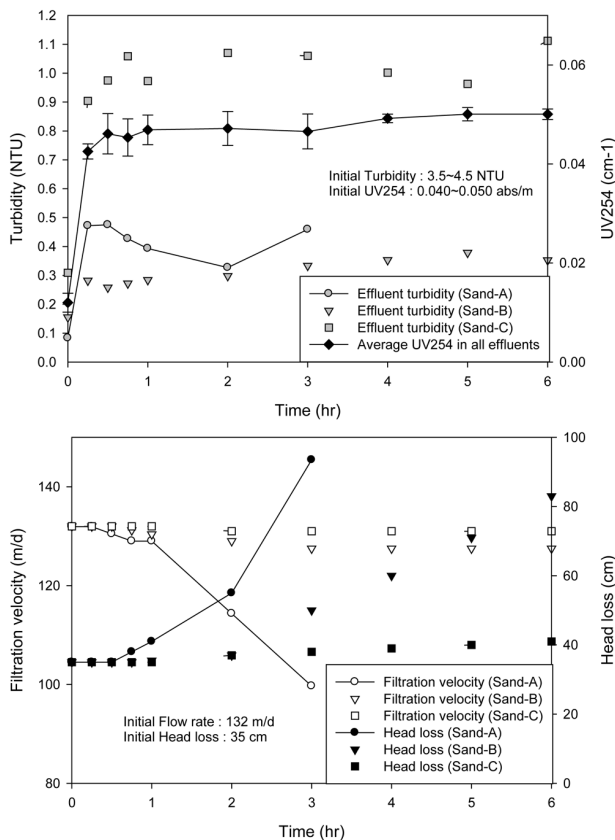


Fig. 2. Turbidity, UV₂₅₄, effluent flow rates and head loss at a single rapid sand filter.

3.3 응집제 투여량에 따른 자연유기물질 제거 특성

자연유기물질의 주입은 대수층내의 생물학적 폐색 원인이 될 수도 있기 때문에 응집제 주입에 따른 모래여과지의 거동을 평가하였다. 우선적으로, 응집제 주입농도에 따른 유기물질과 탁도 제거율을 Jar-test를 통해 고찰하였다. 응집제 농도별 급속교반 또는 급속/완속교반 후의 상등액을 여과종이를 통해 진공 여과한 여과수와 급속/완속교반 + 침강 후의 상등액을 채취하여 탁도를 측정된 결과를 Fig. 3에 나타내었고, 응집제 농도에 따른 여과수 및 상등수의 탁도를 통하여 여과성플록과 침전성플록 형성을 평가하였다.

급속/완속 교반의 경우 응집제 주입 농도 5 mg/L부터 여과수 탁도가 0.15 NTU까지 떨어진 후 일정하게 유지되었고, 급속 교반의 경우에는 여과수 탁도가 0.15 NTU까지 감소하기 위해서는 응집제 주입량 10 mg/L가 필요함을 알 수 있었다. 또한, 침전성플록(급속/완속교반+상등수의 탁도)생성을 위해서는 20 mg/L의 응집제가 주입되어야 함을 알 수 있었다. Jun et al.(2002)은

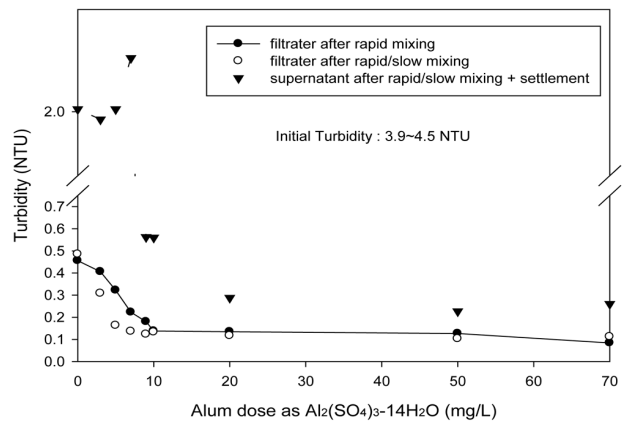


Fig. 3. Turbidity at different alum doses.

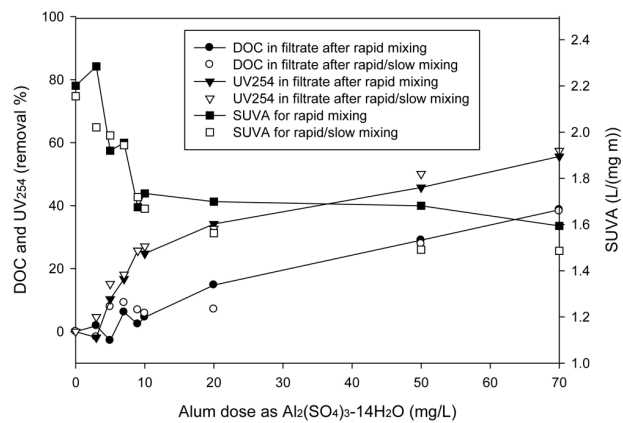


Fig. 4. DOC, UV₂₅₄ and SUVA in filtrate according to alum doses.

여과성플록 생성을 위한 응집조건은 pH와 관계없이 유사하게 나타나며, 침전성플록 생성을 위한 응집제 주입량은 여과성플록 생성을 위한 주입량보다 약 2배 정도 많다고 보고하였다. 또한 본 연구에서의 여과성 플록 결과도 기 보고된 전형적인 응집제 주입 농도 5~10 mg/L 범위에서 나타났다(Moncsvitz et al., 1978; Tobiasson et al., 1992).

Fig. 4는 응집제 주입 농도에 따라 교반 후 여과지를 이용한 여과수의 DOC와 UV₂₅₄의 제거율 및 Specific UV Absorbance (SUVA)를 나타낸 그림이다. DOC 제거율은 응집제 농도가 증가할수록 점진적으로 상승하였으며, 주입농도 70 mg/L에서 38%까지 제거가 가능하였다. 또한 UV₂₅₄ 제거율은 응집제 주입농도 10 mg/L까지 24~27%까지 크게 증가하였고, SUVA값도 같은 농도까지 2.2에서 1.7 L/(mg·m) 이하로 크게 감소하였다.

pp. 293-303
pp. 305-317
pp. 319-323
pp. 325-335
pp. 337-345
pp. 347-357
pp. 359-370
pp. 371-380
pp. 381-393
pp. 395-406
pp. 407-414
pp. 415-425
pp. 427-436

White et al.(1997)은 SUVA값이 고분자량의 자연유기물질 구성비를 나타내는 인자라고 하였으며, Archer and Singer(2006)는 UV₂₅₄가 저분자량 물질보다 고분자량 물질에 더 큰 영향을 받는다고 하였다. 따라서, 여과성플록 형성까지 응집제 주입 농도가 증가할수록 UV₂₅₄의 증가가 DOC의 증가보다 크기 때문에 SUVA 값이 크게 감소한 것으로 판단되며, 응집제 Alum은 고분자량의 물질을 우선적으로 제거한 것으로 판단된다.

결과적으로 여과성플록 형성 농도로 선정한 10 mg/L까지 탁도 및 자연유기물질은 급격한 제거율을 보였다. 이후 응집제 농도가 증가할수록 탁도는 일정하였지만 자연유기물질을 나타내는 DOC와 UV₂₅₄ 제거율은 점진적으로 증가하였다.

Edzwald(2011)에 따르면 직접여과 시 최적의 응집제 주입량은 여과수질만으로는 결정되지 않으며, 주입량이 증가함에 따라 수질은 서서히 개선되지만 손실수두가 빠르게 증가하여 여과지의 파과가 빨라진다고 보고하였다.

3.4 응집제 주입에 따른 모래여과지 여과특성

직접여과는 공정시설 부지 및 응집제 소비량을 축소할 수 있는 안정된 수질에서 사용되는 여과 방법이다. 전처리시설 최소화를 위한 본 실험에서는 이를 모사한 직접여과식으로 응집제와 원수를 별도의 혼화장치 없이 Y자 튜브를 통해 Sand-A 모래여과지에 주입하였을 때 유출수의 수질 및 손실수두의 변화를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다.

모래여과지에서의 자연유기물질 제거율 경향(Fig. 5)은 Jar-test 실험 결과(Fig. 4)와 유사하여 주입하는 응집제의 농도 10 mg/L까지는 UV₂₅₄가 비교적 크게 상승하였으며, 이후부터 DOC와 UV₂₅₄ 제거율 모두 점진적으로 상승하였다.

모래여과지에서의 응집제 주입에 따른 유출수 탁도는 응집제 농도 10 mg/L인 경우에 약 0.2 NTU로 Jar-test 결과보다 높았고, 응집제 농도가 20 mg/L 이상에서는 0.1 NTU 이하였다. 또한 직접여과 방식의 단점으로 응집제 주입 농도가 증가함에 따라 손실수두 증가가 더 빨라지고 운전시간이 짧아지는 것을 확인하였다. 결과적으로 응집제 주입은 자연유기물질 제거에는 효과적이지만 여과지의 손실수두 증가를 촉진하여 운전 시간을 단축하였다.

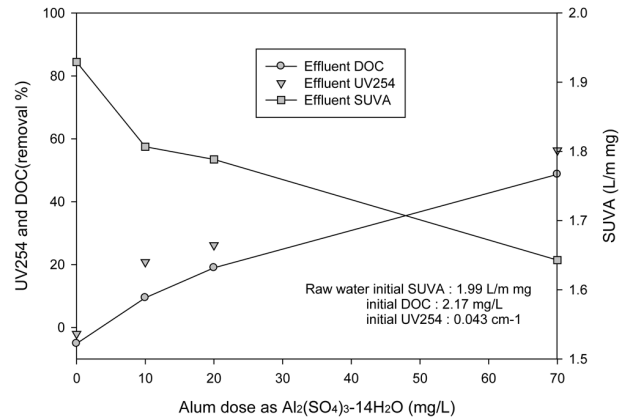


Fig 5. DOC, UV₂₅₄ and SUVA according to alum doses at a single rapid sand filter.

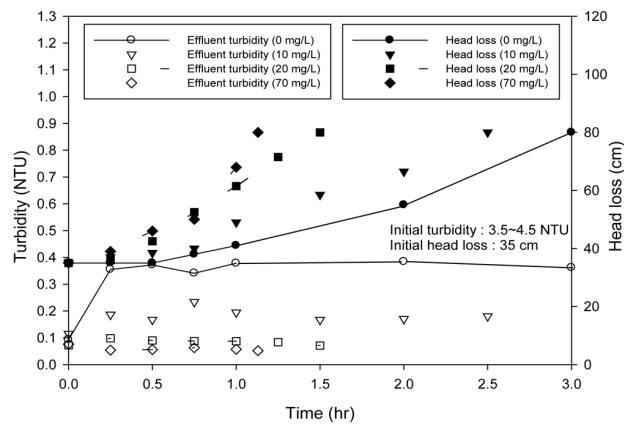


Fig 6. Turbidity and head loss at a single rapid sand filter.

3.5 급속 안트라사이트 여과지 여과특성

앞선 연구결과로부터 Sand-A와 Sand-B는 목표 수질은 달성할 수 있지만, 손실수두 증가로 대수층 주입수량을 만족시킬 수 없다고 판단하였다. 따라서 급속 모래여과지 전단에 탁질 부하량을 감소시키면서 유속은 유지할 수 있는 급속 안트라사이트 여과지의 특성을 평가하였다. 급속 안트라사이트의 유효경은 1.95~2.05 mm였으며, 여과속도는 130 m/d로 설정하였고 한강과 낙동강 원수를 주입하여 운전하였다.

급속 안트라사이트 여과지의 유출수 탁도 및 UV₂₅₄를 Fig. 7에 나타내었다. 급속 안트라사이트 여과지에서의 여과속도는 12 시간 동안 130 m/d를 유지하였고, 유출수 탁도는 한강 유입 원수 대비 제거율은 약 75%였으며 낙동강 유입 원수 대비 제거율은 약 54%였다. 또한, 원수 별 유출수의 UV₂₅₄를 측정하였을 때, 자연유기물질 저감은 없었다. Khan and Farooqu(2011)는

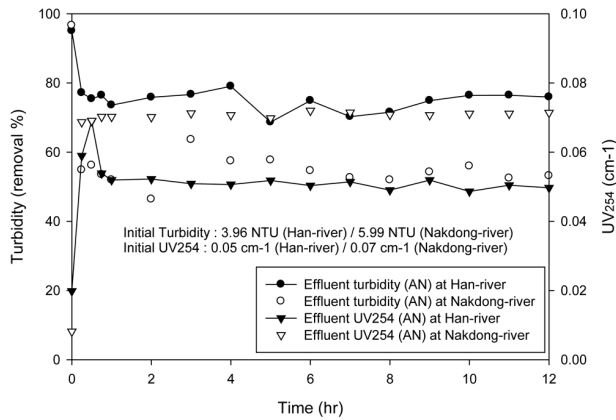


Fig. 7. Turbidity and UV₂₅₄ at a single rapid anthracite filter.

모래를 여재로 사용하여 12 m/d 여과속도로 하향류 거친여과를 적용하였을 때 약 68%의 탁도 제거율을 얻어냈으며, Gamila(2000)는 슬래그, 현무암, 자갈, 모래 등의 조합으로 이루어진 거친여과지에서 10 m/d 여과속도로 운전하였을 때 37~67%의 탁도 제거율을 얻었다고 보고하였다. 결과적으로 급속 안트라사이트 여과지는 한강 및 낙동강 하천수를 적용하였을 때, 50% 이상의 탁도 제거율을 얻을 수 있어 후단의 급속 모래여과지의 탁도 부하량 저감이 가능할 것이다.

3.6 2 단계 여과지(Two-step filter) 특성

목표 수질 및 수량의 확보를 위해 앞서 수행된 급속 안트라사이트 여과지(AN)와 급속 모래 여과지(Sand-A와 Sand-B)를 순차적으로 구성한 2 단계 급속 여과지를 평가하였다. 한강 및 낙동강 원수 적용에 따른 2 단계 급속 여과지의 탁도 및 손실수두를 Fig. 8에 나타내었다.

한강 원수의 경우, AN + Sand-A와 AN + Sand-B에서의 유출수 탁도는 약 0.4 NTU로 급속 모래여과지의 유효경에 따른 차이가 없었다. 하지만 낙동강 원수는 AN + Sand-A에서의 유출수 탁도(약 0.7 NTU)가 AN + Sand-B에서의 유출수 탁도(약 0.8 NTU)보다 낮았다. 손실수두 증가는 낙동강 원수를 적용한 AN + Sand-A에서 8 시간 운전 동안 초기 손실수두 대비 94.3%까지 증가하였고, 나머지 경우에는 손실수두가 약 5.7% 가량 증가하여 손실수두 증가가 미미한 것으로 판단하였다.

단일 급속 모래여과 실험결과(Fig. 2)와 비교하면, 단일 급속 모래여과지의 손실수두 증가(Sand-A: 3시간,

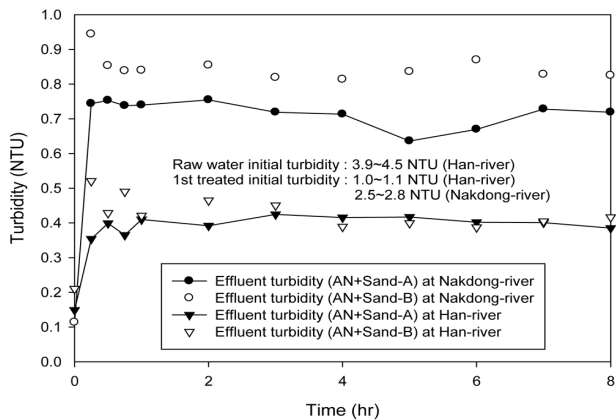
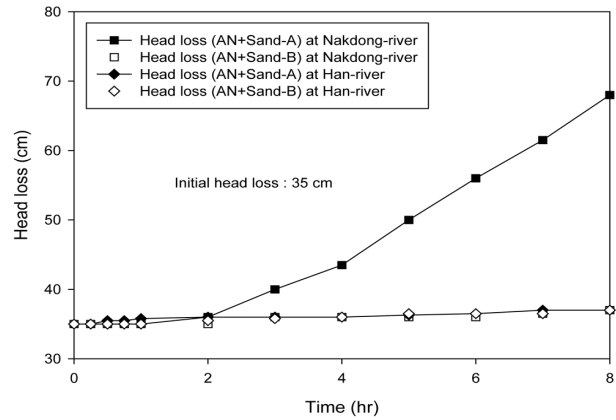


Fig. 8. Turbidity and head loss at a two-step rapid filter.

167%, B: 6시간, 137%)보다 2 단계 급속 여과지의 AN + Sand-A와 AN + Sand-B에서 손실수두 증가가 확연히 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 탁도 및 자연유기물질의 농도가 상대적으로 높은 낙동강 원수를 사용하였을 때는 AN + Sand-A에서도 손실수두 증가가 빠르게 나타났다.

최종적으로 안트라사이트와 Sand-B를 2 단계 급속 여과지(AN + Sand-B)로 구성하여 운영하였을 때, 원수에 상관없이 목표 유출수 탁도를 만족하면서 운전시간 동안 손실수두를 유지할 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 안전한 수질과 높은 주입수 생산을 위한 ASR 시스템의 전처리 기법에 대한 것으로, 대수층 주입수의 탁도는 1.0 NTU 이하를 만족하고 충분한 주입수량을 확보한 2 단계 급속 여과지를 개발하였다.

1) 단일 급속 모래여과지에 한강원수를 적용한 경우, Sand-A와 Sand-B에서 목표 유출수 탁도 1.0 NTU

pp. 293-303
pp. 305-317
pp. 319-323
pp. 325-335
pp. 337-345
pp. 347-357
pp. 359-370
pp. 371-380
pp. 381-393
pp. 395-406
pp. 407-414
pp. 415-425
pp. 427-436

이하를 만족하였지만, 급격한 손실수두 증가(Sand-A: 3시간동안 167%, Sand-B: 6시간동안 137%)가 발생하였다.

2) 응집제 주입시, 주입 농도에 따른 DOC와 UV₂₅₄는 선형적인 제거율 상관관계를 보이며, NOM 제거가 가능하였지만, 손실수두 증가는 더 촉진되어 응집제를 사용하지 않을 때보다 여과시간이 감소하였다.

3) 거친 여재 크기(2.0~3.4 mm)의 급속 안트라사이트 여과 실험 결과, 후단의 급속 모래여과지의 탁질 부하량을 감소시킬 수 있었다.

4) 급속(여과속도: 130 m/d 이상)으로 운전되는 안트라사이트 여과(여재크기: 2.0~3.4 mm)와 모래여과(여재크기: 0.7~1.0 mm)를 순차적으로 연결한 2 단계 급속 여과지는 한강과 낙동강을 원수로 사용하였을 때, 손실수두 증가가 미미하면서 탁도를 0.5 NTU 이하로 유지할 수 있었다.

사 사

본 연구는 국토교통부 물관리연구개발사업의 연구비지원(과제번호 14AWMP-B066761-02)에 의해 수행되었습니다

Reference

Archer, A. D., Singer, P. C. (2006) SUVA and NOM coagulation using the ICR database, *Journal of AWWA*, 98(7), pp. 110-123.

Cleasby, J. L., Baumann, E. R. (1962). Selection of Sand Filtration Rates. *Journal of AWWA*, 54(5), pp. 579-602.

Collins, M. R., Eighmy, T. T., Mally, J. P. (1991) Evaluating modifications to slow sand filters, *Journal of AWWA*, 83(9), pp. 62-70.

Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., Tchobanoglous, G. (2012) *MWH's Water treatment : Principles and Design*, 2nd ed., Wiley, New York.

Dillon, P., Pavelic, P. (1996) Guidelines on the Quality of Stormwater and Treated Wastewater for Injection into Aquifers for Storage and Reuse. *Urban Water Research Association of Australia*, Research Report 109.

Edzwald, J. K. (2011) *Water quality and treatment*, 6th E d., Chapter. 10, McGraw-Hill, New York.

Gamila, E. (2000) Evaluation of roughing and slow sand filters

for water treatment, *Water, Air, and Soil Pollution*, 120, pp. 21-28.

Graham, N. J. D. (1988) *Slow sand filtration: recent developments in water treatment technology*, Ellis Horwood Limited, Wiley and Sons., Chichester, England.

Jun, H. B., Lee, Y. J., Lee, C. Y. (2002) Experimental Methods to Determine the Coagulation Conditions for Optimal Operation of a Direct Filtration System, *Journal KSEE* 24(11), pp. 1901-1909.

Kawamura, S. (2000). *Integrated Design of Water Treatment Facilities*, 2nd ed., Wiley, New York.

Khan, Z., Farooqi, R. (2011) Roughing filtration as an effective pre-treatment system for high turbidity water, *Water Science & Technology*, 64(7), pp. 1419-1427.

Korea Water and wastewater Works Association. (2009). Testing method of filter sand for water works, *KWWA-F-100*.

Lin, E., Page, D., Pavelic, P., Dillon, P., McClure, S., Hutson, J. (2006). Evaluation of Roughing Filtration for Pre-Treatment of Stormwater prior to Aquifer Storage and Recovery (ASR). *CSIRO Land and Water Science Report* 03/06.

Ministry of Environment. (2011). Act on the promotion of water reuse and Support, Application-specific water quality standard of treated wastewater and reclaimed water.

Monscivitz, J. T., Rexing, D. J., Williams, R. G., Heckler, J. (1978) Some Practical Experience in Direct Filtration, *Journal AWWA*, 70(10), pp. 584-588.

Murray, R. (2009). Artificial Recharge: The intentional banking and treating of water in aquifers. *Water Resources Planning Systems Department of Water Affairs& Forestry*, pp. 14-32.

Nam, G. H., Kim, G. B., Gyoo, C. J. (2013) Baseflow Comparison using the WHAT system and Flow Rate Measurements in the Dry and Rainy Seasons, *Journal of Engineering Geology*, 23(2), pp. 117-125.

National Institute of Environmental Research. (2013). *Water treatment standard solution*, NEIR-GP2013-391.

Page, D., Vanderzalm, J., Miotlinski, K., Barry, K., Dillon, P., Lawrie, K., Brodie, R. S. (2014) Determining treatment requirements for turbid river water to avoid clogging of aquifer storage and recovery wells in siliceous alluvium, *Water Research*, 66, pp. 99-110.

Park, N. B., Park, S. M., Hong, J. A., Jun, H. B. (2007) Effects of Mixing Condition and Filtration Velocity on Turbidity Removal in a Contact Roughing Filter, *Journal of the KSWW*, 21(3), pp. 359-366.

Park, N. S., Jeong, U. C., Yang, J. S. (2013) Total Solution



- Technic of Grand Ground Aquifer, Magazine of KWRA, 46(9), pp. 19-26.
- Park, N. S., Land Transport and Maritime. (2012). Aquifer Storage Recovery(ASR) Project R&D Report.
- Pyne, R. D. G. (1995) Groundwater Recharge and Wells: A Guide to Aquifer Storage and Recovery, 1st ed. Lewis Publishers, London.
- Schubert, J. (2004) Significance of hydrologic aspects on RBF performance, In Proceedings of NATO Advanced Research Workshop, Samorin, Slovakia.
- Tufenkji, N., Ryan, J. N., Elimelech, M. (2002) The promise of bank filtration, Environmental Science and Technology, 36(21), pp. 422A-428A.
- Tobiason, J. E., Edzwald, J. K., Schneider, O. D., Fox, M. B., Dunn, H. J. (1992). Pilot Study of the Effects of Ozone and Peroxone on In-Line Direct Filtration, Journal AWWA, 84(12), pp. 72-84.
- Wegelin, M. (1996) Surface water treatment by roughing filters. A design, construction and operational manual, Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology(EAWAG) and Department Water and Sanitation in Developing Countries(SANDEC).
- Wehner, M. (2010) Orange County's Groundwater Replenishment System - Potable Reuse for Best Available Water, Orange County Water District.
- White, M. C., Thompson, J. D., Harrington, G. W., Singer, P. C. (1997) Evaluating criteria for enhanced coagulation compliance, Journal AWWA, 89(5), pp. 64-77.

pp. 293-303

pp. 305-317

pp. 319-323

pp. 325-335

pp. 337-345

pp. 347-357

pp. 359-370

pp. 371-380

pp. 381-393

pp. 395-406

pp. 407-414

pp. 415-425

pp. 427-436