



Analysis of water withdrawal and quality of intake pipe with functional screen

Yang, Jeong-Seok^{a*} · Kim, Il-Hwan^a · Jeong, Jae-Hoon^b

^aSchool of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University

^bWell Tech Ltd.

Paper number: 17-045

Received: 22 May 2017; Revised: 30 June 2017; Accepted: 30 June 2017

Abstract

In order to analyze the quantitative water withdrawal amount of intake pipe with functional screen and to evaluate the improvement effect of the suspended solid and turbidity through the filter media, four-step research methods were suggested. In the first step, laboratory scale experiments were constructed to determine the constitution method of the sample device filter media. In the second step, sample device was constructed and the flow rate was observed through intake pipe with functional screen. In the third step, flow rate was observed at different turbidity conditions for each filter material, and the hydraulic conductivity was estimated using MODFLOW. Finally, numerical model was constructed with the MODFLOW for the sample device and the estimated hydraulic conductivities were applied to the third step and the amount of water withdrawal was analyzed. As a result of applying hydraulic conductivity at 0 NTU, 39.96% more withdrawal was calculated than the observed flow rate. On the other hand, when hydraulic conductivity was applied at 100~120 NTU, the difference in flow rates was 9.41%.

Keywords: Functional screen, MODFLOW, Hydraulic conductivity, Turbidity

기능성 스크린이 부착된 집수관의 취수량 및 수질 분석

양정석^{a*} · 김일환^a · 정재훈^b

^a국민대학교 건설시스템공학부, ^b(주)웰텍

요 지

기능성 스크린이 부착된 집수관의 정량적인 취수량을 분석하고, 여과 재료를 통한 부유물질 및 탁도의 개선효과를 알아보기 위해 네 단계의 연구 방법을 제시하였다. 첫 번째 단계에서는 소규모의 실험장치를 구성하여 실증 플랜트 여과 재료의 구성 방법을 결정하였고, 두 번째 단계에서는 견본 장치를 구성하여 기능성 스크린이 장착된 집수관을 통해 유량 값을 측정하였다. 세 번째 단계에서는 각각의 여과 재료에 대해서 탁도의 상태를 달리하여 유량을 측정하고, MODFLOW를 이용하여 투수계수를 추정하였다. 마지막으로 견본 장치를 MODFLOW로 수치모형을 구성하여 세 번째 단계에서 추정된 투수계수를 각각 적용하고 취수량을 분석하였다. 0 NTU일 때 추정된 투수계수 적용 결과 실제 관측 유량에 비해 모델링 결과는 39.96% 높게 나타났다. 이에 비해 100~120 NTU일 때 추정된 투수계수 적용 결과 유량의 차이는 9.41% 높게 나타났다.

핵심용어: 기능성 스크린, MODFLOW, 투수계수, 탁도

1. 서 론

최근 전 세계적으로 기후변화 및 도시화 등으로 인해 양질의 수자원 확보에 많은 어려움이 있다. 이를 해결하기 위해 취

수원의 다변화를 이루기 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 선진 국가에서는 지하 대수층을 취수원으로 활용하고 있으며, 강변 및 하상의 지하 매질층을 이용한 여과 방식이 도입되고 있다(Grisczek et al., 2002). 강변 여과수 및 하상 여과수 개발 방법은 지하 매질을 통해 지표수의 미생물 및 금속산화물 등의 오염물질을 저감하는 화학적 여과의 자연 정화 효과를 볼 수 있으며(Baumgarten et al., 2011), 부유물질 및 탁도

*Corresponding Author. Tel: +82-2-910-4289
E-mail: jyang@kookmin.ac.kr (J.-S. Yang)

유발물질 등의 물리적 여과 및 흡착에 의한 양질의 원수를 생산할 수 있다(Henzler *et al.*, 2014). 강변여과는 수질측면에서 많은 장점을 가지고 있으나 지표수의 상태 및 여과되는 매질 층의 불확실한 요소로 인한 문제점이 발생하고 있다. 지하 매질층의 금속 산화물로 인해 강변 여과수의 관정이 폐색되어 생산수의 수량이 감소하여 이를 해결하기 위한 연구가 진행되고 있으며(Schubert, 2002), 지표수의 변화 및 매질 구성으로 인해 발생하는 수량 및 수질의 변화에 대한 예측 연구가 활발히 진행되고 있다(Eckert and Irmscher, 2006). 화학적 요인뿐만 아니라 생물학적 요인인 미생물의 성장으로 인해 강변 여과 시스템의 폐색 현상이 하상에서 관측되어 강변 여과 및 하상 여과의 불확실성이 많이 나타나고 있다(Ulrich *et al.*, 2015). 강변 여과 및 하상 여과의 불확실성을 개선하기 위해 최근 하상의 불균질한 대수층을 치환하고 스크린을 통해 취수하는 개착식 하상여과 방식이 시도되고 있다(Im and Choi, 2009).

Yang *et al.* (2016)은 개착식 하상여과에서 탁수를 고려한 수정 투수계수를 여과 재료에 적용하는 방안에 대해서 연구하였으며, 본 연구에서는 개착식 하상여과의 생산수의 품질을 높이고 정량적 분석을 위한 네 단계의 연구 방법을 제시하였다. 첫 번째 단계에서는 소규모의 실험을 구성하여 실증 플랜트 여과 재료의 구성 방법을 결정하고, 두 번째 단계에서는 견본 장치를 구성하여 기능성 스크린이 장착된 집수관을 통해 유량 값을 측정하였다. 세 번째 단계에서는 소규모 실험장치의 실험에서 단일 여과 재료를 구성하여 견본 장치에 사용되는 각각의 여과 재료에 대해서 탁도의 상태를 달리하여 유량을 측정하고,

MODFLOW를 이용하여 투수계수를 추정하였다. 마지막으로 견본 장치를 MODFLOW를 통해 구성하여 세 번째 단계에서 추정된 투수계수를 각각 적용하고 취수량을 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 소형 플랜트 실험장치

소형 실험에 사용된 장치는 4개 층으로 구성되어 있으며 아크릴로 구성하였다. 실험의 편의성을 위해 축소모형으로 실험하였으며, 상수도 시설기준에서는 필터층 안쪽에서 바깥 쪽으로 굵은 자갈(입경 25~40 mm), 중자갈(입경 13~25 mm), 잔자갈(입경 5~13 mm)의 순서로 각각의 두께 50 cm 이상으로 충전하는 것으로 되어 있다. 제일 하부의 지층 구조물은 기능성 스크린이 장착된 집수관이 위치해 있으며 1500 × 500 × 350 mm (가로 × 세로 × 높이)로 되어 있다. 기능성 스크린이 장착된 집수관은 원통형으로 길이 1300 mm 에 80 mm 의 내경으로 되어있다. 그 위로는 2개 지층 구조물은 높이가 250 mm로 되어 있으며 상부 수조는 높이가 300 mm로 되어 있어 하상여과를 구현하였다. 주입원수의 제조는 수도물에 황토를 희석하여 하천수 중 고농도에 속하는 100~120 NTU의 탁도를 유지시켜 사용하였다. Fig. 1은 실험장치의 실제 모습이고, Table 1은 소규모 실험장치의 여과 재료층 구성이다. 상수도 시설기준에 따른 본래의 여과 재료 구성과 각각 본래에서 75%, 50%, 25%로 각각 여과 재료의 입경에 따라 구성하고 실험을 진행



Fig. 1. Appearance of lab scale riverbed filtration experiment

Table 1. Layer configuration of lab scale riverbed filtration experiment

Layer	Case 1 (100%)	Case 2 (75%)	Case 3 (50%)	Case 4 (25%)
	Grain size (mm)	Grain size (mm)	Grain size (mm)	Grain size (mm)
Top	5~13	4~10	3~7	1~3
Middle	13~25	10~19	7~13	3~6
Bottom	25~40	19~30	13~25	6~10

하였다. 각 실험에 따라 여과 재료층별로 나누어 탁도 및 부유물 저감 효율을 측정하였다. 이후 결정된 여과 재료 구성에 따른 각각의 여과 재료에 대해서 단일 지층으로 구성된 실험을 구성하고 투수계수를 추정하였다. 각각의 실험은 약 5시간으로 진행하였으며, 정량적 분석을 위해 실험 진행 후 2시간 이후의 자료를 측정하였다.

2.2 견본 장치 실험장치

견본 장치에 사용된 장치는 전체 3.5 × 2 × 3 m (가로 × 세로 × 높이)로 구성되어 있고, 지층의 구성은 기능성 스크린으로부터 각각 0.76 m, 0.76 m, 0.78 m로 구성하였다. 지층의 구성은 소규모 실험장치를 통해 결정된 여과 재료로 구성하였으며, 주입 원수는 소규모 실험과 같은 황토를 희석하여 100~120 NTU의 탁도를 유지시켜 사용하였다. 견본 장치의 실험기간은 전체 15일간 24시간 연속으로 운영하여 360시간 동안 각 시간별로 유량 및 탁도, 부유물질을 측정하였다.

2.3 MODFLOW

MODFLOW는 유한차분법에 기초하고 있으며 지하수 유동 및 예측 분야에서 널리 활용되고 있다. Harbaugh and McDonald (1996)은 MODFLOW를 이용하여 강변여과에서 취수율을 예측하였으며, Schafer (2004)는 MODFLOW를 이용하여 강변여과과정의 취수량 등을 예측하여 설계하였다. 본 연구에서는 실험 결과로 측정된 유량을 통해 실험장치에 사용된 여과 재료의 투수계수를 추정하고, 견본 장치 실험장치를 구성하여 추정된 투수계수를 적용하여 집수관의 유량을 분석하였다.

소규모의 실험 장치에 대해서 MODFLOW를 이용하여 동일 크기로 모사하였으며 상부에서 공급되는 하천수는 1.4 m로 일정 수위를 유지하기 때문에 MODFLOW 내의 고정수두 경계 조건을 적용하였다. 기능성 스크린이 장착된 집수관은 배

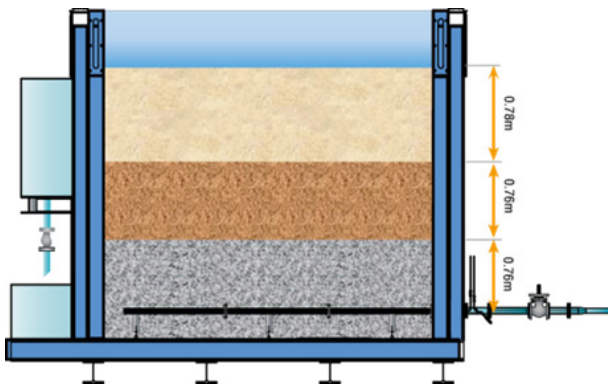


Fig. 2. Appearance of sample device riverbed filtration experiment

수 경계 조건을 사용하였으며, 여기에 사용된 전도계수는 실험을 통해 지정된 값을 적용하였고, 값은 1.04~2.73 m²/s를 이용하였다. 실험 장치를 토대로 4개 지층으로 구성하였으며 기능성 스크린이 장착된 집수관을 모식하기 위해 주변으로 조밀 격자를 구성하였다. Fig. 2는 견본장치의 모식도이고, Figs. 3 and 4는 집수관의 위치 및 조밀격자의 구성을 나타내고 있다. 기능성 스크린이 장착된 집수관을 통해 배수되는 유량은 MODFLOW 내의 Zone Budget Package를 이용하여 분석하였다.

견본 장치 실험의 구성 또한 동일크기로 구성하였으며, 2.58 m로 일정수위를 유지하여 고정수두 경계 조건을 이용하였으며, 소규모 실험에서 사용된 투수계수를 적용하였으며, 기능성 스크린이 장착된 집수관을 모식하기 위해 주변으로

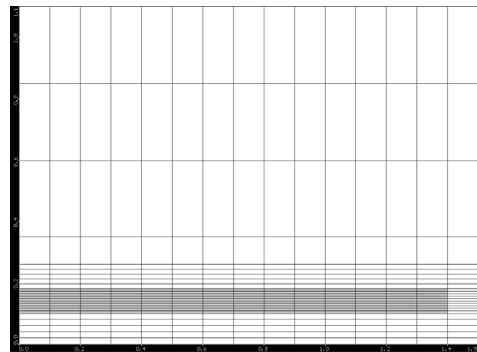


Fig. 3. MODFLOW modeling grid configuration of lab scale experiment (y-z)

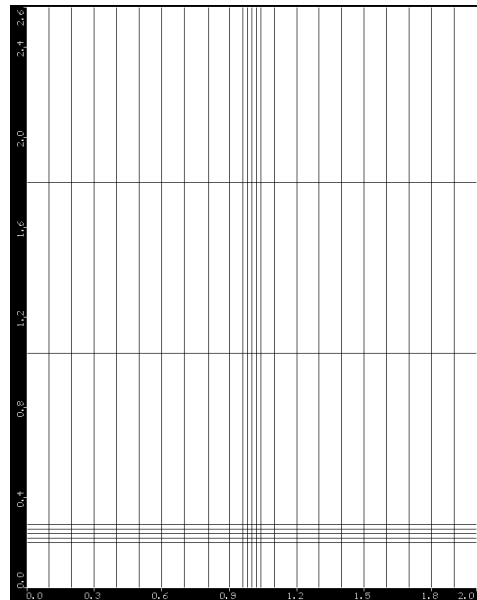


Fig. 4. MODFLOW modeling grid configuration of sample device experiment (x-z)

조밀격자로 구성하여 나타냈다. 소규모의 실험 장치를 모사한 모델링과 동일하게 집수관에서 배수되는 유량은 Zone Budget Package를 이용하여 나타냈다.

3. 연구결과

3.1 소규모 하상여과 실험 결과

Figs. 5-8은 4가지 조건에 따른 탁도 저감 실험결과이고,

측정된 결과 값을 효율적으로 나타내기 위해 캔들차트로 구성하였다. 차트의 큰 사각형은 탁도의 분포를 상위 25%값에서 하위 25%까지의 값을 나타내며 가운데의 경계면은 중간 값을 나타낸다. 얇은 막대는 측정된 값의 최대값과 최소값을 나타내고 있다. 실험결과 Case 4번인 본래 설계기준에서 입경의 25%인 조건에서 저감 효율이 65.9%로 가장 높게 나타났다. 소규모의 실험에서는 여과 재료의 두께가 0.75 m로 제한되어 탁도 저감 효율은 낮게 나타났다. 소규모의 실험 특성상 다양한 조건에 대해서 빠른 시일 내에 수행할 수 있었고, 각각의

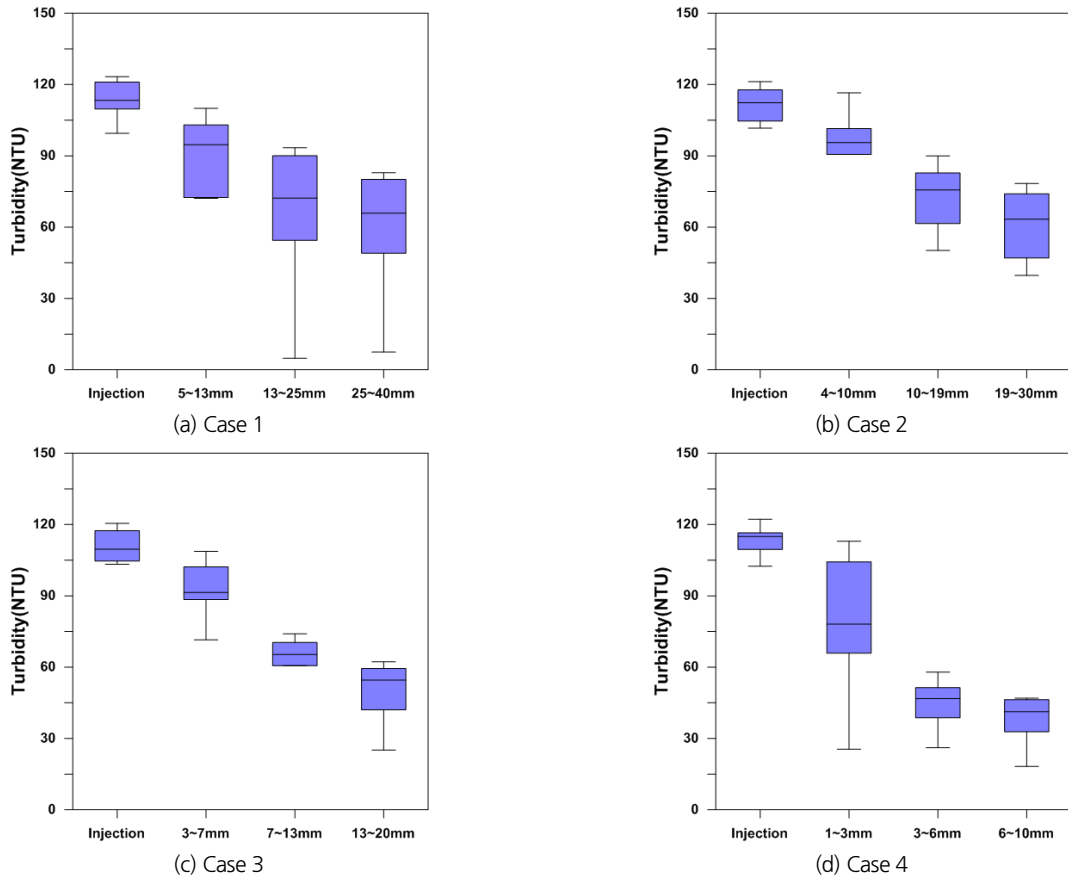


Fig. 5. Turbidity reduction effectiveness

Table 2. Result of lab scale experiment

Observation point	Case 1		Case 2		Case 3		Case 4	
	Turbidity (NTU)	SS (mg/L)	Turbidity (NTU)	SS (mg/L)	Turbidity (NTU)	SS (mg/L)	Turbidity (NTU)	SS (mg/L)
Inflow	113	79	112	78	111	77	113	79
Top layer	85	59	89	61	88	61	78	53
Middle layer	67	46	67	46	60	41	44	29
Outflow	59	40	57	38	47	31	39	25
Reduction effectiveness (%)	47.9		48.8		52.3		65.9	

탁도 및 부유물 저감 효과에 대해서 나타낼 수 있었다. Sung *et al.* (2003)은 하상여과 이용 시 미생물 성장에 의한 투수계수 변화를 확인하기 위한 실험을 통해 여과 재료 입경이 0.355~0.5 mm일 때 투수계수 변화량이 크게 나타났으며, 2~2.5 mm일 때 투수계수 변화량이 가장 작게 나타났다. 하상 여과의 생산수는 상수원수로 사용될 수 있으며 수질 측면을

고려했을 때 최상부 여과 재료층 입경이 1~3 mm인 Case 4를 견본 장치에 적용하였다.

3.2 견본장치 하상여과 실험 결과

Table 3은 견본 장치 운영 결과이며, 주입원수의 부유물질 (SS)은 97.0~241.0 mg/L로 평균 153.6 mg/L을 공급하였으며,

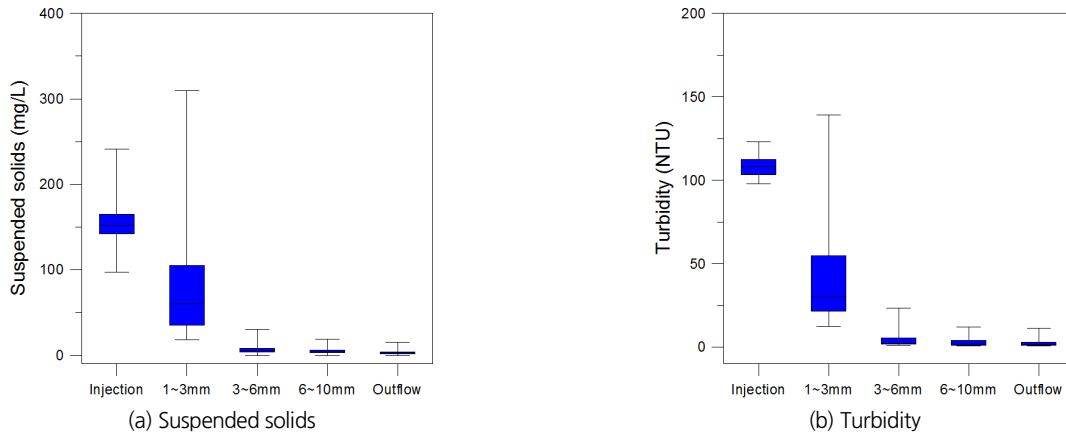


Fig. 6. Sample device of suspended solids and turbidity reduction effectiveness

Table 3. Result of sample device reduction effectiveness

Observation value	Inflow		Top layer (1~3 mm)		Median layer (3~6 mm)		Bottom layer (6~10 mm)		Outflow	
	SS (mg/L)	Turbidity (NTU)	SS (mg/L)	Turbidity (NTU)	SS (mg/L)	Turbidity (NTU)	SS (mg/L)	Turbidity (NTU)	SS (mg/L)	Turbidity (NTU)
Minimum	97.0	98.0	18.0	12.6	0.0	1.1	0.0	0.8	0.0	0.7
Maximum	241.0	123.0	310.0	139.0	30.0	23.3	19.0	12.0	15.0	11.2
Average	153.6	108.4	77.0	42.1	6.8	4.1	5.0	3.2	3.6	2.5
Reduction effectiveness (%)	-	-	49.9	61.1	95.6	96.2	96.7	97.1	97.7	97.7

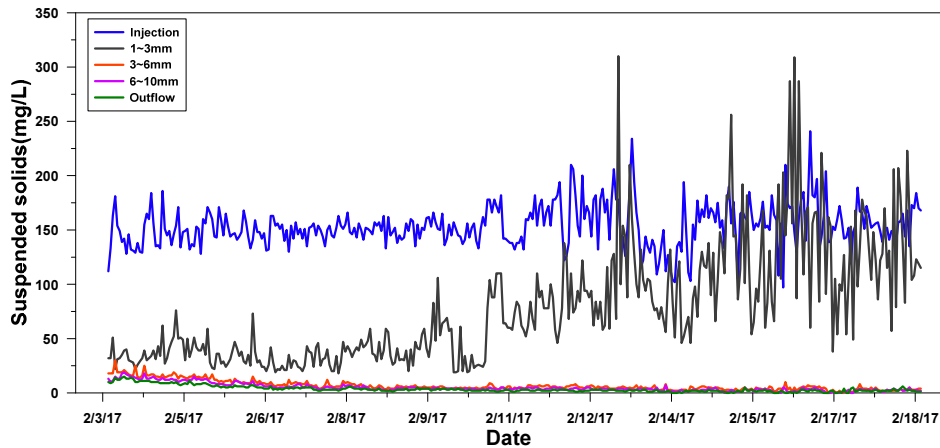


Fig. 7. Suspended solid fluctuation of sample device

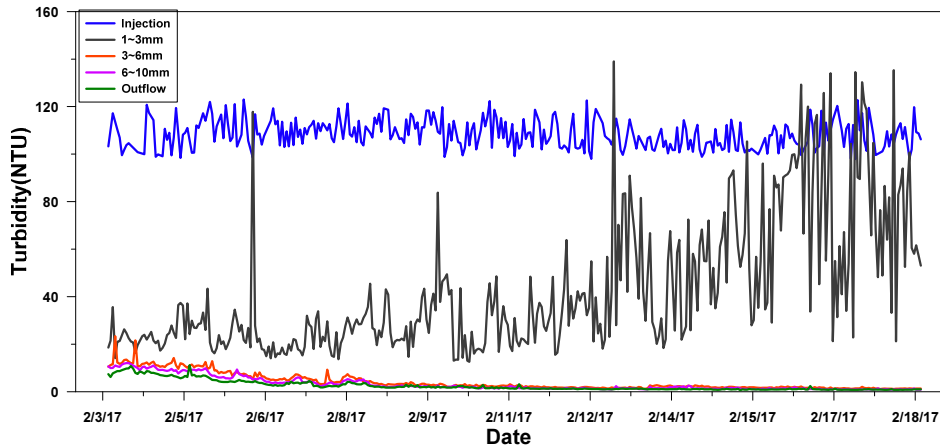


Fig. 8. Turbidity fluctuation of sample device

여과 재료층을 통과한 유출수의 부유물질은 0.0~15.0 mg/L로 평균 3.6 mg/L을 나타냈다. 주입원수의 탁도는 98.0~123.0 NTU로 평균 108.4 NTU를 공급하였으며, 여과 재료층을 통과한 유출수의 탁도는 0.7~11.2 NTU로 평균 2.5 NTU를 나타냈다. 부유물질과 탁도의 저감효율은 97.7%로 나타났으며, 치환여과 재료에 따른 부유물질과 탁도의 제거 효과가 탁월한 것으로 판단된다. Figs. 7 and 8은 탁도 및 부유물질 변화 그래프인데 상부 여과 재료층의 탁도와 부유물질은 시간이 지날수록 증가함을 알 수 있고, 다른 여과 재료층에서는 다소 감소하는 경향을 보인다. 즉, 부유물질 및 탁도를 유발하는 물질들은 치환여과 재료 중 최상부 층에서 대부분 제거가 되는 것을 알 수 있다. 유출수의 부유물질은 하천수 수질환경기준인 25 mg/L보다 매우 낮은 3.6 mg/L을 보여 방류수 수질기준을 만족하는 것으로 나타났다.

3.3 MODFLOW를 이용한 투수계수 및 전도계수 추정

3.3.1 소규모 실험장치의 단일여과 재료 실험 결과를 이용한 투수계수 추정

소규모의 실험장치를 통한 실험을 진행하는데 있어서 투수계수를 추정하기 위해서 단일 여과 재료 구성으로 하여 진

행하였다. 단일 여과 재료의 높이는 0.75 m 구성하였고, 탁도가 없을 때와 30~50 NTU로 나누어 진행하였다. 각각의 유량을 측정하고 MODFLOW를 이용하여 계산된 유량 값과 비교하여 투수계수를 추정하였다.

하상여과에서 투수계수를 추정하는데 탁도의 영향을 무시한 일반적인 투수계수는 취수량을 산정하는데 있어서 많은 오차가 발생할 수 있다. 이를 위해 공급 원수의 수질이 0 NTU일 때와 탁도가 100~120 NTU일 때로 나누어 각각 Case A, B로 하천수의 탁도를 적용하여 측정된 유량 값을 사용하였다. Table 4는 탁도 0 NTU일 때와 100~120 NTU일 때의 관측된 유량과 MODFLOW로 계산된 유량 값이다. 0 NTU일 때의 계산된 유량 값과 관측된 유량의 절대 오차 평균은 2.80E-07 m³/s로 나타났으며, 입경이 작을수록 투수계수는 작아졌다. 100~120 NTU일 때의 계산된 유량 값과 관측된 유량의 오차 평균은 3.17E-07 m³/s로 투수계수에 대해서 신뢰도 있는 모델링을 구성하였다.

3.3.2 견본 장치 실험 결과를 이용한 취수량 산정

Table 5는 MODFLOW를 이용하여 단일여과 재료 구성을 통해 추정된 탁도가 0 NTU일 때 추정된 투수계수를 사용한

Table 4. Results of estimation hydraulic conductivity using MODFLOW

Case	NTU	Grain size (mm)	Observed flow rate (m ³ /s)	Calculated flow rate (m ³ /s)	Flow rate absolute error (m ³ /s)	Estimated hydraulic conductivity (cm/s)
A	0	1~3	6.72E-04	6.72E-04	3.98E-07	0.0660
		3~6	7.00E-04	7.00E-04	3.30E-07	0.0687
		6~10	7.40E-04	7.40E-04	1.12E-07	0.0727
B	100~120	1~3	4.86E-04	4.86E-04	3.72E-07	0.0476
		3~6	6.60E-04	6.60E-04	9.60E-08	0.0646
		6~10	7.06E-04	7.06E-04	4.83E-07	0.0692

Table 5. Results of flow rate of intake pipe with functional screen using MODFLOW

Case	Observed flow rate (m ³ /s)	Calculated flow rate (m ³ /s)	Flow rate error (m ³ /s)	Flow rate error percentage (%)
A	4.34E-04	6.08E-04	1.74E-04	39.96
B		4.76E-04	4.12E-05	9.49

Case A의 경우에 계산된 유량과, 100~120 NTU 일 때의 추정된 투수계수를 적용한 Case B의 경우에 계산된 유량을 실제 견본 장치 실험에서 측정된 유량 값과 비교한 결과이다. Case A인 0 NTU일 때의 추정된 투수계수를 적용한 결과에서는 계산된 유량의 오차 범위는 39.96%로 크게 나타났으며, 실제 유량보다 많게 나타났다. Case B인 100~120 NTU일 때 추정된 투수계수를 적용한 결과에서는 계산된 유량의 오차 범위가 10% 미만으로 나타났으며, 측정된 유량보다 많은 값을 나타내고 있다. 이는 실제 관측된 견본 장치에서는 부유물질 등에 의한 투수계수 저하 현상이 더욱 심한 것으로 판단되며, 여과 재료 각 층의 유출수의 관측된 탁도를 고려하면 상부지질층에서의 투수계수의 저하 현상이 주요 원인으로 분석된다.

4. 결론

가능성 스크린이 부착된 집수관의 취수량 분석은 네 단계로 나누어 진행되었다. 첫 번째 단계에서는 소규모 실험 장치를 구성하고 혼합 여과 재료층을 구성하여 각각의 탁도를 측정하여 수질에 대한 기준을 만족하도록 실증 플랜트 여과 재료의 구성 방법을 결정하였다. 탁도 측정 결과 탁도의 저감 효율이 가장 높은 것은 Case 4번으로 저감 효율은 65.9%로 나타났으나 소규모 실험 장치의 특성상 여과 재료의 두께가 0.75 m로 제한되어 탁도 저감 효율이 낮게 나타나는 것으로 판단된다. 여과 재료층의 입경이 작을수록 탁도 저감 효율이 높은 것은 당연한 결과이지만, 탁도 및 부유물 저감 효율을 높이기 위해 입경을 작게 할 경우 투수계수가 낮아져 체류시간이 길어진다. 하상여과의 생산수는 상수원수로 사용될 수 있으며 이를 고려하였을 때 수질 측면에서 부유물질 및 탁도 유발물질의 저감효율이 가장 높은 Case 4를 견본 장치에 적용하였다. 두 번째 단계에서는 견본 장치를 구성하여 가능성 스크린이 장착된 집수관에서의 유량과 탁도를 측정하였다. 또한 여과 재료를 구성한 각각의 층에서 탁도를 측정하여 여과 재료에 따른 부유물질 및 탁도의 저감효과를 분석하였다. 탁도 측정 결과 소규모 실험 장치의 실험보다 효율은 매우 높아져 가능성 스크린이 장착된 집수관에서 나오는 생산수에서는 부유물질

및 탁도 유발물질의 97.7%가 저감되는 것으로 나타났다. 시간이 지남에 따라 상부 여과 재료층의 탁도와 부유물질이 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 여과 재료의 최상부 층에서 부유물질 및 탁도를 유발하는 물질이 제거되는 것으로 판단된다. 세 번째 단계에서 소규모 실험 장치의 실험에서 단일 여과 재료로 구성하여 탁도의 상태를 달리하여 유량을 측정하고, MODFLOW를 이용하여 투수계수를 추정하였다. 탁도의 상태를 달리하였을 때 유량은 0 NTU였을 때 평균 7.04E-04 m³/s로 나타났으며, 100~120 NTU였을 때 평균 6.17 E-04 m³/s로 8.67E-05 m³/s 적게 나타났다. 이 중 투수계수의 차이가 가장 크게 나타난 여과 재료는 1~3 mm 여과 재료로 1.86E-05 m³/s 차이가 나타났으며, 이는 견본 장치 탁도 측정결과에서도 나타나듯이 부유물질 및 탁도 유발 물질의 제거로 인해 투수계수의 차이가 가장 큰 것으로 보여진다. 마지막으로 MODFLOW를 이용하여 견본 장치를 구성하고, 추정된 투수계수를 적용하여 측정된 유량과 계산된 유량을 비교하였다. 0 NTU일 때의 투수계수 적용 결과 실제 관측치에 비해 39.96% 높게 나타났으며 실제 관측된 유량과 많은 차이가 나타났다. 이에 비해 100~120 NTU일 때의 투수계수를 적용한 결과에서는 유량의 차이가 9.49% 높게 나타났다. 수치 모델을 구축하였을 때 실제 관측 유량에 비해 크게 나타나는 경향을 보이고 있는데, 이는 실제 하천 규모의 견본 장치에서 최상부층 여과 재료에서 부유물질 및 탁도 유발 물질의 제거를 함에 있어 투수계수 저하 현상이 더욱 크게 나타나는 것으로 보여진다. 또한 여과 재료의 두께에 따른 차이가 발생하는 것으로 판단되며 실제 현장에 적용하기 위해서는 부유물질 및 탁도 유발 물질에 대한 투수계수 저하를 더욱 크게 적용해야 할 것이다.

본 연구를 진행함에 있어 견본 장치의 가동시간은 360시간이었다. 이후 장기적으로 실험을 진행하여 각 여과 재료 층의 투수계수 등의 변동 특성 등을 파악하고, 다른 종류의 여과 재료를 적용하여 여과 재료의 변동 특성을 확인한다면 개작식 하상여과를 진행함에 있어 양질의 생산수를 정량적으로 공급할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술사업화 지원사업 연구 지원비 (15TBIP-C09)를 지원받아 수행된 연구입니다.

References

- Baumgarten, B., Jährig, J., Reemtsma, T., and Jekel, M. (2011). "Long term laboratory column experiments to simulate bank filtration: factors controlling removal of sulfamethoxazole." *Journal of Water Research*, Vol. 45, No. 1, pp. 211-220.
- Eckert, P., and Irmscher, R. (2006). "Over 130 years of experience with riverbank filtration in Düsseldorf, Germany." *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, Vol. 55, No. 4, pp. 283-291.
- Grischek, T., Schoenheinz, D., Worch, E., and Hiscock, K. M. (2002). "Bank filtration in Europe - an overview of aquifer conditions and hydraulic controls, In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability." *Dillon, P. (ed.) Swets Zeitlinger, Balkema, Lisse*, pp. 485-488.
- Harbaugh, A. W., and McDonald, M. G. (1996). *User's documentation for MODFLOW-96. An update to the U.S. geological survey modular finite-difference ground-water flow model*. Open File Report 96-485, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, U.S.A.
- Henzler, A. F., Greskowiak, J., and Massmann, G. (2014). "Modeling the fate of organic micropollutants during river bank filtration (Berlin, Germany)." *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 156, pp. 78-92.
- Im, H. C., and Choi, H. C. (2011). "Estimation of pumping rate through modeling in open-cut riverbed filtration application area." *Proceeding of Korean Society on Water Environment & Korean Society of Water & Wastewater*, Il-San, Korea, pp. 419-420 (in Korean).
- Kadlec, R. H. (1997). "An autotrophic wetland phosphorus model." *Ecological Engineering*, Vol. 8, pp. 145-172.
- Schafer, D. C. (2004). "Hydraulic analysis and modeling of riverbank filtration for Louisville water company" *International Workshop on Riverbank/bed Filtration*, organized by KIST (Green Korea 21), COEX.
- Schubert, J. (2002). "Hydraulic aspects of riverbank filtration-field studies." *Journal of Hydrology*, Vol. 266, pp. 145-161.
- Sung, C. D., Ahn, K. H., Lee, Y. H., Kong, I. C., and Kim, S. H. (2003). "A study on the water quality improvement through river bed filtration - model development and parameter determination." *Journal of Korea Social Environment Engineering*, Vol. 25, No. 4, pp. 486-494
- Ulrich, C., Hubbard, S. S., Florsheim, J., Rosenberry, D., Borglin, S., Trotta, M., and Seymour, D. (2015). "Riverbed clogging associated with a California riverbank filtration system: an assessment of mechanisms and monitoring approaches." *Journal of Hydrology*, Vol. 529, pp. 1740-1753.
- Yang, J. S., Kim, I. H., and Jeong, J. H. (2016). "A study on the application of modified hydraulic conductivity to consider turbid water for open-cut riverbed infiltration process: numerical modeling approach" *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 9, pp. 741-748 (in Korean).