

## 샌드담 채움재 결정을 위한 탁도 저감 효율 평가

김일환<sup>1</sup> · 안경환<sup>2</sup> · 김양아<sup>2</sup> · 장선우<sup>1</sup> · 김민규<sup>1</sup> · 정일문<sup>1,‡</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원

<sup>2</sup>K-Water

### Turbidity reduction effect assessment for determination of sand dam fill material

Il Hwan Kim<sup>1</sup> · Kyoung-Hwan Ahn<sup>2</sup> · Yang-Ah Kim<sup>2</sup> · Sunwoo Chang<sup>1</sup> · Min Gyu Kim<sup>1</sup> · Il-Moon Chung<sup>1,‡</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Republic of Korea

<sup>2</sup>K-Water, Daejeon 34350, Republic of Korea

#### 요 약

샌드담의 원리를 이용하여 우리나라의 광역 상수도가 보급되지 않는 지류의 최상류 지역에 시설을 설치하였다. 평상시에는 이용할 수 있는 수자원량을 증대시키고, 가뭄에 대비하고자 하였다. 샌드담 설치에 있어 탁도 저감 효율을 평가하여 최적의 채움재를 선정하고, 현장 규모의 칼럼 실험을 구성하여 적용성을 평가하고자 하였다. 실험에는 두 가지 크기의 칼럼을 사용하였고, 채움재 선정을 위해서는 80 cm 높이의 칼럼을 이용하였다. 샌드담 채움재의 적용성을 높이기 위해 모래를 이용하였다. 네 가지 종류의 모래를 사용하였고, 효과가 좋은 입경을 가진 채움재를 대상으로 현장 규모의 125 cm 높이의 칼럼을 제작하여 실제 탁도 저감 효율을 분석하였다. 채움재 선정은 큰 편차 없이 일정하게 탁도를 저감시키고 평균 탁도 저감률이 높은 시료인 복합층(0.8-1.2 mm / 2-4 mm)으로 결정하였다. 탁도 저감률은 1차 실험을 제외하고는 95% 이상으로 뛰어난 성능을 보여주고 있다. 실험이 진행하며 황토가 쌓임에 따라 채움재의 공극이 작아지는 것으로 나타났다. 채움재의 부유물 제거 없이 실험을 진행하면서 탁도의 저감효과는 증가하는 것으로 나타났지만, 유출량은 줄어드는 것으로 나타났다. 실험의 결과를 이용하여 현장의 채움재에 대한 적용성을 높일 수 있을 것이다. 또한 다양한 상황에 대해서 대처할 수 있으며, 완전한 폐색이 일어나기 전 유출량의 감소 등의 징후에 따라 선제적 대처가 가능할 것으로 보인다.

**주요어:** 샌드담, 채움재, 탁도, 칼럼 실험

**ABSTRACT:** Using the principle of the sand dam, the facility was installed in the upper stream area where water without supply in Korea. The sand dam aims to increase the water resources available during normal season and countermeasure for drought. The optimal filling material was selected to evaluate the turbidity reduction efficiency in the sand dam installation, and the applicability was evaluated by configuring a field-scale column experiment. Two sizes of columns were used for the experiment, and sand was used to increase the applicability of the sand dam filling material. A column with a height of 80 cm was used to select the filling materials. Four types of sand were used, and the actual turbidity reduction efficiency was analyzed by configuring a field-scale column of 125 cm height for a filler with a good particle size. The selection of filling materials was determined as a combination layer (0.8-1.2 mm / 2-4 mm), which is a sample with a high average turbidity reduction rate and uniformly reduced turbidity without large deviations. The turbidity reduction rate is more than 95% except for the first experiment, showing excellent performance. As the experiment proceeded, it was found that the porous filler material became smaller as the ochre piled up, and while the experiment was conducted without removing the ochre, the turbidity reduction effect was found to increase, but the outflow was reduced. Using the results of the experiment, it will be possible to increase the applicability of the field filling material. In addition, it can handle with various situations, and it seems possible to take a preemptive handle according to signs such as a decrease in the amount of outflow rate before complete blockage occurs.

**Key words:** sand dam, fill material, turbidity, column experiment

<sup>‡</sup>Corresponding author: +82-31-910-0334, E-mail: [imchung@kict.re.kr](mailto:imchung@kict.re.kr)

## 1. 서론

상수도 보급이 어려운 물 보급 사각지대에 새로운 수자원 확보 방안으로 샌드댐 개발이 진행되고 있다(Aerts *et al.*, 2007; Lasage *et al.*, 2008; Quilis *et al.*, 2009; Quinn *et al.*, 2019). 샌드댐은 차수벽을 설치하고, 물을 저장할 수 있는 모래와 같은 여재를 이용하여 채워 수자원을 확보할 수 있는 시설물이다(Baurne, 1984; Hanson and Nilson, 1986; Rao and Rasmussen, 1987; Lasage *et al.*, 2015; Yifru *et al.*, 2021). 샌드댐의 원리를 이용하여 우리나라의 상수도가 보급되지 않는 지류의 최상류 지역에 시설을 설치하여 평상시에는 이용할 수 있는 수자원을 증대시키고, 가뭄에 대비하고자 하였다(Chung *et al.*, 2022; Yifru *et al.*, 2022). 샌드댐 설치 지역은 산간 지역으로 경사가 커서 하천을 횡단하여 샌드댐을 설치하면 풍수기에 상류에서의 토석류, 하천수위의 증가, 하천 유속의 증가 등의 영향으로 유지관리의 문제가 발생하며, 홍수에 의한 피해가 발생할 수 있다(Maddrell and Neal, 2012). 따라서, 연구지역에서는 하천수를 간접적으로 활용하는 바이패스형으로 샌드댐을 설치하였다(Chung and Lee, 2021).

강, 하천, 천변여과지 등에서 여재로 사용되는 모래는 오염물질을 걸러내는 중요한 역할을 한다(Schubert, 2002; Eckert and Irmischer, 2006). 바이패스형 샌드댐은 하천수를 간접적으로 이용하게 되지만, 샌드댐 내로 유입되거나 채움재가 유출되는 유사의 이송은 최소화해야 하며, 여재는 원수에 포함된 오염물질을 잘 걸러내야 한다(Baumgarten *et al.*, 2011; Henzler *et al.*, 2014). 원수로 사용하는 하천수에는 부유물질, BOD, 유기물질, 조류 등이 있으며 채움재들은 이들 오염물의 효과적 제거에 필요한 조건을 가져야 한다(Doussan *et al.*, 1997; Dillon *et al.*, 2002; Ray, 2008; Wang *et al.*, 2012; Thakur *et al.*, 2021). 오염물의 여과 외에도 단위 면적당 충분한 생산 유량이 확보되어야 하고 완속 여과 운영조건에서 3-5 m/day라는 상당히 큰 산출율을 만족시켜야 한다. 수질 개선 효과와 충분한 산출율을 만족시키기 위해서는 적합한 입경, 투수계수, 산출률을 가지는 채움재가 필요하다. 균등계수(equality coefficient)가 일정하지 않으면 탁도 저감률이 낮은 반면, 폐색되기 쉬우므로 충분한 여과 지속 시간을 유지할 수

없다(Hall, 1957; Behnke, 1969). 폐색은 부유물이 포함된 유체가 다공성 매질을 통해 흐를 때 매질의 공극 혹은 간극에 부유물이 쌓이는 현상이다(Huston and Fox, 2015). 채움재의 여과 작용 중에 발생하는 폐색 현상은 투수계수가 낮아져 여과 수량을 감소시키지만, 공극이 작아지고 여과속도가 줄어들어 여과수의 수질 개선 효과는 커지기 때문에 이를 적절히 제어해야 한다(Ray *et al.*, 2003; Ahn *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2005). 채움재의 재료는 여과가 필요한 후보지의 수질 특성에 따라 모래의 입경 등에 따라 배치를 효율적으로 진행해야 한다. 채움재에 대한 연구는 대부분 하상여과 혹은 강변여과에 대한 수질 개선 효과 분석(Bourg and Bertin, 1993; Čosović *et al.*, 1996; Kuehn and Mueller, 2000; Kim *et al.*, 2003; Ray, 2004), 생산수량의 감소 현상 등에 대한 연구가 진행되었다(Ojha and Graham, 1994; Weiss *et al.*, 2002; Ojha and Thakur, 2010). 샌드댐은 하상 여과 등에 비해 상부의 유량이 없거나 유속 변동이 크지 않고, 상부 혹은 채움재 내의 수두 차이에 의해 생산 수량 및 수질의 차이가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 유속 조건을 제외한 일정수두에 의한 탁도 저감 효율을 평가하여 최적의 채움재를 선정하고, 현장 규모의 칼럼 실험을 구성하여 적용성을 평가하고자 하였다. 샌드댐 채움재는 적용성을 높이기 위해 원가가 높은 고성능의 여재는 제외하고, 주변에서 쉽게 구할 수 있고 경제적인 모래를 이용하였다. 모래는 입경에 따라 네 가지 종류를 사용하였고, 효과가 좋은 입경을 가진 채움재를 대상으로 현장 규모의 칼럼을 제작하여 탁도 저감 효율을 분석하였다.

## 2. 연구방법

샌드댐 채움재의 시료는 탁도 저감 효율이 뛰어나고, 충분한 생산수량을 만족하며 지속적인 여과기능을 활용함에 있어 사용의 유지관리 측면을 고려해야 한다. 많은 양의 채움재를 사용하기 위해서는 시료의 단가, 구하기 쉬운 소재를 활용하여 최선의 탁도 저감 효율이 나타나야 한다. 본 연구에 사용한 시료는 단가가 비교적 저렴하고 흔한 모래를 선정하였다. 입도별 모래를 분류하여 입도분석을 통해 토양물성과 투수시험을 이용하여 수리 특성을 분석하였

다. 분석한 시료를 대상으로 모래의 입도별 탁도 저감 효율을 평가하고, 현장 적용을 위해 현장 규모와 같은 실험체를 구성하여 적용성을 평가하였다.

## 2.1 채움재의 토양 물성 및 수리 특성 분석

채움재 시료의 토양 물성을 분석하기 위해 밀도, 공극률, 입도시험을 진행하였다. 밀도는 채움재를 500g 정량하여 물로 포화한다. 공기를 완전히 제거한 후 중량을 측정하고, 측정된 시료의 중량, 플라스틱+물의 중량, 플라스틱+물+시료의 중량을 이용하여 계산하였다.

공극률은 여과재의 단위용적중량과 밀도를 이용하여 계산하였다. 단위 용적 중량시험은 공정시험법에 따라 약 25회 진행하였으며 각각 계산된 단위용적중량과 밀도를 이용하여 채움재 4종의 공극률을 측정하였다.

입도시험은 채움재 일정량을 채취하여, 아래에서부터 0.075 mm, 0.106 mm, 0.250 mm, 0.425 mm, 0.850 mm, 2.0 mm, 4.75 mm의 7개 체(Sieve)를 층으로 쌓은 최상부의 4.75 mm의 체에 넣고, 5분간 체가름기를 통하여 진동을 주었다. 각 체에 남은 시료의 무게를 측정하여 통과중량백분율 곡선을 통하여 D60, D30, D10을 산정하고 균등계수  $C_u$ 와 곡률계수  $C_c$ 는 다음의 식 (1), (2)를 통하여 산정하였다.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} \times D_{60})} \quad (2)$$

투수계수는 투수시험 장치를 이용한 정수위 투수시험으로 투수계수를 측정하였다. 건조 시료를 공시체에 약 12.7 cm의 두께(L)로 담았으며, 1 cm마다 다져주며 공극을 최소화하였다. 투수 면적은 공시체의 단면적(A)과 같고, 수두(h)를 19 cm로 하여 30 초(t) 동안에 투수량(Q)을 5회 측정하여 평균치를 계산하였다. 시험을 통해 측정된 각 시료의 측정값을 이용하여 식 (3)을 통해 투수계수를 계산하였다.

$$K = \frac{Q \times L}{A \times h \times t} \quad (3)$$

## 2.2 채움재 입도별 탁도 저감 효율 평가

샌드담 채움재의 탁도 저감 효율 평가를 위해 칼럼 실험을 이용하였다. 칼럼 실험은 칼럼의 크기, 유량, 유속, 채움재 종류, 채움재 입도, 유입수의 탁도 등 다양한 변수를 설정할 수 있다. 샌드담 채움재의 시료는 물성 및 투수시험을 완료한 시료를 대상으로 칼럼시험의 채움재로 선정하였다.

시험에 사용된 칼럼은 내경 16.5 cm, 높이 80 cm의 원형의 투명 아크릴 소재로 제작하였다. 6개의 탁도 측정을 위한 시료 배출구가 있으며 칼럼 하부에는 스크린이 설치되어 있고, 스크린 하부에는 칼럼을 통과한 물이 배출되는 벨브와 배출구가 있다(그림 1). 총 6개의 탁도 측정 구간이 설정되어야 했지만 세 번째 시료 배출구는 누수의 문제로 폐쇄하였다. 시험에 사용된 원수의 탁도는 수돗물과 황토를 혼합하여 인위적으로 조정하였다.

## 2.3 현장 적용을 위한 칼럼 실험

현장에 적용될 샌드담 규모에 맞추어 칼럼 실험을 진행하였다. 현장에 적용될 샌드담은 채움재의 두께가 총 160 cm로 설계되었으며, 채움재는 완전 포화된다는 가정하에 진행하였다. 전체 채움재 160 cm 중 취수관 밑은 샌드담의 생산수에 큰 영향을 주지 않아 상부의 채움재에 대해서 칼럼 실험으로 구성하였다. 취수관 상부의 110 cm와 10 cm의 수위를 모사하기 위해 시험에 사용된 칼럼은 내경 33 cm, 높이 125 cm의 원형의 투명 아크릴 소재로 제작하였다(그림 2).

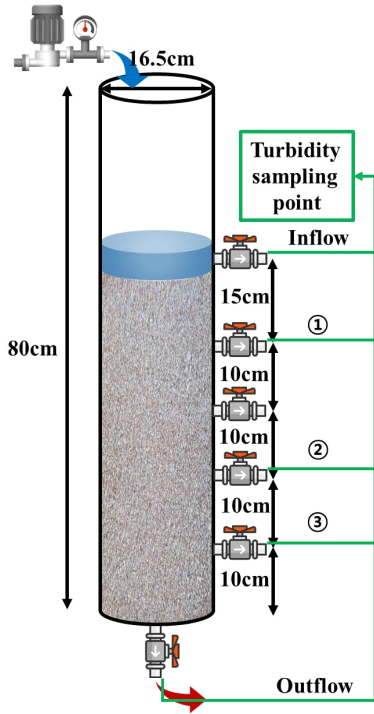
## 3. 연구결과

### 3.1 채움재의 입도별 토양 물성 및 수리 특성

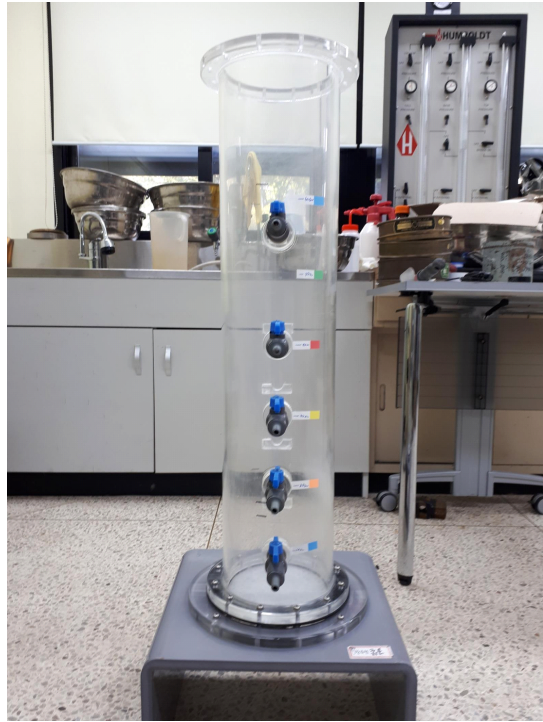
채움재의 토양 물성과 수리 특성을 분석하기 위해 입도시험과 투수시험을 이용하였다. 시험 대상은 주변에서 흔하게 구할 수 있고, 상대적으로 저렴한 모래를 사용하였고, 입도별로 0.3-0.45 mm, 0.45-0.7 mm, 0.8-1.2 mm, 2-4 mm의 모래를 사용하였다. 토양 물성 시험 결과 모래의 특성을 가지고 있으며, 비중은 2.62-2.65의 범위를 나타냈다. 단위 용적 중량은 1.513-1.587 범위를 가지며, 공극률은 39.40-42.80의 범위를 나타냈다. 균등계수는 시료의 입도분포가

작아 6 이하의 작은 값으로 나타났다. 곡률계수는 대부분 1에 가까운 값을 가지며, 1-3사이의 양호한 입도분포를 나타냈다. 투수계수는 입자크기가 커질

수록 커지는 것으로 나타났다. 입자크기가 가장 작은 0.3-0.45 mm가 0.068 cm/s로 나타났으며, 입자크기가 가장 큰 2-4 mm가 0.325 cm/s로 가장 크게



(a) Schematic diagram



(b) Column

Fig. 1. Setting of column test.

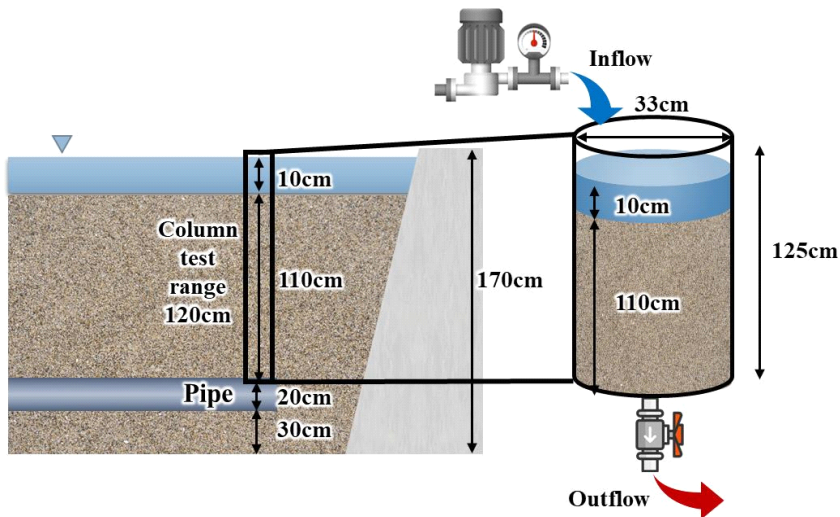


Fig. 2. Schematic diagram of field size column test.

**Table 1.** Filter material property and permeable test results.

Grain size	0.3-0.45 mm	0.45-0.7 mm	0.8-1.2 mm	2-4 mm
Specific gravity	2.64	2.62	2.65	2.65
Unit weight (g/cm <sup>3</sup> )	1.53	1.59	1.57	1.51
Porosity	41.90	39.40	40.60	42.80
D60	0.71	0.92	1.37	2.70
D30	0.57	0.72	1.22	2.39
D10	0.42	0.56	1.04	1.89
C <sub>u</sub>	1.69	1.65	1.32	1.43
C <sub>c</sub>	1.09	1.01	1.04	1.12
K (×10 <sup>-1</sup> cm/s)	0.68	0.72	1.99	3.25

나타났다. 토양 물성 시험 결과 물성시험 및 투수시험의 결과는 표 1에 정리하였다.

### 3.2 채움재 입도에 따른 탁도 저감 효율 평가

불순물을 제거한 채움재를 칼럼에 약 50 cm (복합층 경우 25 cm)의 두께로 채운 후, 배출구 밸브를 차단하여 일반수를 완전히 포화시킨 후 배출하는 과정을 3~4번 반복하였다. 칼럼 실험은 일반수로 채움재를 완전히 포화시키고 채움재 상부 표면보다 약 10 cm 높게 수두를 유지한 상태에서 시작하였다. 탁수 주입 후, 총 120분간 시험을 수행하였으며 15분 간격으로 채움재 상부, 상부를 기준으로 -10 cm, -20 cm, -40 cm, 하부 시료 채취구에서 각각 시료를 채취하여 탁도를 측정하였다.

채움재의 구성은 단일 채움재는 50 cm 높이로 0.3-0.45 mm, 0.45-0.7 mm, 0.8-1.2 mm, 2-4 mm 각각 구성하였다. 채움재의 탁도 저감효과를 고려했을 때는 입경이 작은 채움재로 구성하는 것이 효과적이지만, 수량을 고려했을 때는 일정 투수계수 이상의 채움재를 구성해야 한다. 투수계수를 고려했을 때 0.8-1.2 mm가  $1.99 \times 10^{-1}$  cm/s이고, 2-4 mm가  $3.25 \times 10^{-1}$  cm/s 로 충분한 생산수량을 확보할 수 있을 것으로 판단했다. 따라서, 복합 채움재는 25 cm 높이로 상부에서 0.8-1.2 mm, 2-4 mm로 구성하였다. 상부에 입경이 작은 채움재로 구성한 것은 샌드담의 구조상 유지관리 측면에서 장점이 있다. 입경이 작은 채움재가 상부에 위치하면, 탁도 유발 물질이 상부에 억류되어 풍수기 등 유입이 증가하는 시기에 샌드담 상부의 유속이 증가하여 자연적으로 세척이 가능하며, 하부에 탁도 유발 물질이 억류되면

배수관의 역세척 및 유지관리가 용이하지 않다. 또한, 배수관이 위치하는 층에 충분한 여과 수량하기 위해 입경이 크고 투수계수가 큰 채움재를 배치하였다.

탁도 저감효과 분석 실험을 진행하는 과정에서 각각의 시료에 따라 한계 탁도가 존재하였고, 너무 큰 탁도의 원수를 유입시키면 빠른 폐색으로 실험이 진행되지 않았다. 지속적으로 유입 유출이 발생하는 상태에서 탁도 저감효과를 분석하기 위해 시행착오에 의한 사전 실험을 진행하였다. 탁도를 유발시키는 재료로 황토를 사용하였으며, 프로펠러로 교반하여 목표 탁도를 생성하였다. 0.3-0.45 mm 채움재에서는 공극의 크기가 작아 일정시간 100 NTU가 넘어가면 폐색이 일어나 유출이 일어나지 않았다. 0.3-0.45 mm를 제외한 실험에서는 목표 탁도 100 NTU를 맞추기 위해 황토의 양을 조절하였으나, 수량이 작은 수조에서 작은 프로펠러를 이용하여 탁도를 유발시키고, 관측시간에 따라 순간적인 탁도를 센서로 계측하여 유입수의 탁도가 일정하지 않았다.

칼럼 실험을 통해 채움재 입도별 탁도 저감효과를 분석한 결과 탁도의 저감효과가 가장 뛰어난 것은 복합층(0.8-1.2 mm / 2-4 mm)으로 나타났으며, 유입 탁도 대비 유출 탁도가 62.64-139.93 NTU가 저감되는 효과를 나타냈다. 작은 규모의 실험을 진행함에 있어 유입수의 탁도가 일정하지 않았지만, 평균적으로는 120분간 91.70 NTU의 저감효과가 나타났다. 0.8-1.2 mm의 시료는 42.53-158.74 NTU의 탁도를 개선시키는 것으로 나타났다. 0.8-1.2 mm는 120분간 평균 탁도 저감효과는 87.12 NTU로 나타났지만, 유입수 200.67 NTU에서 41.93 NTU로 저감시키며 158.74 NTU의 가장 큰 탁도 저감효과를 나타

났다. 하지만, 0.8-1.2 mm는 유출수의 탁도가 평균 65.36 NTU를 보이며 다른 시료에 비해 높은 탁도를 나타냈다. 0.45-0.7 mm는 80.80 NTU, 2-4 mm는 62.01 NTU가 120분간 평균적으로 탁도가 저감되는 것으로 나타났다. 가장 탁도 저감효과가 작은 시료는 0.3-0.45 mm로 24.98-57.99 NTU로 120분간 평균 42.11 NTU가 저감되었다. 그림 3은 시간에 따른 탁도 저감효과를 입도별로 나타냈다.

채움재 입도별 평균 탁도 저감률은 0.3-0.45 mm

가 88.51%, 0.45-0.7 mm가 79.12%, 0.8-1.2 mm가 67.56%, 2-4 mm가 77.32%, 복합층(0.8-1.2 mm / 2-4 mm)이 82.58%로 나타났다. 입자크기가 가장 작은 0.3-0.45 mm 시료에서 가장 큰 저감률을 나타내었다. 탁도 저감률에서는 0.3-0.45 mm가 가장 크게 나타났으나, 한계 탁도에서 다른 시료에 비해 매우 작은 탁도의 저감효과를 나타내어 탁도가 큰 적용지역에서는 채움재의 빠른 폐색이 일어날 것으로 판단된다. 두 번째로 평균 탁도 저감률이 높은 시료

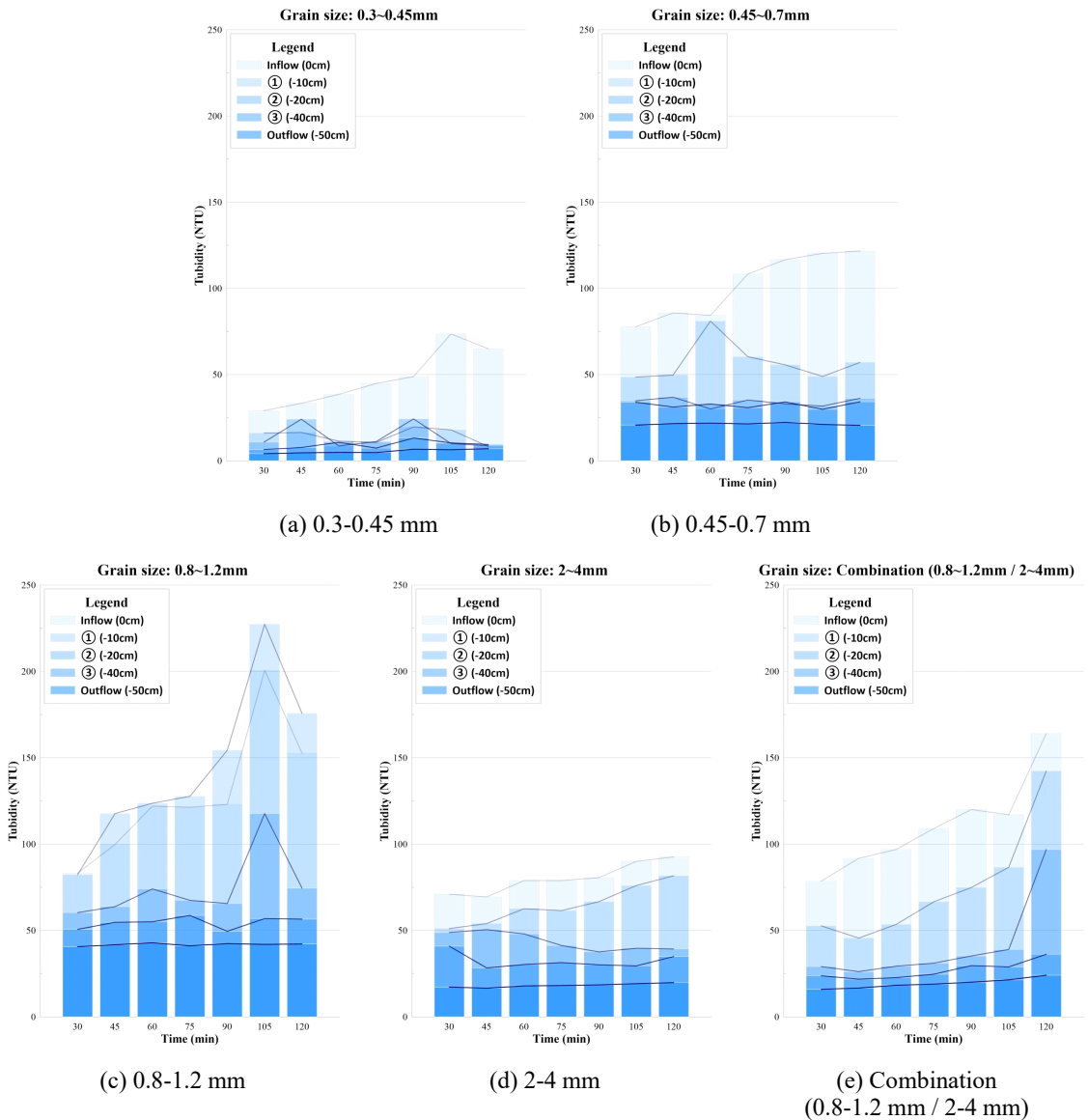


Fig. 3. Column test turbidity results of filler material by grain size.

**Table 2.** Column test turbidity results and reduction rate of filler material by grain size.

Grain size (mm)	Measurement	Time (min)							Ave.
		30	45	60	75	90	105	120	
0.3-0.45	Inflow (NTU)	29.07	33.30	38.53	44.83	48.80	73.57	64.97	47.58
	Outflow (NTU)	4.09	4.60	4.82	4.72	6.68	6.39	6.98	5.47
	Reduction rate (%)	85.90	86.20	87.50	89.50	86.30	91.30	89.30	88.51
0.45-0.7	Inflow (NTU)	77.73	85.77	84.37	108.33	116.67	120.33	121.67	102.12
	Outflow (NTU)	20.67	21.53	21.83	21.37	22.27	21.07	20.50	21.32
	Reduction rate (%)	73.40	74.90	74.10	80.30	80.90	82.50	83.20	79.12
0.8-1.2	Inflow (NTU)	83.13	99.80	122.00	121.33	123.00	200.67	152.67	128.94
	Outflow (NTU)	40.60	41.73	42.87	41.10	42.37	41.93	42.17	41.82
	Reduction rate (%)	51.20	58.20	64.90	66.10	65.60	79.10	72.40	67.56
2-4	Inflow (NTU)	71.00	69.40	78.90	78.90	80.60	90.00	92.60	80.20
	Outflow (NTU)	17.20	16.60	17.90	18.10	18.50	19.20	19.80	18.19
	Reduction rate (%)	75.80	76.00	77.30	77.10	77.10	78.70	78.70	77.32
Combination (0.8-1.2/2-4)	Inflow (NTU)	78.57	91.77	96.90	109.00	120.00	117.00	164.00	111.03
	Outflow (NTU)	15.93	16.67	18.27	18.93	20.07	21.43	24.07	19.34
	Reduction rate (%)	79.70	81.80	81.20	82.60	83.30	81.70	85.30	82.58

는 복합층(0.8-1.2 mm / 2-4 mm)으로 나타났으며, 큰 편차 없이 일정하게 탁도를 저감되는 것으로 나타났다. 탁도 저감효과에서 0.8-1.2 mm는 가장 크게 탁도를 개선하는 것으로 나타났으나, 저감률에서는 67.56%로 가장 낮게 나타났다.

**3.3 현장 샌드담 적용을 위한 탁도 저감 효율 평가**

칼럼 최하부에는 180 μm 망이 부착된 1 cm 두께의 스크린이 설치되어 있고, 스크린 하부에는 칼럼을 통과하는 물이 배출되는 밸브와 배출구가 있다. 수도관은 실리콘 호스를 사용하였으며, 탁도유지를 위해 칼럼으로 탁수가 들어가는 400 L 물탱크 뚜껑에 모터 프로펠러 형태의 혼합 기기를 설치하였다. 일정한 탁도의 원수를 공급하기 위해 유량조절이 가능한 펌프를 사용하였다. 시험용 칼럼에 채움재를 채운 뒤 칼럼 내에서 균질하게 다졌다.

칼럼시험 채움재는 앞서 실험을 진행하였던 입도별 칼럼 실험을 통해서 저감효과가 가장 크고, 저감률 또한 높았던 혼합층(0.8-1.2 mm / 2-4 mm) 구성을 참고하였다. 채움재의 심도는 자갈 10 cm (20-30 mm), 모래 70 cm (0.8-1.2 mm), 모래 30 cm (2-4 mm)를 채워 현장의 샌드담 채움재 심도와 동일하게 하였다. 상부의 자갈은 샌드담 내부의 수량이 충분하

여 월류되는 과정 혹은 풍수기에 많은 양의 수량이 유입되었을 때 상부의 모래 층이 유실되는 것을 줄이기 위해 배치하였으며, 여과 효과를 낼 수 있는 작은 입경의 모래를 상부에 배치하여 탁도를 저감시키게 하였다. 배수관이 배치되는 층에 입경이 큰 모래를 배치하여 투수계수를 높여 충분한 생산 수량을 확보하였으며, 현장의 평수기와 같이 수두는 10 cm로 일정하게 유지하였다(그림 4). 채움재의 탁도 저감률과 막힘 현상을 관측하기 위하여 황토의 양을 늘려가며 표 3과 같이 4가지 조건으로 진행하였다. 실험을 진행하는 동안 채움재 내에 걸러지는 황토를 씻어내지 않고 그대로 진행하며 채움재의 막힘 현상이 발생하는 시간을 관찰하고자 하였다. 각 상태에 따라 총 95분의 실험을 진행하였고, 시료의 탁도 자료는 5분 간격으로 수집하였으며, 유량은 5분간의 평균 유량을 측정하였다(그림 5).

실험결과 1번 실험(물 400 L + 황토 100 g)에서는 초기 15분에서는 평균 6.34 m<sup>3</sup>/day가 유입되었지만, 황토로 인해 점차 공극이 메워지며 유입량이 점차 줄어들어 평균 5.54 m<sup>3</sup>/day로 나타났다(그림 5a). 초기의 유출 탁도는 황토가 섞여있지 않은 물로 포화되어 있는 상태에서 진행되어 매우 낮게 나타났으나, 초기 10분 이후 11.00-18.70 NTU의 분포를

나타내고 있다. 초기 유출량 또한 맑은 물이 유출되어 7.80 m<sup>3</sup>/day로 높게 나타났으나 5.18-5.79 m<sup>3</sup>/day의 범위에서 유출되는 것으로 나타났다. 평균 유입량은 5.70 m<sup>3</sup>/day이고, 평균 유입 탁도는 100.95 NTU로 나타났다. 평균 유출량은 5.67 m<sup>3</sup>/day이고, 평균 유출 탁도는 12.65 NTU으로 나타나 평균 탁도 저감률은 87.21%로 나타났다.

2번 실험(물 400 L + 황토 300 g)에서는 1번 실험을 이어서 진행하여 칼럼 내에 남아있는 1번 실험의 탁수가 유출되며 5분에서는 12.50 NTU로 나타났으나, 상승한 유입 탁도로 인해 초기 10분에서 49.10 NTU로 급격히 상승하는 것으로 나타났다(그림 5b). 10분 이후 점차 감소하며 평균 유출 탁도는 11.52 NTU로 나타났다. 유입량과 유출량 모두 점차 감소하는 추세로 나타났으며, 평균 유입량은 6.13 m<sup>3</sup>/day, 평균 유출량은 5.60 m<sup>3</sup>/day로 나타났다.

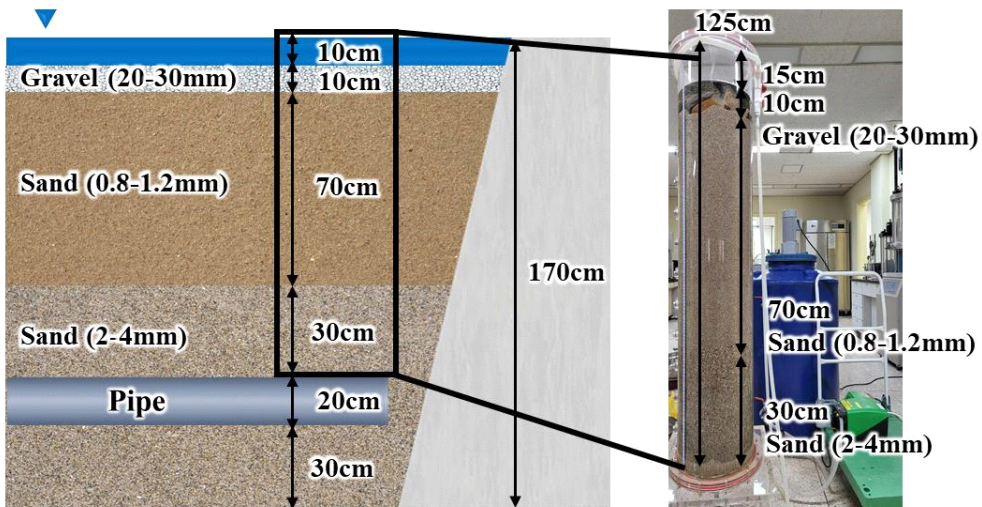
3번 실험(물 400 L + 황토 500 g)에서는 초기 5분까지 평균 265.50 NTU의 높은 탁수가 유출되었으

며, 점차 감소하여 평균 9.06 NTU정도로 안정된 것으로 나타났다(그림 5c). 유입량은 4.92-6.74 m<sup>3</sup>/day의 범위를 가지며 점차 감소하는 추세로 나타났으며, 평균 유입량은 5.32 m<sup>3</sup>/day로 나타났다. 유출량은 초기에 7.08 m<sup>3</sup>/day로 높게 나타났으나 그 이후 점차 감소하는 추세로 평균 유출량은 4.92 m<sup>3</sup>/day로 나타났다.

4번 실험(물 400 L + 황토 1000 g)에서는 초기 5분 281.00 NTU의 높은 탁도의 유출수가 배출된 이후 점차 감소하는 추세로 나타났다. 안정된 이후에는 1000 NTU 이상의 높은 탁도에 비해 유출수의 탁도는 6.74 NTU 정도로 나타났으며, 85분 이후부터는 5 NTU 이하의 유출수가 나타났다(그림 5d). 4번 실험은 유일하게 유입량이 점차 증가하는 추세로 나타났으며, 2.87 m<sup>3</sup>/day에서 시작하여 3.41 m<sup>3</sup>/day까지 상승하는 것으로 나타났다. 하지만, 평균 유입량은 3.01 m<sup>3</sup>/day로 모든 실험 중 가장 적은 양이 유입되었다. 유출량은 3.02-3.89 m<sup>3</sup>/day의 범위를 가

**Table 3.** Experimental condition of field size column test.

No.	Flow (L/min)	Turbid water material	Turbidity (NTU)
1	5.70	Water 400 L + Ocher 100 g	111
2	6.13	Water 400 L + Ocher 300 g	423
3	5.32	Water 400 L + Ocher 500 g	730
4	3.01	Water 400 L + Ocher 1000 g	≥ 1000



**Fig. 4.** Settings of field size column test.



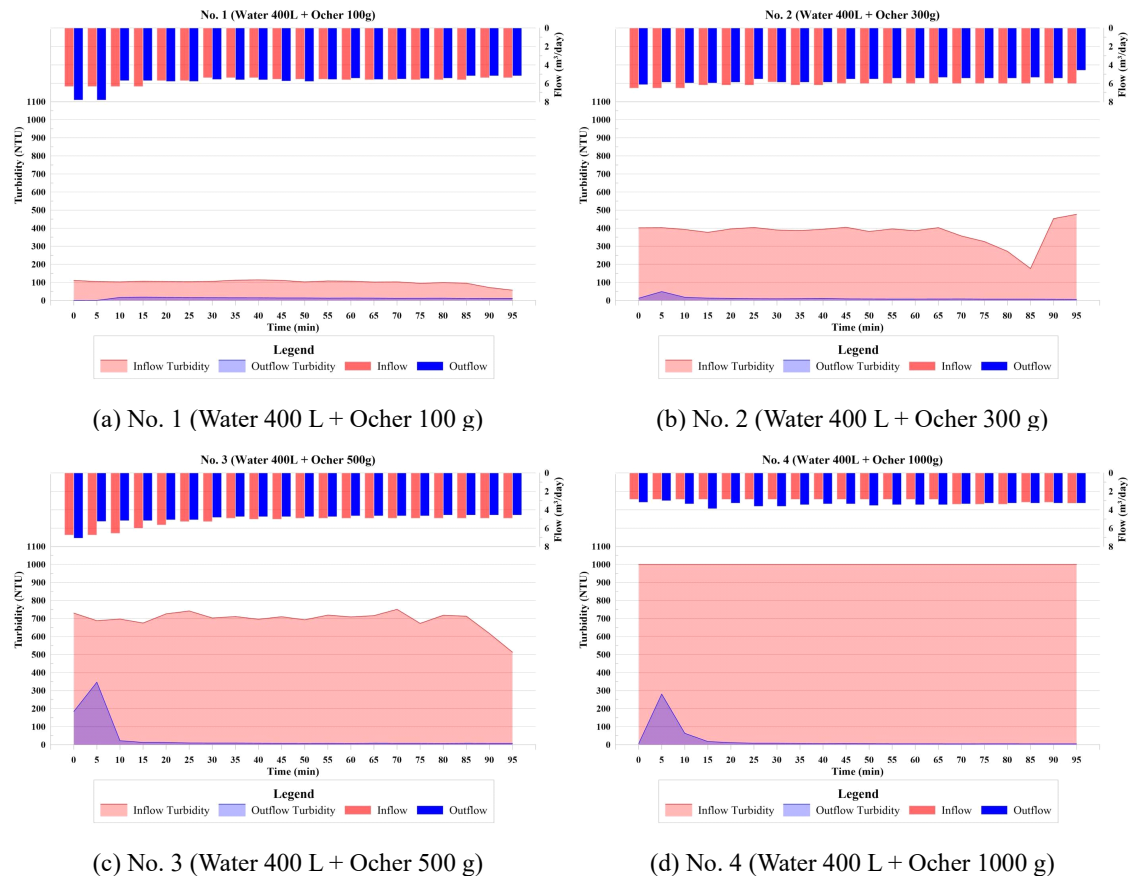
지며, 전체 평균 유출량은 3.40 m<sup>3</sup>/day로 나타났다. 표 4는 1-4번 실험에 대한 평균 유입 탁도, 유출 탁도, 탁도 저감률, 유입량, 유출량을 나타냈다.

탁도 저감률 분석 결과, 1차 시험 초반에는 83.7%에서 시험을 진행함에 따라 점차 상승하여 4차 시험이 종료 때에는 99.5%까지 나타났다. 유입 탁도 농도가 급격히 증가함에 따른 상대적으로 저감률의 증가 현상이 나타나는데, 채움재의 탁도 여과에 따

라 공극에 황토가 흡착됨에 따라 공극이 작아지며, 공극 사이에서의 유리가 줄어들어 탁도 저감효과가 더 높아지는 것으로 판단된다. 채움재의 상부에는 황토가 쌓이는 것이 육안으로 확인되며, 상부로부터 내려갈수록 황토 입자가 적어진다. 0.8-1.2 mm 채움재와 2-4 mm 채움재의 경계부에서 황토가 약 1.5 cm 정도 쌓여있는 것으로 나타났다. 채움재의 경계

**Table 4.** Average results of field size column test.

No.	1	2	3	4
Average inflow turbidity (NTU)	100.95	379.00	695.00	≥ 1000
Average outflow turbidity (NTU)	12.65	11.52	34.70	23.26
Average turbidity reduction rate (%)	87.21	96.92	95.04	97.67
Average inflow (m <sup>3</sup> /day)	5.70	6.13	5.32	3.01
Average outflow (m <sup>3</sup> /day)	5.67	5.60	4.92	3.40



**Fig. 5.** Results of field size column test.

부에서 채움재의 교란으로 인해 공극이 더 작아져 유속이 감소하여 0.8-1.2 mm 채움재의 하부에서 황토가 쌓이는 것으로 나타났다. 탁도 저감률은 1차 실험을 제외하고는 95% 이상으로 뛰어난 성능을 보여주고 있다. 실험이 진행하며 유입 탁도가 증가함에 따라 채움재가 여과 작용을 하며 공극에 황토가 흡착되었다. 황토가 쌓임에 따라 채움재의 공극이 작아지는 것으로 나타났으며, 황토의 제거 없이 실험을 진행하면서 탁도의 저감효과는 증가하는 것으로 나타났지만, 유출량은 줄어드는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

물 보급 사각지대에 새로운 수자원 확보 방안으로 샌드담 개발이 진행되고 있다. 샌드담 설치 지역은 산간 지역으로 경사가 커서 하천수를 간접적으로 활용하는 바이패스형으로 설치하였다. 샌드담의 채움재 재료는 여과가 필요한 후보지의 수질 특성에 따라 모래의 입경 등에 따라 배치를 효율적으로 진행해야 한다. 따라서, 탁도 저감 효율을 평가하여 최적의 채움재를 선정하고, 현장 규모의 칼럼 실험을 구성하여 적용성을 평가하였다.

샌드담 채움재의 재료는 탁도 저감 효율이 뛰어나고, 충분한 생산수량을 확보함과 동시에 지속적인 여과 기능의 활용에 있어 유지관리 측면을 고려해야 한다. 사용한 재료는 모래를 사용하였으며, 입도별 모래를 분류하여 입도분석을 통해 토양 물성과 투수 시험을 이용하여 수리 특성을 분석하였다. 사용한 입도별 모래는 0.3-0.45 mm, 0.45-0.7 mm, 0.8-1.2 mm, 2-4 mm를 사용하였다. 토양 물성 시험 결과 비중은 2.62-2.65의 범위를 나타냈으며, 단위 용적 중량은 1.513-1.587 범위를 나타냈다. 공극률은 39.40-42.80의 범위를 나타냈다. 균등계수는 시료의 입도 분포가 작아 6 이하의 작은 값으로 나타났다. 곡률계수는 대부분 1에 가까운 값을 가지며, 1-3사이의 양호한 입도분포를 나타냈다. 투수계수는 입자크기가 커질수록 커지는 것으로 나타났다.

채움재 선택을 위해 80 cm 규모의 칼럼 실험을 진행하였다. 채움재 입도별 탁도 저감효과를 분석한 결과 탁도의 저감효과가 가장 뛰어난 것은 복합층(0.8-1.2 mm / 2-4 mm)으로 나타났으며, 120분간 평균적으로는 91.70 NTU의 탁도가 저감되었다. 채움

재 입도별 평균 탁도 저감률은 0.3-0.45 mm가 88.51%, 0.45-0.7 mm가 79.12%, 0.8-1.2 mm가 67.56%, 2-4 mm가 77.32%, 복합층(0.8-1.2 mm / 2-4 mm)이 82.58%로 나타났다. 현장 규모의 실험을 위해 채움재는 충분한 수량 확보를 위해 투수계수가 양호하며, 두 번째로 평균 탁도 저감률이 높은 시료인 복합층(0.8-1.2 mm / 2-4 mm)으로 진행하였다. 채움재는 입경에 따라 한계 탁도가 존재하게 되는데 본 연구에서는 폐색 현상이 일어나는 한계 탁도까지 진행하지 못했고, 가장 폐색이 잘 발생하는 0.3-0.45 mm에서도 각각의 입경의 배치 혹은 다짐 정도에 따라 폐색에 대한 불확실성이 크게 나타났다. 추후 다양한 실험을 진행하여 채움재의 입경에 따른 한계 탁도를 정량적으로 나타낼 예정이다. 또한, 많은 실험 횟수로 채움재 입경에 따른 탁도 저감율에 대한 경험 공식을 도출한다면, 추후 설치될 샌드담의 복합층을 선정하는 기준으로 활용할 수 있을 것이라 판단된다.

현장 규모의 125 cm 칼럼 실험에서 채움재의 심도는 자갈 10 cm (20-30 mm), 모래 70 cm (0.8-1.2 mm), 모래 30 cm (2-4 mm)를 채워 현장의 샌드담 채움재 심도와 동일하게 하였으며, 수두는 10 cm로 일정하게 유지하였다. 채움재의 탁도 저감률과 막힘 현상을 관측하기 위하여 황토의 양을 늘려가며 4가지 조건으로 진행하였다. 탁도 저감 효율 분석 결과, 1차 시험 초반에는 탁도 저감률이 83.7%에서 시작하여 점차 상승하며 4차 시험종료 때에는 99.5%까지 나타났다. 유입 탁도 농도가 급격히 증가함에 따른 상대적으로 탁도 저감률의 증가 현상이 나타났다. 채움재의 탁도 여과에 따라 공극에 황토가 흡착됨에 따라 공극이 작아지며, 생산 수량은 줄어드는 것으로 나타났다. 탁도 저감률은 1차 실험을 제외하고는 95% 이상으로 뛰어난 성능을 보여주고 있으며, 황토의 제거 없이 실험을 진행하면서 탁도의 저감효과는 증가하는 것으로 나타났지만, 유출량은 줄어드는 것으로 나타났다. 실험의 결과를 이용하여 현장의 채움재에 대한 적용성을 높일 수 있을 것이라 판단된다. 또한 다양한 상황에 대해서 대처할 수 있으며, 완전한 폐색이 일어나기 전 유출량의 감소 등의 징후에 따라 선제적 대처가 가능할 것으로 보인다.

실험 진행에 있어 탁도 유발 물질로 황토를 사용

하였는데, 현장의 탁도 유발 물질은 다양할 수 있다. 탁도 유발 물질에 따라 폐색의 징후는 다양할 수 있다. 따라서 추후에는 황토 외에 다양한 재료를 활용하여 탁도를 유발시켜 현장에서 일어날 수 있는 다양한 상황에 대해서 모사할 수 있도록 할 예정이다. 또한, 현장에서는 불가능한 실험인 장기적인 실험에 따라 폐색 현상 등에 대해서 모사하여 유지관리 시점에 대한 실험을 진행할 예정이다.

## 감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술의 수요대응형 물공급서비스사업의 지원(과제번호 146515) 및 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단 기후변화영향최소화기술개발사업의 지원(NRF-2020M3H5A1080735)을 받아 연구되었습니다.

## REFERENCES

- Aerts, J., Lasage, R., Beets, W., de Moel, H., Mutiso, G., Mutiso, S. and de Vries, A., 2007, Robustness of sand storage dams under climate change. *Vadose Zone Journal*, 6, 572-580.
- Ahn, K.H., Sohn, D.B. and Kim, S.H., 2005, Removal of organic matter and nitrogen in a model system of riverbed filtration. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 27, 525-534 (in Korean with English abstract).
- Baumgarten, B., Jaehrig, J., Reemtsma, T. and Jekel, M., 2011, Long term laboratory column experiments to simulate bank filtration: factors controlling removal of sulfamethoxazole. *Water research*, 45, 211-220.
- Baurne, G., 1984, "Trap-dams": artificial subsurface storage of water. *Water International*, 9, 2-9.
- Behnke, J.J., 1969, Clogging in surface spreading operations for artificial ground-water recharge. *Water Resources Research*, 5, 870-876.
- Bourg, A.C. and Bertin, C., 1993, Biogeochemical processes during the infiltration of river water into an alluvial aquifer. *Environmental science & technology*, 27, 661-666.
- Chung, I.M. and Lee, J., 2021, Preliminary Analysis on Improvement of Water Supply Capacity of Sand Dam. *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, 41, 29-37 (in Korean with English abstract).
- Chung, I.M., Lee, J., Kim, M.G., Kim, I.H. and Yifru, B.A., 2022, Analysis of Water Supply Capacity of a Sand Dam. *Water*, 14, 3039.
- Ćosović, B., Hršak, D., Vojvodić, V. and Krznarić, D., 1996, Transformation of organic matter and bank filtration from a polluted stream. *Water Research*, 30, 2921-2928.
- Dillon, P.J., Miller, M., Fallowfield, H. and Hutson, J., 2002, The potential of riverbank filtration for drinking water supplies in relation to microcystin removal in brackish aquifers. *Journal of Hydrology*, 266, 209-221.
- Doussan, C., Poitevin, G., Ledoux, E. and Detay, M., 1997, River bank filtration: modelling of the changes in water chemistry with emphasis on nitrogen species. *Journal of contaminant hydrology*, 25, 129-156.
- 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*, 55, 283-291.
- Hall, W.A., 1957, An analysis of sand filtration. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 83, 1-9.
- Hanson, G. and Nilsson, Å., 1986, Ground-Water Dams for Rural-Water Supplies in Developing Countries. *Groundwater*, 24, 497-506.
- 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*, 156, 78-92.
- Huston, D.L. and Fox, J.F., 2015, Clogging of fine sediment within gravel substrates: Dimensional analysis and macroanalysis of experiments in hydraulic flumes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141, 04015015.
- Kim, S.B., Corapcioglu, M.Y. and Kim, D.J., 2003, Effect of dissolved organic matter and bacteria on contaminant transport in riverbank filtration. *Journal of Contaminant Hydrology*, 66, 1-23.
- 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. *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, 25, 301-308 (in Korean with English abstract).
- Kuehn, W. and Mueller, U., 2000, Riverbank filtration: an overview. *Journal-American Water Works Association*, 92, 60-69.
- Lasage, R., Aerts, J.C.J.H., Mutiso, G.C. and De Vries, A., 2008, Potential for community based adaptation to droughts: Sand dams in Kitui, Kenya. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33, 67-73.
- Lasage, R., Aerts, J.C.J.H., Verburg, P.H. and Sileshi, A.S., 2015, The role of small scale sand dams in securing water supply under climate change in Ethiopia. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 20, 317-339.
- Maddrell, S. and Neal, I., 2012, Sand dams, a practical guide. Excellent, Brentford, UK, <http://www.excellent.com>

- lentdevelopment.com/articles/excellent-news/excellent-development-launch-the-sand-dam-manual (November 20, 2012).
- Ojha, C.S.P. and Graham, N.J.D., 1994, Computer-aided simulation of slow sand filter performance. *Water Research*, 28, 1025-1030.
- Ojha, C.S.P. and Thakur, A.K., 2010, River bank filtration in North India. In *World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change*, p. 782-791, [https://doi.org/10.1061/41114\(371\)87](https://doi.org/10.1061/41114(371)87).
- Quilis, R.O., Hoogmoed, M., Ertsen, M., Foppen, J.W., Hut, R. and de Vries, A., 2009, Measuring and modeling hydrological processes of sand-storage dams on different spatial scales. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34, 289-298.
- Quinn, R., Rushton, K. and Parker, A., 2019, An examination of the hydrological system of a sand dam during the dry season leading to water balances. *Journal of Hydrology X*, 4, 100035.
- Rao, S.V.R. and Rasmussen, J.A., 1987, Technology of small community water supply systems in developing countries. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 113, 485-497.
- Ray, C., 2004, Modeling RBF efficacy for mitigating chemical shock loads. *Journal-American Water Works Association*, 96, 114-128.
- Ray, C., 2008, Worldwide potential of riverbank filtration. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 10, 223-225.
- Ray, C., Melin, G. and Linsky, R.B. (eds.), 2003, Riverbank filtration: improving source-water quality. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 226 p.
- Schubert, J., 2002, Hydraulic aspects of riverbank filtration-field studies. *Journal of Hydrology*, 266, 145-161.
- Thakur, A.K., Ojha, C.S.P., Singh, V.P., Chaudhur, B.B. and Kashyap, V., 2021, Removal of turbidity and assessment of groundwater contribution during riverbank filtration. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 25, 04021006.
- Wang, Z., Du, X., Yang, Y. and Ye, X., 2012, Surface clogging process modeling of suspended solids during urban stormwater aquifer recharge. *Journal of Environmental Sciences*, 24, 1418-1424.
- Weiss, W.J., Bouwer, E.J., Ball, W.P., O'Melia, C.R., Arora, H. and Speth, T.F., 2002, Reduction in Disinfection Byproduct Precursors and Pathogens During Riverbank Filtration at Three Midwestern United States Drinking-Water Utilities. In: Ray, C., Melin, G., Linsky, R.B. (eds) *Riverbank Filtration. Water Science and Technology Library*, 43, [https://doi.org/10.1007/0-306-48154-5\\_9](https://doi.org/10.1007/0-306-48154-5_9).
- Yifru, B.A., Kim, M.G., Lee, J.W., Kim, I.H., Chang, S.W. and Chung, I.M., 2021, Water storage in dry riverbeds of arid and semi-arid regions: Overview, challenges, and prospects of sand dam technology. *Sustainability*, 13, 5905.

---

Received : November 22, 2022

Revised : December 26, 2022

Accepted : December 29, 2022