



A study on the application of modified hydraulic conductivity to consider turbid water for open-cut riverbed infiltration process: numerical modeling approach

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: 16-063

Received: 18 July 2016; Revised: 9 August 2016; Accepted: 9 August 2016

Abstract

Laboratory scale model was constructed for open-cut riverbed infiltration experiment and four kinds of media were selected, medium sand, sand, volcanic rock, and gravel, for the experiment. Hydraulic conductivity for each medium and flow rate from the collecting pipe with functional screen were estimated from the experiment. Modified hydraulic conductivity scenarios considering turbid water (30~50 NTU) were applied in Visual MODFLOW modeling to analyze the effects of turbid water on the flow rate. Twenty-two scenarios were generated considering particles in turbid water and applied to each medium cases in MODFLOW modeling. The minimum error was occurred when the gravel medium had 20% less hydraulic conductivities for the third layer-depth from the top and clay particles in turbid water might play a role in adsorption process to the surface of volcanic rock (2~5 mm). For medium sand case the error was also quite small when the medium has 5% less hydraulic conductivities for the second layer-depth from the top.

Keywords: Hydraulic Conductivity, Turbidity, Open-cut riverbed Filtration, Visual MODFLOW

개착식 하상여과에서 탁수를 고려한 수정 투수계수 적용 연구: 수치모델링을 통한 접근

양정석^{a*} · 김일환^a · 정재훈^b

^a국민대학교 건설시스템공학부, ^b(주)웰텍

요 지

개착식 하상여과에 대해서 실험실 규모의 모형을 구축하고 중사, 왕사, 화산석, 자갈에 대한 단일 여재를 구성하였다. 실험을 통해 투수계수 및 하상 여과에 대한 취수량을 추정하고, 지하수 유동 모델링인 Visual MODFLOW를 통해 탁도 변화에 따라 수정된 투수계수를 적용하고 미치는 영향을 분석하였다. 각 여재마다 22개의 수정 투수계수 시나리오가 적용되었다. 전체 모델링에서 최소 오차는 화산석(2~5 mm)을 여재로 한 경우 상부에서부터 3개 지층에 대해서 20% 감소된 투수계수를 적용한 시나리오다. 이는 화산석의 특성상 탁도를 유발하는 황토가 여재에 흡착되어 상부에서 3번째 지층까지 영향을 미치는 것으로 추정되었다. 또한 입자의 크기가 작은 중사의 경우 5% 감소된 투수계수를 상부에서 두 번째 지층까지 적용한 시나리오에서도 작은 오차 값을 나타냈다.

핵심용어: 투수계수, 탁도, 개착식 하상여과, Visual MODFLOW

1. 서론

하천에서 취수원을 개발하는 방법은 하천수 및 댐건설 등의 직접취수 방법과 강변 여과수 개발, 하상 여과수 개발, 복류

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

수 개발 등의 간접취수 방안이 있다. 직접취수는 수량측면에서 이점을 갖고 있지만 수질이 불량할 경우 취수가 불가능하거나 취수원수를 정수하는데 많은 비용이 소요된다. 강변 여과수 개발과 하상 여과수 개발 방법은 지층의 구성으로 인해 물리, 화학적 여과, 흡착을 통해 자연 정화되어 양질의 취수원을 공급할 수 있다. 최근 상수원수 및 하천유지용수 등의 취수원을 개발하는데 있어서 수질측면을 고려하여 간접취수방식이 검토되고 있으나 수량 확보 측면에서의 불확실성과 유지관리상의 어려움 때문에 많은 시행착오가 발생한다. 다양한 지층으로 구성된 대수층에 대해서 강변 여과 혹은 하상 여과의 안정적인 수량 확보를 위해 다양한 연구가 진행되고 있다. 서유럽 및 미국 등의 선진 국가에서는 취수원의 다변화를 이루기 위해 19 세기 초부터 강변여과 방식을 도입하여 수자원을 공급하였다(Griseck et al., 2002). 강변여과의 역사가 오래되어 장기간 운용 시 금속산화물에 의한 관정 폐색현상 및 취수량이 감소되는 현상이 일어나고(Schubert, 2002), 강변여과에서 발생할 수 있는 수량과 수질에 대한 변화 예측을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다(Eckert and Irmischer, 2006). 또한 최근 오염물로 인한 취수원의 오염으로 강변여과 및 하상여과를 진행함에 있어 유해물질의 저감 및 제거를 위한 연구가 활발히 진행 중에 있다(Baumgarten et al., 2011; Henzler et al., 2014).

국내에서는 서울 한강을 대상으로 강변여과의 적지 선정을 실시하고(Lee and Lee, 2008), 선정된 광나루를 대상으로 개발 가능량을 산정하였다(Lee et al., 2008). 경남 창원시 강변여과수 취수장 주변에 대해 수리지질 특성에 따른 수변의 충적층의 지하수 변동 특성을 파악하고(Cheong et al., 2008), 취수 가능량에 대해서 평가하여 정량적인 분석을 실시하였다(Chung et al., 2004). 또한 모델링을 통해 강변여과에 따른 지하수 유동 분석을 실시하였다(Hamm et al., 2005). Kim and Cheong (2009)는 강변 여과를 하는 과정에서 효율적인 취수를 위해 수평 방사형 집수정에 대해서 FEFLOW를 통해 지하수 개발 가능량의 민감도 분석을 실시하였으며, Kim et al. (2014)는 방사형 집수정 주변의 지질특성을 조사하여 입도분포에 따른 투수계수를 산정하고 투수계수와 취수량의 상관관계를 분석하였다.

간접 취수원 개발의 단점인 안정적인 수량 확보를 해결하기 위해, 하상을 개작하여 불균질한 대수층을 치환하고 스크린을 통해 간접취수원을 개발하는 하상여과 방식을 통해 보다 안정적이고 지속가능한 수량 확보 및 유지관리가 가능하다. Im and Choi (2009)는 방사형 집수관에 대해서 MODFLOW의 Drain Package를 통해 개작식 하상여과 적용에 따른 취수량을 산정하였다.

개작식 하상여과를 하는 과정에서 하상에 대해서 불균질한 대수층을 치환하고 스크린을 통해 취수를 하는 과정에서 많은 시행착오가 발생한다. 이는 대수층을 치환하여 측정된 투수계수를 적용하여 취수를 진행하였을 때 하천수의 많은 오염물 및 탁도에 따른 미세입자 등으로 인해 투수계수가 낮아지는 현상이 발생하기 때문이다. 국외에서는 미국의 북부 캘리포니아의 Wohler 지역의 강변 여과 시스템의 폐색 현상에 대해서 하상 관측을 통해 접근하여 생물학적 반응에 역할이 큰 것으로 판단하였고(Ulrich et al., 2015), 국내에서는 Kim et al. (2005)는 하상여과 모형을 통해 하상도양 내부에서 미생물이 성장함에 따른 투수계수 감소 현상에 대해서 연구를 진행하였다. 하지만 미생물에 생장에 대한 투수계수 감소 현상 이외에도 하천수의 미립자에 의한 투수계수의 감소현상이 발생한다. 미생물 혹은 생물학적 반응으로 미세입자의 증가가 하상여과 시스템을 가동하는데 있어서 폐색현상을 나타내고 있다. 지역적인 특성에 따라 미생물 혹은 생물학적 반응으로 인한 폐색뿐만 아니라 하천수의 미세입자 황토 등의 탁도를 유발하는 입자로 인한 침전 또한 하상여과 시스템의 목표 수량을 방해할 수 있는 중요한 원인이 될 수 있다.

이에 본 연구에서는 개작식 하상여과에 대해서 실험실 규모의 모형을 구성하고 단일 지층으로 구성된 실험을 통해 투수계수 및 하상 여과에 대한 취수량을 추정하고, 지하수 유동 모델링인 Visual MODFLOW를 통해 탁도 변화에 따라 수정된 투수계수를 적용하고 미치는 영향을 분석한다. 최종적으로 현실성을 고려하여 탁도에 대해서 30~50 NTU 범위 내에서 취수원을 공급하고 다양한 시나리오의 수정된 투수계수를 적용하여 취수량의 정량적인 분석을 진행할 수 있도록 한다.

2. 연구방법

수정된 투수계수를 추정하기 위해서 실험실 규모의 하상 여과 실험 장치를 구성하고 청정원수를 공급하여 취수량을 측정한다. 이후 측정된 취수량을 통해 실험실 규모의 하상여과 실험을 Visual MODFLOW를 통해 구성하고 투수계수를 추정한다. 탁도가 높아짐에 따른 투수계수의 수정을 위해 실험 장치에 현실성을 고려한 30~50 NTU의 원수를 공급하고 취수량을 측정 후 모델링을 통해 다양한 수정 투수계수를 적용하여 측정된 취수량과 비교를 실시한다.

2.1 실험장치

실험에 사용된 장치는 6개 층으로 구성되어 있으며 아크릴



Fig. 1. Appearance of riverbed filtration

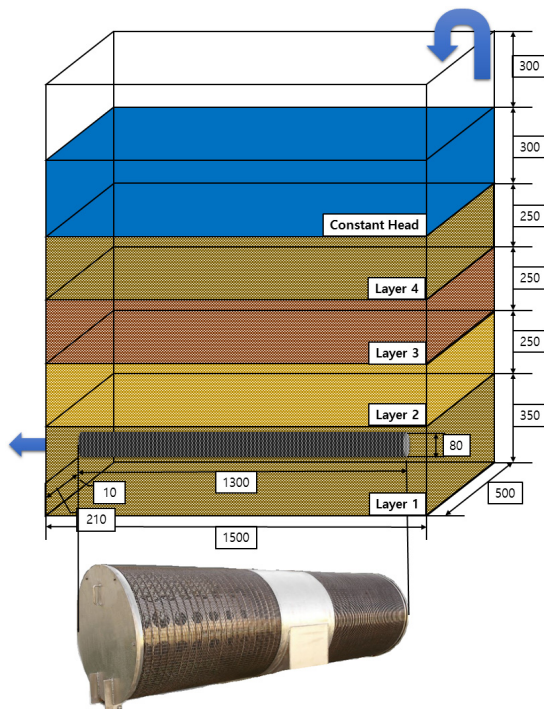


Fig. 2. Schematization of riverbed filtration & Intake pipe with functional screen (Unit: mm)

로 구성되어 있다. 총 6개의 층 구성 중 하부에서 4번째 지층까지는 여재를 채워 넣기 위해 구성하였으며, 상부의 두개 층은 지층 위의 수두를 유지하기 위해 구성하였다. 일정한 수두를 유지하기 위해 1.4 m의 높이를 기준으로 하여 펌프를 통해 지속적으로 탁수를 공급하였다. 현실성을 고려하기 위해 축소 모형으로 실험하였으며 상수도 시설기준에 명시되어 있는 데로 필터층 안쪽에서 바깥쪽으로 굵은 자갈(입경 4~5 cm), 중 자갈(입경 3~4 cm), 잔자갈(입경 2~3 cm)의 순서로 각각의

두께 50 cm 이상으로 충전하는 것으로 되어 있다. 제일 하부의 지층 구조물은 기능성 스크린이 장착된 집수관이 위치해 있으며 $1,500 \times 500 \times 30$ mm로 되어 있으며 기능성 스크린이 장착된 집수관의 내경은 80 mm로 되어있고, 그 위의 3개 지층 구조물은 높이가 250 mm로 되어 있으며 상부 수조는 높이가 300 mm로 되어 있어 하상여과를 구현하였다. Fig. 1은 실험장치의 실제 모습이고, Fig. 2는 실험장치의 모식도 및 기능성 스크린이 부착된 집수관의 모습이다. 30~50 NTU의 탁도를 유지하기 위해 황토를 사용하였으며 실험에 쓰인 여재로는 자갈(입경 5~10 mm), 왕사(입경 2~5 mm), 화산석(입경 2~5 mm), 중사(1~2 mm)를 사용하였다. 모든 여재는 자연 상태의 골재를 사용하였으며, 왕사와 화산석은 입경은 동일한 범위로 구성하였으나 왕사는 일반적인 강변의 모래로 이뤄져 있고, 화산석은 육안으로 확인할 수는 없으나 미세한 구멍으로 인해 같은 양의 왕사와 비교하여 가볍고 다공성의 매질 특성을 가지고 있다. 각각의 여재에 대해서는 단일지층을 구성하여 실험을 진행하였다.

2.2 Visual MODFLOW

지하수 전문 유동 모델인 Visual MODFLOW는 유한차분법에 기초하고 있으며 Harbaugh and McDonald (1996)은 강변여과에서 수직정과 수평집수정의 취수율을 예측하는 연구를 진행하였으며, Schafer (2004)는 미국의 켄터키주에 강변여과정을 설계할 때 MODFLOW를 이용하였다. 본 연구에서는 실험 결과로 측정된 취수량을 통해 실험장치에 사용된 여재의 투수계수를 추정하는데 사용하였으며, 탁도가 있는 원수를 공급하였을 때 수정된 투수계수에 대해서 적용하기 위해 이용하였다. 실험실 규모의 모델은 실험 장치와 동일 크기로 적용하였으며 상부에서 공급되는 하천수는 1.4 m로 일정 수

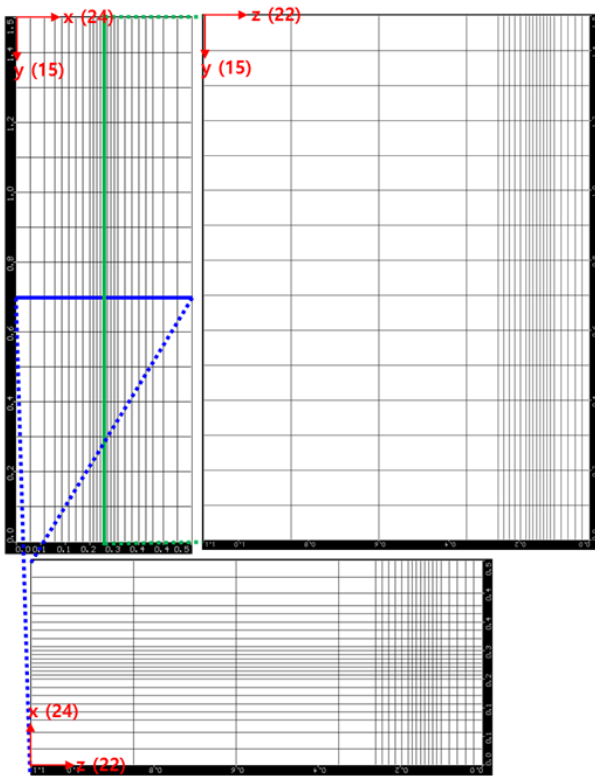


Fig. 3. Visual MODFLOW modeling grid configuration

위를 지속적으로 유지하기 때문에 고정 수두 경계 조건을 적용하였다. 기능성 스크린이 장착된 집수관에 대해서는 배수 경계 조건을 사용하였으며, 여기에 사용된 전도계수는 실험을 통해 지정된 값을 적용하였고, 값은 $1.04\sim 2.73 \text{ m}^2/\text{s}$ 를 이용

하였다. 또한 기능성 스크린이 장착된 집수관의 지층에 대해서는 $5\sim 15 \text{ cm/s}$ 의 투수계수를 부여하여 빈 공간에서의 물의 흐름을 모사할 수 있도록 구성하였다. 실험 장치를 토대로 4개 지층으로 구성하였으며 기능성 스크린이 장착된 집수관을 모식하기 위해 주변으로 조밀격자를 구성하였다. Fig. 3은 집수관의 위치 및 조밀격자의 구성을 나타내고 있으며 각각의 축의 팔호 안에 숫자는 격자의 개수이다. 각각 x축으로 24개, y축으로 15개, z축으로 22개로 구성하여 총 7920개의 격자로 구성되어 있다. 기능성 스크린이 장착된 집수관을 통해 배수되는 유량은 MODFLOW 내의 Zone Budget Package를 이용하여 산출되었다. 배수되는 격자에 Zone Budget Package를 적용하여 격자에서 유출량을 파악하였다.

2.3 수정된 투수계수 모의 시나리오

탁도로 인해 감소된 투수계수를 적용하기 위해 총 22개의 시나리오를 구성하였으며 단일지층으로 구성된 여재에 대해서 중사, 왕사, 화산석, 자갈에 대해서 각각 적용하였다. 추정된 투수계수의 20%를 감소시킨 80% 값까지 적용해본 결과 투수계수의 차이가 심하게 나옴과 측정값과 비교하여 큰 오차가 발생하였다. 본 연구에서는 추정된 투수계수의 80%값을 한계 값으로 지정하였으며, 100%의 추정된 값에서 한계 값인 80%까지 투수계수를 등간격으로 5개로 나누어 구성하였다. 이를 시나리오 구성에서 A-D까지로 적용 시켰다. A는 추정된 투수계수 값에서 5% 감소된 95%의 값을 입력하였고, B는 90%, C는 85%, D는 80%까지 감소시켰다. 미세입자로 인한 투수계수 감소현상은 강바닥, 상부 지층에서부터 일어나기

Table 1. Hydraulic conductivity scenario

Scenario	A-1	A-2	A-3	A-4	B-1	B-2	B-3	B-4
Layer 1	$k \times 0.95$	$k \times 0.95$	$k \times 0.95$	$k \times 0.95$	$k \times 0.9$	$k \times 0.9$	$k \times 0.9$	$k \times 0.9$
Layer 2	k	$k \times 0.95$	$k \times 0.95$	$k \times 0.95$	k	$k \times 0.9$	$k \times 0.9$	$k \times 0.9$
Layer 3	k	k	$k \times 0.95$	$k \times 0.95$	k	k	$k \times 0.9$	$k \times 0.9$
Layer 4	k	k	k	$k \times 0.95$	k	k	k	$k \times 0.9$
Scenario	C-1	C-2	C-3	C-4	D-1	D-2	D-3	D-4
Layer 1	$k \times 0.85$	$k \times 0.85$	$k \times 0.85$	$k \times 0.85$	$k \times 0.8$	$k \times 0.8$	$k \times 0.8$	$k \times 0.8$
Layer 2	k	$k \times 0.85$	$k \times 0.85$	$k \times 0.85$	k	$k \times 0.8$	$k \times 0.8$	$k \times 0.8$
Layer 3	k	k	$k \times 0.85$	$k \times 0.85$	k	k	$k \times 0.8$	$k \times 0.8$
Layer 4	k	k	k	$k \times 0.85$	k	k	k	$k \times 0.8$
Scenario	M-a	M-b	M-c	M-d	M-e	M-f		
Layer 1	$k \times 0.9$	$k \times 0.85$	$k \times 0.8$	$k \times 0.8$	$k \times 0.85$	$k \times 0.8$		
Layer 2	$k \times 0.95$	$k \times 0.9$	$k \times 0.85$	$k \times 0.85$	$k \times 0.9$	$k \times 0.85$		
Layer 3	k	k	k	$k \times 0.9$	$k \times 0.95$	$k \times 0.9$		
Layer 4	k	k	k	k	k	$k \times 0.95$		

때문에 감소현상의 시작점 기준은 상부 지층에서 하부지층으로 내려가는 시나리오를 구성하였다. 이를 A-D까지의 시나리오에서는 뒤의 숫자로 1-4까지 부여하였으며 상부에서부터 1-4번 지층까지의 영향범위를 나타냈다. A-1번 시나리오는 추정된 투수계수 값에서 95%의 값을 사용하였으며, 상부 첫 번째 지층까지의 영향을 검토하기 위해 1번 지층에만 95%의 투수계수를 적용하였고, D-4번 시나리오는 80%의 투수계수 값에 대해서 상부인 1번 지층에서 하부인 4번 지층까지 전체 지층에 적용하였다. 또한 여재의 깊이에 따라 상부에 오염물 혹은 미세입자들이 많이 여과되어 투수계수가 감소되고 하부로 내려올수록 탁도에 영향을 적게 받을 수 있는 시나리오에 대한 구성을 진행하였다. 이를 M에 대한 시나리오로 구성하였으며, 각 조합에 따라 a-f 로 지정하였다. 여기에서 혼합된 투수계수 감소 조건으로 상부의 투수계수 감소가 제일 크게 설정하고 점진적으로 감소폭이 줄어드는 시나리오를 구성하였다. M의 시나리오에서 구성된 80~95%까지의 투수계수는 탁도로 인한 투수계수 감소 효과가 상부의 지층보다는 하부의 지층이 덜 영향을 받을 것이라는 가정 하에 구성하였다. M-a 시나리오는 상부 1번 지층에서는 90%의 투수계수 값을 입력하고, 2번 지층에서는 1번 지층보다는 덜 영향을 받는 95%의 투수계수 값을 적용하였다. M-f는 1번 지층에서 4번

지층까지 모두 탁도의 영향을 받는 시나리오로 1번 지층에서는 80%의 감소된 투수계수 값을 적용하고, 각 지층마다 5%씩 증가하는 85, 90, 95%의 투수계수에 대해서 2, 3, 4번 지층에 입력하였다. Table 1은 시나리오 별로 각 여재 층에 적용한 투수계수 값을 나타내었다.

3. 연구결과

3.1 실험실 규모 하상여과 실험 결과

Table 2는 하상여과 실험 장치치를 통해 측정된 유량 값이다. 실험 장치에 있는 유량계를 이용하여 측정하였으며 각 실험마다 4~5시간의 실험을 진행하였다. 이중 실험 시작 후 3시간 이후 1시간의 측정을 통해 평균적인 유량 값을 이용하였다. 자갈이 가장 큰 값을 나타내고 있으며 중사가 입경은 작으나 투수계수는 높게 나타났다. 탁도가 있는 원수에서 상대적으로 유량 값은 작게 나타났으며 가장 크게 차이가 나는 여재는 화산석으로 $1.05\text{E-}04\text{ m}^3/\text{s}$ 의 차이를 보였다. 이는 화산석의 특성상 다공성 매질로 구성되어 있어 점토가 화산석 표면에 흡착되어 공극을 저하시켜 투수계수 감소 효과가 더욱 크게 나타났다(Kadlec, 1997). 공급원수의 탁도가 30~50 NTU인

Table 2. Riverbed experiment configuration

Filter Media		Grain size (mm)	Flow rate (m^3/s)	Outfall turbidity (NTU)
0 NTU	Medium Sand	1-2	7.15E-04	0.5
	Sand	2-5	7.18E-04	5.2
	Volcanic rock	2-5	7.30E-04	1.6
	Gravel	5-10	7.72E-04	2.0
30 – 50 NTU	Medium Sand	1-2	7.02E-04	1.7
	Sand	2-5	6.59E-04	11.5
	Volcanic rock	2-5	6.25E-04	6.8
	Gravel	5-10	7.05E-04	9.6

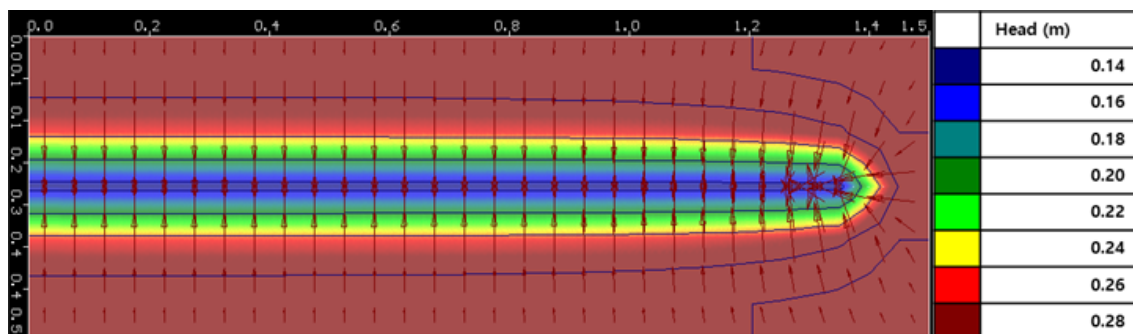


Fig. 4. MODFLOW results x-y axis (Gravel $k=0.0783\text{ m/s}$, 0 NTU)

반면 유출수의 탁도는 모두 감소하여 나타나 여과의 기능을 수행하고 있음을 확인하였다. 반면에 탁도가 0인 공급원수를 집어넣어도 여재에 섞인 불순물로 인해 실험과정에서 탁도가 증가한 것으로 나타났다.

3.2 MODFLOW 모델링 결과

MODFLOW를 통해 투수계수 값에 대해서 추정하였다. Fig. 4는 여재층에 자갈을 설치하였을 때를 모델링으로 구성

한 결과이다. x-y축에 대한 등수위 분포도를 나타냈으며 기능성 스크린이 장착된 집수관이 위치한 지층의 단면을 나타내었다.

3.2.1 투수계수 추정

투수계수를 추정하는데 있어서 실험을 통해 공급 원수의 수질은 탁도가 0 NTU일 때 측정된 유량 값을 사용하였고, Zone Budget Package를 통해 기능성 스크린이 장착된 집수관에서 유출되는 수량을 나타내었다. 오차 평균은 $1.23\text{E-}08\text{ m}^3/\text{s}$ 로 매

Table 3. Results of estimation hydraulic conductivity using MODFLOW (0 NTU)

Filter Media	Observed flow rate (m^3/s)	Calculated flow rate (m^3/s)	Error (m^3/s)	Hydraulic conductivity (cm/s)
Medium Sand	7.15135E-04	7.15115E-04	2.01E-08	0.07015
Sand	7.18643E-04	7.18654E-04	1.12E-08	0.07046
Volcanic rock	7.30048E-04	7.30056E-04	0.84E-08	0.07168
Gravel	7.72431E-04	7.72419E-04	1.22E-08	0.07583

Table 4. Results of modified hydraulic conductivity scenario (30-50 NTU)

Scenario	Medium Sand		Sand		Volcanic rock		Gravel	
	Observed flow rate		Observed flow rate		Observed flow rate		Observed flow rate	
	7.02E-04 (m^3/s)		6.59E-04 (m^3/s)		6.25E-04 (m^3/s)		7.05E-04 (m^3/s)	
	Calculated flow rate (m^3/s)	Error (m^3/s)	Calculated flow rate (m^3/s)	Error (m^3/s)	Calculated flow rate (m^3/s)	Error (m^3/s)	Calculated flow rate (m^3/s)	Error (m^3/s)
A-1	7.10E-04	8.20E-06	7.13E-04	5.45E-05	7.25E-04	1.00E-04	7.67E-04	6.22E-05
A-2	7.00E-04	1.70E-06	7.03E-04	4.45E-05	7.15E-04	9.03E-05	7.56E-04	5.16E-05
A-3	6.90E-04	1.12E-05	6.94E-04	3.50E-05	7.05E-04	8.05E-05	7.46E-04	4.12E-05
A-4	6.79E-04	2.22E-05	6.82E-04	2.37E-05	6.94E-04	6.92E-05	7.34E-04	2.91E-05
B-1	7.04E-04	2.90E-06	7.08E-04	4.91E-05	7.20E-04	9.49E-05	7.61E-04	5.65E-05
B-2	6.84E-04	1.74E-05	6.87E-04	2.87E-05	6.99E-04	7.41E-05	7.39E-04	3.45E-05
B-3	6.65E-04	3.64E-05	6.68E-04	9.60E-06	6.80E-04	5.48E-05	7.19E-04	1.41E-05
B-4	6.44E-04	5.79E-05	6.47E-04	1.20E-05	6.58E-04	3.29E-05	6.95E-04	9.30E-06
C-1	6.99E-04	3.00E-06	7.02E-04	4.32E-05	7.14E-04	8.89E-05	7.55E-04	5.02E-05
C-2	6.67E-04	3.43E-05	6.70E-04	1.18E-05	6.82E-04	5.69E-05	7.21E-04	1.64E-05
C-3	6.37E-04	6.44E-05	6.42E-04	1.65E-05	6.53E-04	2.81E-05	6.91E-04	1.40E-05
C-4	6.08E-04	9.34E-05	6.11E-04	4.77E-05	6.21E-04	3.50E-06	6.57E-04	4.76E-05
D-1	6.92E-04	9.50E-06	6.95E-04	3.67E-05	7.07E-04	8.23E-05	7.48E-04	4.31E-05
D-2	6.49E-04	5.22E-05	6.52E-04	6.20E-06	6.63E-04	3.86E-05	7.02E-04	3.00E-06
D-3	6.12E-04	8.94E-05	6.15E-04	4.36E-05	6.25E-04	6.00E-07	6.62E-04	4.32E-05
D-4	5.73E-04	1.29E-04	5.75E-04	8.34E-05	5.85E-04	3.99E-05	6.19E-04	8.61E-05
M-a	6.95E-04	6.90E-06	6.98E-04	3.93E-05	7.10E-04	8.49E-05	7.51E-04	4.59E-05
M-b	6.79E-04	2.30E-05	6.82E-04	2.31E-05	6.93E-04	6.85E-05	7.33E-04	2.86E-05
M-c	6.61E-04	4.02E-05	6.64E-04	5.90E-06	6.76E-04	5.09E-05	7.15E-04	1.00E-05
M-d	6.44E-04	5.78E-05	6.47E-04	1.19E-05	6.58E-04	3.29E-05	6.96E-04	9.10E-06
M-e	6.70E-04	3.19E-05	6.73E-04	1.41E-05	6.84E-04	5.94E-05	7.24E-04	1.89E-05
M-f	6.34E-04	6.74E-05	6.37E-04	2.18E-05	6.48E-04	2.30E-05	6.85E-04	1.98E-05

우 신뢰도 있는 모델링을 구성하였다. Table 3은 모델링 결과 값과 추정된 투수계수 값이다.

3.2.2 수정된 투수계수 시나리오 결과

Table 4는 수정된 투수계수 시나리오 적용 결과이다. 굵은 서체로 표시된 결과가 오차가 제일 작은 3가지 시나리오이다. 각각의 여재에 대해서 시나리오의 결과가 조금씩 다르게 나타나고 있다. 중사에 적용한 시나리오 결과 중 가장 오차가 작은 것은 A-2 시나리오인 95%의 투수계수로 상부에서 2번째 지층까지 적용한 것으로 나타났다. 이는 중사의 입자 크기가 작아 상부에서 모두 여과과정이 일어난 것으로 추정된다. 왕사는 상부에서부터 두 개의 지층에서 각각 80%, 85%를 적용한 M-c 시나리오의 결과 값이 가장 오차가 작은 것으로 나타났다. 이와 유사하게 상부의 두 개 지층에서 80%의 투수계수를 적용한 D-2 시나리오도 작은 오차 값을 나타냈다. 이는 중사보다 입경이 큰 왕사는 탁수에 대해서 2번째 지층까지 영향을 미치는 것으로 추정된다. 왕사와 비슷한 입경의 화산석은 왕사와는 달리 여재의 특성상 다공성 매질로 구성되어 있어 점토가 화산석 표면에 흡착되어 상부에서 세 번째 지층까지 영향을 미치는 D-3 시나리오에서 가장 작은 오차 값을 보여주었고 실험 결과 유출수의 탁도 값에서도 비슷한 입경의 왕사보다 낮은 탁도를 가진 유출수가 나타났다. 입경이 큰 자갈은 상부의 두 개 지층에서 20% 감소된 투수계수를 적용한 D-2 시나리오에서 가장 오차가 작게 나타났다. 이는 점토를 포함한 탁수가 두 번째 지층까지 영향을 미치는 것으로 추정된다.

4. 결론

본 연구에서는 개작식 하상여과 방식을 진행하는데 있어서 하천수의 오염으로 인해 치환된 여재층에 대해서 수정된 투수계수를 적용하여 취수량을 정량적으로 분석하기 위한 일환으로 실험실 규모의 모형을 구성하였다. 단일 지층으로 구성된 실험을 통해 투수계수 및 하상 여과에 대한 취수량을 추정하고, 지하수 유동 모델링인 Visual MODFLOW를 통해 탁수를 고려한 수정된 투수계수를 적용하고 이것이 유량 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 최종적으로 현실성을 고려하여 탁도 30~50 NTU 범위 내에서 취수원을 공급하고 다양한 시나리오의 수정된 투수계수를 적용하였다. 적용 결과 여재의 특성에 따라 수정되는 투수계수 시나리오가 다르게 적용되었다. 가장 오차가 작게 나타난 것은 화산석에 대해서 상부에서부터 3개 지층에 대해서 20% 감소된 투수계수를 적용한 시나

리오이다. 이는 화산석의 특성상 점토가 매질에 흡착되어 상부에서 3번째 지층까지 영향을 미치는 것으로 추정되었다. 또한 입자의 크기가 작은 중사는 5% 감소된 투수계수를 상부에서 두 번째 지층까지 적용한 시나리오에서 가장 작은 오차 값을 나타냈다. 이는 입자 크기가 작은만큼 공극 크기가 작은 중사가 상부에서 약간의 투수계수 감소현상을 일으키나 하부까지는 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 이 결과는 탁수를 고려한 수정된 투수계수 시나리오를 여재별 또는 지역별로 각각 적용하여 취수량을 산정하는데 있어서 더욱 신뢰할 수 있는 결과를 산출하는데 참고가 될 것으로 판단된다.

연구를 진행함에 있어 일단 단일여재로 구성하여 탁수를 고려한 투수계수 감소효과에 대해서 모의하였으나 향후 연구에서는 실험에 사용된 실험수조에 층별로 다양한 종류의 매질을 적용하여 현장 결과를 직접 예측 및 산정할 수 있도록 진행할 예정이다.

감사의 글

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

References

- Baumgarten, B., Jährgig, 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.
- Cheong, J.Y., Hamm, S.Y., Kim, H.S., Ko, E.J., Yang, K.H., and Lee, J.H. (2008). "Estimating hydraulic conductivity using grain-size analyses, aquifer tests, and numerical modeling in a riverside alluvial system in South Korea." *Hydrogeology Journal*, Vol. 16, No. 6, pp. 1129-1143.
- Chung, J.H., Park, J.H., Park, C.K., Yang, J.S., Kim, D.K., Jeong, K.C., Choi, Y.S., and Bu, S.A. (2004). "Calculation of the yield of bank filtration by using the horizontal collector wells." *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 14, No. 4, pp. 417-427 (in Korean).
- 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.
- Hamm, S.Y., Cheong, J.Y., Kim, H.S., Hahn, J.S., and Cha, Y.H. (2005). “Groundwater flow modeling in a riverbank filtration area, Daesan - Myeon, Changwon City.” *Economic and Environmental Geology*, Vol. 38, No. 1, pp. 67-78 (in Korean).
- 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.
- Kim, H.S., and Jeong, J.H. (2009). “Numerical analysis of horizontal collector well in riverbank filtration.” *Journal of Soil & Groundwater Environment*, Vol. 14, No. 1, pp. 1-10 (in Korean).
- Kim, S.H., Sohn, D.B., and Ahn, K.H. (2005). “A study on the reduction of hydraulic conductivity in a model system of riverbed filtration.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers B*, Vol. 25, No. 4B, pp. 301-308 (in Korean).
- Kim, T.H., Jeong, J.H., Kim, M., Oh, S.H., and Lee, J.S. (2014). “Analysis of the correlation between geological characteristics and water withdrawals in the laterals of radial collector well.” *Journal of Engineering Geology*, Vol. 24, No. 2, pp. 201-215 (in Korean).
- Lee, S.I., and Lee, S.S. (2008). “Site sustainable and development amount assessment for riverbank filtration in the Han river (I).” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 8, pp. 825-834 (in Korean).
- Lee, S.I., Yoo, S.Y., and Lee, S.S. (2008). “Site sustainable and development amount assessment for riverbank filtration in the Han river (II).” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 8, pp. 835-843 (in Korean).
- 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.
- 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.