

실내 실험과 현장 실험을 이용한 샌드댐 취수율 평가

김일환¹ · 이치형² · 오동환² · 장선우¹ · 김민규¹ · 정일문^{1,‡}

¹한국건설기술연구원

²인텔리지오

Assessment of water withdrawal rate in wand dam using lab scale and on-site experiment

Il Hwan Kim¹ · Chi-Hyung Lee² · Dong-Hwan Oh² · Sunwoo Chang¹ · Min Gyu Kim¹ · Il-Moon Chung^{1,‡}

¹Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Republic of Korea

²Intellego Co., Ltd., Seoul 08390, Republic of Korea

요 약

우리나라의 상시 가뭄지역인 춘천시 북산면 물로리 일대에 샌드댐을 설치하고, 안정적인 수자원 공급을 위해 취수율 분석을 진행하였다. 취수율의 정량적 분석을 위해 축소 모형을 제작하여 26회의 실험을 진행하여 현장에 적용하였으며, 현장과 모형의 취수율을 비교 분석하였다. 축소 모형은 집수관을 제외하고 현장 샌드댐의 1/15 크기로 제작하였으며, 집수관은 내구성 등의 문제로 1/5 크기로 제작하였다. 모형의 이론적인 저류량 대비 평균 유입량의 오차는 약 1.3% 차이로 이론적인 저류량과 유사하게 나타났다. 취수율은 모형실험에서 80.8%로 나타났으며, 현장에서 77.7%로 나타났다. 3.1%의 차이는 수문학적 환경과 샌드댐 구조물 재료에서 나타난 것으로 보인다. 추후 샌드댐 시스템의 표준이 될 수 있는 실내 모형을 구축한다면, 신규 물 복지 사각 지역에 샌드댐의 적용성을 높일 수 있을 것이다. 계절 특성에 따른 샌드댐의 증발에 대한 손실량 평가가 함께 이루어진다면, 샌드댐 운영에 필요한 수량의 안전율에 대한 명확한 근거를 마련할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 샌드댐, 실내 실험, 현장 실험, 취수율 평가

ABSTRACT: A sand dam was installed to Mullori, Buksan-myeon, Chuncheon-si, which is constant drought area in Korea. Water withdrawal rate was analyzed for sustainable water resources supply. Down scale model was created for quantitative analysis of the water withdrawal rate. 26 down scale model experiments were conducted, applied to on-site. On-site and the model water withdrawal rate was compared and analyzed. The down scale model was produced at 1/15 the size of the on-site sand dam, excluding the water collecting pipe, and the water collecting pipe was produced at 1/5 the size due to durability issues. The error of the average inflow compared to the theoretical storage of the model was similar to the theoretical storage with a difference of about 1.3%. The intake rate was 80.8% in the model experiment and 77.7% in the on-site. The difference of 3.1% appears to be due to the hydrological environment and the material of the sand dam structure. If a down scale model that can become a standard for future sand dam systems is built, the applicability of sand dams to new water welfare blind areas will be increased. In addition, if the loss of sand dam evaporation according to seasonal characteristics is also evaluated, it is judged that a clear basis for the safety rate of the water quantity required for sand dam operation can be prepared.

Key words: sand dam, lab scale experiment, field experiment, water withdrawal rate assessment

[‡]Corresponding author: +82-31-910-0334, E-mail: imchung@kict.re.kr

1. 서론

우리나라는 기후변화의 영향으로 극심한 이상 가뭄이 빈번하게 발생하고 있으며, 미래(2061~2090년)에는 과거(1997~2006년)에 비해 가뭄의 발생 기간이 3배 이상 증가할 것으로 분석되고 있다(Min *et al.*, 2003). 최근 2~3년마다 가뭄이 발생하고 있으며, 약 7년의 주기로 극한 가뭄이 발생하고 있다(Min *et al.*, 2003). 더욱이, 우리나라 내륙지역의 가뭄 피해는 산간 지역에서 발생하고 있다. 유역의 상류지역은 산지로 고지대에 있어서 경제성 등의 이유로 광역 상수도의 보급이 어려워져 대부분 소규모 수도 시설에 의존하고 있다. 산간지역 등 경사가 가파른 지역에서는 강우 발생시 지표 유출이 빠른 속도로 발생한다(Ryan and Elsner, 2016). 또한, 상류지역은 취수원 보호구역의 설정 등으로 저류시설의 개발이 불가능하여 건기시 물 공급이 어려워 새로운 수자원 확보방안 마련이 시급하다. 또한, 우리나라의 산간지역의 가뭄은 봄, 여름의 고온, 무강우에 의해서 발생할뿐만 아니라 수량이 부족한 겨울철 낮은 온도로 쉽게 결빙 현상이 발생하여 용수 공급이 어렵다. 최근 2016년의 강원도에서는 상류 하천의 결빙으로 약 3,800명이 최소한의 생활용수도 부족하여 급수차를 이용한 용수 공급을 받는 피해가 발생하였다. 광역 상수도 미보급지역 및 소규모 수도시설지역은 가뭄 취약지역으로서 안정적 수원 확보를 위한 기술 개선이 요구된다.

새로운 수자원 확보방안으로 지하수담 개발이 있다(Quilis *et al.*, 2009; Jadhav *et al.*, 2012; De Trinchiera *et al.*, 2016; Yifru *et al.*, 2021). 지하수담은 지하수가 흐르는 대수층을 대상으로 차수벽을 설치하여 수자원을 확보하고 활용할 수 있는 시설물이다(Aerts *et al.*, 2007; Lasage *et al.*, 2015; Hatem, 2016; Yifru *et al.*, 2018). 지하수담은 설치형태와 취수방식에 따라 지하담과 샌드담으로 구분된다(Sivils and Brock, 1981). 지하담은 대수층을 대상으로 지하에 차수벽을 설치하고, 확보된 지하수를 우물을 통해 양수하는 방식을 이용한다. 샌드담은 계곡부 혹은 하천을 이용하여 차수벽을 설치하고 물을 차집하여 취수관을 통해 확보한다(Hanson and Nilsson, 1986). 최근 우리나라의 광역 상수도 보급이 어렵고, 강우 발생시 빠른 유출로 저류가 어려우며 겨울철에는 하천의

결빙이 발생하는 산간의 상시 가뭄지역에 샌드담을 설치하여 수자원 확보시설로 활용하고자 하였다(Yifru *et al.*, 2022). 샌드담의 설치 지역은 춘천시 북산면 물로리 일대로 유역의 최상류에 속해있다. 산간 지역의 특성상 하천을 횡단하여 샌드담을 설치하면 풍수기에 상류에서의 토석류의 영향으로 유지관리가 어렵고, 하천 수위의 증가 등으로 홍수 피해가 발생할 수 있어 간접적으로 하천수를 활용하는 바이패스 형태로 샌드담을 설치하였다(Chung and Lee, 2021). 하천수를 간접적으로 이용하는 시설물이기 때문에 안정적인 수원의 공급을 위해서는 정량적인 취수율 분석이 이뤄져야 한다. 샌드담의 취수율을 정량화하기 위해서는 채움재의 특성을 분석하고, 설치된 현장에서 지속적인 실험 및 관측이 이뤄져야 한다. 하지만, 현장의 샌드담 시설물은 완공 후 마을 주민의 용수 공급원으로 활용해야 하므로 다양한 현장 실험은 현실적으로 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 취수율의 정량적인 분석을 위해 축소 모형을 제작하여 여러 차례의 실험을 진행하고, 이를 기초로 현장에 적용하였다.

2. 연구방법

샌드담의 적용성을 높이기 위해 취수율의 정량적인 평가가 필요하다. 현장에서 취수율을 산정하기 위해서는 많은 횟수의 실험을 진행해야 하지만, 현실적인 여건상 샌드담 완공 이후에는 다양한 실험은 불가능하다. 본 연구에서는 샌드담의 취수율을 평가하기 위해 실험실 규모의 모형을 제작하여 충분한 실험을 진행한 이후 현장 적용 결과와 비교하였다.

2.1 샌드담 설계

샌드담 적용 지역인 춘천시 북산면 물로리 지역은 급경사 지형이며 계곡부 일부가 사유지에 포함되어 설계에 많은 제약조건이 있다. 사유지의 산지를 사용하여 계곡부에 직접 설치하면 지표 유출에 대해서 풍수기에 월류시 피해가 발생할 수 있다. 계곡부의 하도를 차단하면 토석류로 인해 시설물의 안정성 문제가 발생하고, 채움재의 유실 및 상부 퇴적물로 인한 폐색 현상이 발생할 수 있다. 계곡에서 발생하는 지표 유출은 배제하고 주변의 충적층을 활용하여 샌드담으로 지하수의 흐름을 유도하는 바이패스형

으로 설계를 진행하였다. 바이패스형 샌드댐은 기존의 취수시스템을 최대한 활용하고, 주변의 계곡 및 산지에서의 배후 지하수 또한 활용할 수 있다. 샌드댐의 면적은 120 m²으로 기존 취수원에서 월류된 수량이 유입되고, 샌드댐 하단으로 배후 지하수가 유입된다(그림 1). 샌드댐 내부의 채움재는 전체 1.75 m로 하층에서부터 0.8 m, 중층 0.8 m, 상층 0.15 m로 구성되어 있다. 하층은 입자크기 2~5 mm 주문진 규사, 중층은 입자크기 1~2 mm 주문진 규사, 상층

은 입자크기 25 mm 잔자갈로 구성되어 있으며, 샌드댐의 월류 높이는 1.9 m 이다(그림 2).

2.2 집수관 설계

집수관 구경은 취수 요구량에 따라 식 (1)을 이용하여 개략적으로 검토하여 산정할 수 있다(Driscoll, 1986).

$$D_{\min} \geq 1.19\sqrt{Q} \tag{1}$$



Fig. 1. Location of hydrological component around the sand dam and their area.

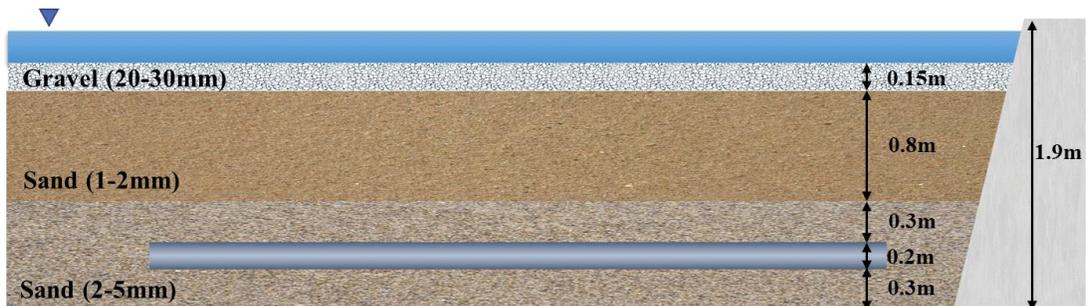


Fig. 2. Configuration of fill materials for each sand dam layer.

Table 1. Diameter of collecting pipe (D_{min}) according to inflow rate through collecting pipe (Q).

Q (m ³ /day)	D_{min} (m)
100	0.041
150	0.050
200	0.057
250	0.064
300	0.070
400	0.081
500	0.091

여기에서 D_{min} 은 집수관의 최소 구경(m), Q 는 요구수량 또는 집수관 유입물량(m³/s)를 나타낸다. 식 (1)은 비교적 대용량 시설 검토 시 사용되는 공식이고, 집수관 구경이 작을수록 폐색 현상에 의한 유입면적의 급격한 감소가 발생할 수 있다. 집수관의 구경은 하루 100 m³을 생산한다고 가정하였을 때 최소 41 mm 이상으로 적용해야 한다. 표 1은 요구수량에 따른 집수관의 최소 구경이다. 샌드담에 적용한 집수관은 폐색에 대한 안전율, 시공성, 유지관리, 제품 조달 등을 고려하여 200 mm로 결정하였다.

집수관의 길이는 집수매거 산출량 산정공식(Driscoll, 1986)인 식 (2)를 사용하였다.

$$L = \frac{0.366 Q \log \frac{1.1d}{0.5D}}{0.25KH} \quad (2)$$

여기에서 L 은 집수관의 길이(m), Q 는 집수관 유입량(m³/day), d 는 집수매거의 매설 깊이(m), D 는 집수관의 구경(m), K 는 여재층의 투수계수(m/day), H 는 집수매거의 매설 깊이와 하천수심의 합(m)이다. 집수관 길이는 여재층의 수리전도도에 의해 좌우되는 특징을 가진다. 여재층은 주문진 규사로 실내시험결과 수리전도도는 1.0×10^{-2} cm/s로 나타났으나, 장기운영에 따른 세립입자의 퇴적에 따른 투수성 감소가 발생할 것으로 예상하여 안전율을 고려하여 2.0×10^{-3} cm/s를 적용하였다. 집수관 길이는 16.1 m로 산정되었으며, 샌드담의 집수관은 8 m \times 2열, 총 16 m를 설치하는 것으로 결정하였다.

2.3 채움재 구성

샌드담을 구성하는 채움재는 담의 규모에 따라 수

량이 달라진다. 샌드담 시공 비용의 많은 부분이 채움재의 수량에 따라 달라지며, 현장 인근에서 구할 수 있는 육상골재는 경제적인 측면에서는 유리하나 주문진 규사와 비교할 경우 세립분 함량이 높아서 유지관리 측면에서 문제가 발생할 수 있다. 채움재의 구성은 탁도 저감에 효과적이며 유지관리에 용이할 수 있도록 다단식으로 구성하였다. 정량적인 취수율 산정을 위해 채움재의 공극률 산정이 선행되어야 하며, 다단식으로 구성된 채움재의 공극률은 실내시험 결과를 활용하였다. 공극률은 간이시험법, 단위 용적 질량 시험법(KS F 2505)을 통해 분석하였으며, 채움재 상부에 0.15 m를 차지하고 있는 잔자갈에 대한 공극률은 분석결과가 없어 잔자갈보다 공극률이 작을 것으로 예상되는 입자크기 2~5 mm의 분석결과 값을 적용하였다. 분석결과 입자크기 1~2 mm의 공극률은 39.1%로 나타났으며, 입자크기 2~5 mm의 공극률은 45.1%로 나타났다. 표 2는 단위중량시험 결과이다.

2.4 실내 실험 모형 설계

샌드담 실내 실험 모형은 현장 샌드담 중 기존 취수원과 하류의 월류부까지 모사하였다. 현장 샌드담은 두 개의 유공관을 통해 유출되나 모형에서는 하나의 유공관만 모사하였다. 현장 샌드담의 유입원은 두가지로 기존 취수원에서 월류되어 샌드담의 상부로 유입되는 수량과 배후 지하수에서 샌드담 하부로 유입되는 수량이 있다. 그림 3은 현장의 샌드담을 실험 모형으로 모사하기 위한 범위를 나타내고 있다. 전체 스케일은 현장의 치수 길이에 대해서 1/15로 구성하였다. 유공관의 크기는 타공 및 내구성의 문제로 현장 치수의 축소를 진행하기 어려워 제작의

Table 2. Result of unit weight test.

Sample	W_n (%)	ρ_s (g/m ³)	Test type				Porosity	
			Simple test method		Unit volume mass test method (KS F 2505)		Simple test method	Unit volume mass test method (KS F 2505)
			γ_t (g/m ³)	γ_d (Calculated) (g/m ³)	γ_t (Calculated) (kg/L)	γ_d (kg/L)	(%)	(%)
Sand (1~2 mm)	0.6	2.554	1.564	1.554	1.567	1.557	39.1	39.0
	0.5	2.556	1.564	1.557	1.562	1.555	39.1	39.2
	0.5	2.556	1.565	1.557	1.562	1.554	39.1	39.2
Sand (2~5 mm)	1.7	2.580	1.437	1.413	1.443	1.419	45.2	45.0
	1.7	2.578	1.439	1.414	1.444	1.420	45.1	44.9
	1.6	2.580	1.437	1.415	1.442	1.419	45.2	45.0

W_n : Water content
 ρ_s : Bulk density
 γ_t : Total unit weight
 γ_d : Dry unit weight

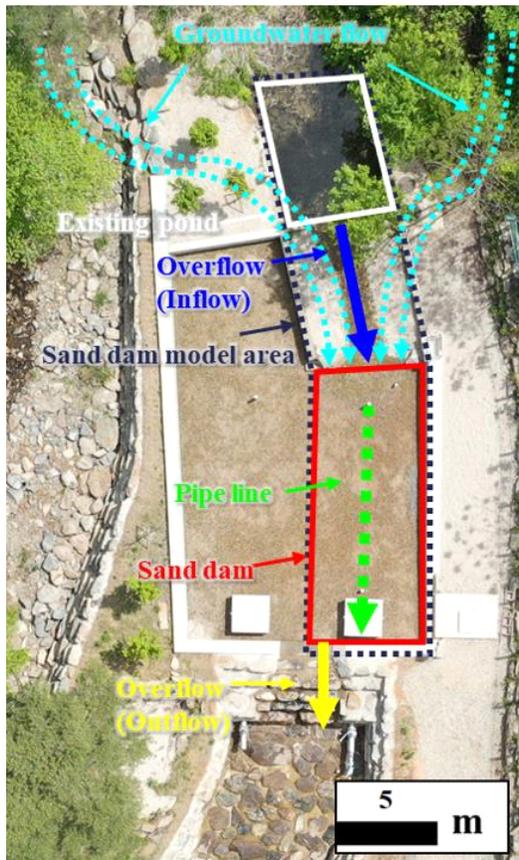


Fig. 3. Experimental model simulation section of on-site sand dam.

편의성을 위해 1/5인 4 cm로 제작하였다. 월류 높이는 1.9 m 기준 1/15인 0.127 m이지만, 아크릴의 특성상 물과의 점착력으로 인해 월류가 수월하게 발생하지 못하여 0.123 m로 조정하였다. 기존 취수원을 통해 샌드댐 상부로 유입되는 수량과 배후 지하수에서 샌드댐 하부로 유입되는 수량을 모사하기 위해 유입 수조는 두 개로 나누어 배치하였다. 샌드댐 내부의 채움재는 현장의 채움재를 사용하였으며, 공급률은 표 2의 결과를 활용하였다. 그림 4는 샌드댐 실험 모형의 설계 도면이다. 표 3은 현장의 샌드댐 수치와 실험 모형의 수치를 비교하였다.

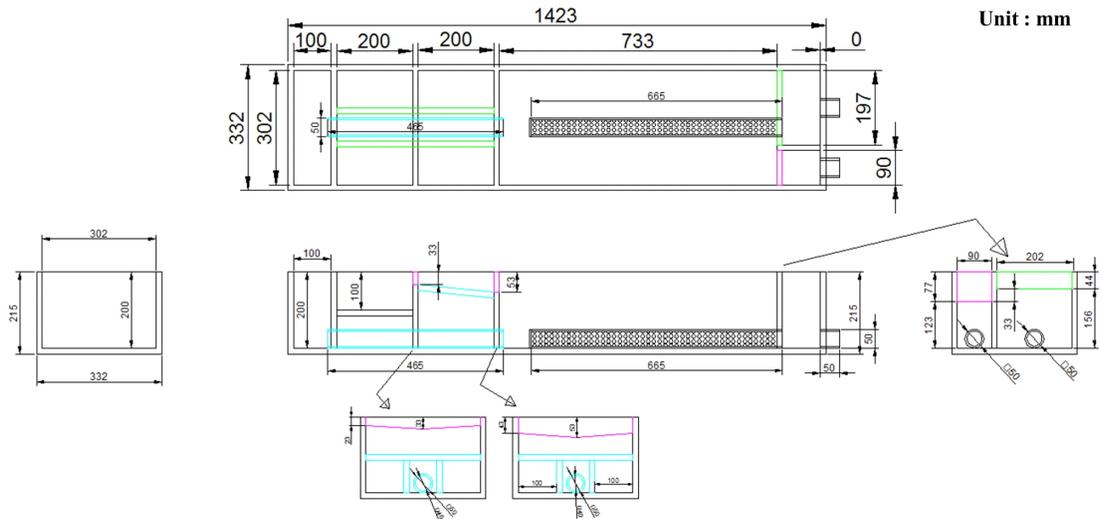
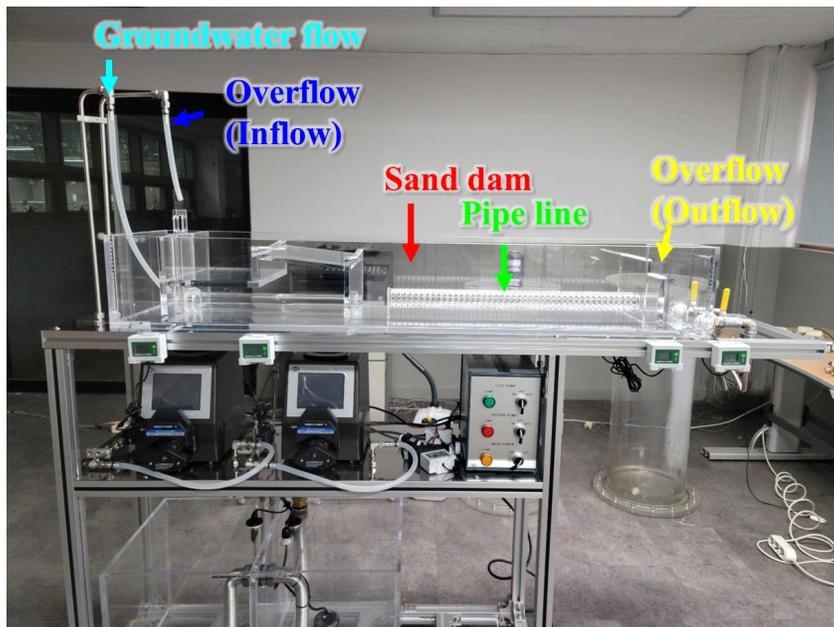
3. 연구결과

3.1 샌드댐 실험 모형 구성

샌드댐 실험 모형은 아크릴을 이용하여 제작하였다. 두 개의 펌프를 이용하였으며, 각각의 펌프는 샌드댐 상부로 유입되는 월류량과 하부로 유입되는 배후 지하수의 공급원으로 사용하였다(그림 5). 유공관은 채움재의 유입을 막기 위해 투수성이 높은 스크린을 설치하였다. 현장의 시료를 이용하여 두 개의 층으로 채웠으며(그림 6a), 월류를 통한 샌드댐 상부의 유입을 확인하였다(그림 6b). 지하수를 통한 샌드댐 하부의 유입(그림 6c)과 유공관을 통한 유출

Table 3. Measurement of the sand dam on-site and experimental model.

	On-site	Experimental model
Width (m)	4.5	0.302
Length (m)	11.0	0.733
Overflow height (m)	1.9	0.123
Pipe diameter (m)	0.2	0.040

**Fig. 4.** Schematic of the sand dam experimental model.**Fig. 5.** Experimental model of the sand dam.

을 확인하였다(그림 6d). 채움재의 구성은 실험 모형 구성의 특성상 3개의 층으로 구성하기에는 높이의 제한이 있으며, 낮은 채움재층은 현장과는 다른 유동 특성을 보일 수 있어 두 개의 층으로 구성하였다. 현장의 채움재 유실을 막기 위한 25 mm 자갈층은 제외하였다. 샌드댐 모형의 전체 채움재의 높이는 0.105 m이고, 유공관 하부까지의 높이는 0.097 m이다. 채움재의 순서 및 두께는 현장의 순서와 공극률에 맞춰 구성하였고, 표 4에 자세한 제원을 제시하였다. 유공관 주변인 하부층에는 공극률이 높은 채움재를 구성하였고, 상부에는 공극률이 낮은 채움재를 구성하였다. 현장과 실험 모형 간의 채움재의 이론적인 공극률 차이는 약 0.22% 실험 모형이 큰 것으로 나타났다. 공극률을 이용하여 샌드댐 내부 채움재의 저류량을 분석하고, 유공관을 통해 유출되는

양을 취수량으로 측정하였다.

3.2 샌드댐 실험 모형을 통한 취수율 분석

샌드댐 모형의 취수율을 분석하기 위해 샌드댐 하부에서 월류가 일어나기 전까지 수위인 0.122 m까지의 유입과 유공관 하부 수위 지점까지의 유출에 대해서 모의하였다. 유입과 유출에 대해서 각각 26 번의 실험을 진행하였으며, 유입은 샌드댐 상부로 유입되는 펌프를 이용하여 최대량인 2.16 m³/day로 고정하여 측정하였다. 샌드댐의 내부는 하부로부터 월류까지의 높이가 0.123 m로 제작하였다. 0.097m가 채움재에 의한 유공관으로 유입되는 양이다. 월류전 수위는 0.122 m이고, 하부로부터 0.02 m 위에 설치되었으며, 유공관의 두께 0.005 m를 제외하면 0.097 m가 채움재에 의한 유입량이다. 따라서, 샌드



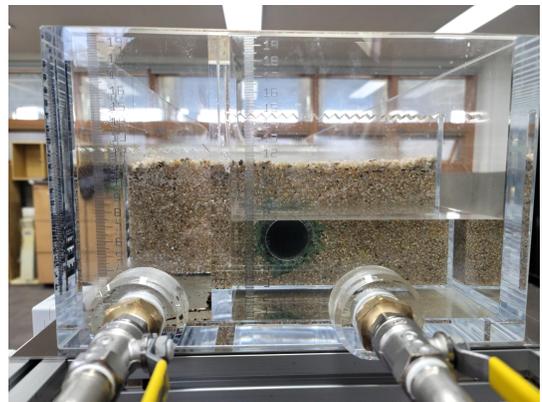
(a) Fill layer using on-site material



(b) Inflow through overflow



(c) Inflow through groundwater flow



(d) Outflow through intake pipe

Fig. 6. Detailed component of the sand dam experimental model.

Table 4. On-site and experimental model layer configuration.

On-site			Model		
Layer material	Height (m)	Porosity (%)	Layer material	Height (m)	Porosity (%)
Gravel (25 mm)	0.15	45	Sand (1~2 mm)	0.05	39
Sand (1~2 mm)	0.80	39	Sand (2~5 mm)	0.047	45
Sand (2~5 mm)	0.50	45			
Average porosity (%)		41.69	Average porosity (%)		41.91

댐 실험 모형의 유입/유출 실험은 샌드댐 하부로부터 0.122 m까지를 기준으로 산정하였다. 상부로부터 물만 존재하는 구간을 0.005 m, 입자크기 1~2 mm 모래 구간이 0.05 m 공극률 0.39, 입자크기 2~5 mm 모래 구간 0.047 m 공극률 0.45로 설정하였다. 따라서, 샌드댐 모형의 이론적인 저류량(S)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 S &= \sum_{i=1}^n A t_i n_i = (0.221 \text{ m}^2 \times 0.005 \text{ m}) \\
 &+ (0.221 \text{ m}^2 \times 0.05 \text{ m} \times 0.39) \\
 &+ (0.221 \text{ m}^2 \times 0.047 \text{ m} \times 0.45) \\
 &= 10.09 \times 10^{-3} \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

여기에서 A 는 샌드댐 하부의 면적(m^2)을 나타내고, t 는 채움재의 두께(m), n 은 채움재의 공극률(%), i 는 샌드댐 상부에서부터의 채움재 순서를 나타낸다.

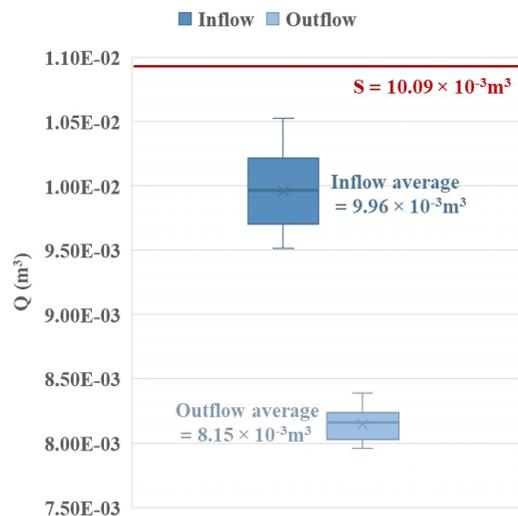
샌드댐 모형의 이론적인 저류량은 $10.09 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 이었으며, 평균 유입량은 $9.96 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 으로 나타났다. 이론적인 저류량 대비하여 실험 평균 유입량은 98.7%로 약 -1.3%의 오차가 나타나 이론 값과 매우 유사함을 나타냈다. 이론적인 저류량과 최대, 최소 유입량은 각각 4.3%, -5.6% 오차가 발생하는데, 오차의 발생 원인은 지속적인 실험을 진행함에 있어 채움재의 공극에 토양 수분량의 불확실성 때문으로 보여진다.

유출량은 유량 측정이 가능한 $0.01 \text{ m}^3/\text{day}$ 미만 지점까지 측정하였다. 유출량의 평균은 $8.15 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 로 나타났으며, 최대 유출량은 $8.39 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, 최소 유출량은 $7.96 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 이다. 샌드댐 모형의 유출량

은 현장에서의 취수량으로 나타낼 수 있으며, 모형의 취수율은 80.8%로 나타났다. 그림 7은 모형 실험의 유입량 유출량을 박스플롯으로 나타낸 결과이다.

3.3 현장 실험을 통한 샌드댐 취수량 측정

취수량 평가는 샌드댐 만수위까지 저류한 뒤 유입조건을 모두 차단한 상태에서 실험을 실시하였다(그림 8a). 유입조건 차단을 위해 기존 취수원의 월류되는 물을 하류방향으로 우회하여 신규 샌드댐으로 유입되지 않도록 하였다(그림 8b). 취수량 측정은 샌드댐 하부에 설치된 유지관리용 배관에 설치된 100 mm 적산유량계를 이용하였다. 시험종료는 집수정내 수위가 수평집수관 하단까지 낮아져 공급능력이 $10 \text{ m}^3/\text{day}$ 이내로 떨어지는 시점을 종료시점

**Fig. 7.** Model experiment's inflow & outflow.

으로 결정하였다. 실험은 2021년 9월 30일 14:00에 시작하여 2021년 10월 3일 09:50에 종료되었다. 총 시험시간은 67시간 50분이며, 시작 시점의 적산유량계는 889.64 m³이고(그림 9a), 종료 시점에는 959.98 m³으로(그림 9b) 총 취수량(Q)는 70.34 m³으로 계측되었다.

3.4 현장 샌드댐의 취수율 분석

현장 샌드댐의 이론적인 저류량을 분석하기 위해 채움재의 제원은 표 2를 참고하였으며, 샌드댐의 내부는 하부로부터 월류까지의 높이가 1.9 m인데, 취수를 위한 유공관은 하부로부터 0.3 m 위에 위치하며, 채움재로부터 월류될 때까지 0.15 m의 공간이 존재하여 채움재의 높이는 1.45 m이다. 따라서, 현

장 샌드댐의 이론적인 저류량(S)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 S &= \sum_{i=1}^n At_i n_i = (120 \text{ m}^2 \times 0.15 \text{ m}) \\
 &\quad + (120 \text{ m}^2 \times 0.15 \text{ m} \times 0.45) \\
 &\quad + (120 \text{ m}^2 \times 0.8 \text{ m} \times 0.39) \\
 &\quad + (120 \text{ m}^2 \times 0.5 \text{ m} \times 0.45) \\
 &= 90.54 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

여기에서 A는 샌드댐 하부의 면적(m²)을 나타내고, t는 채움재의 두께(m), n은 채움재의 공극율(%), i는 샌드댐 상부에서부터의 채움재 순서를 나타낸다. 현장 샌드댐의 이론적인 저류량은 90.54 m³으로 나타났으며, 취수량은 70.34 m³으로 취수율은 77.7



(a) Sand dam full recharge condition



(b) No inflow condition

Fig. 8. Initial condition for on-site experiments.



(a) Start point



(b) End point

Fig. 9. Flowmeter in on-site experiment.

Table 5. Analysis of sand dam's water withdrawal rate.

Parameter	On-site	Model
Fill material's average porosity (%)	41.69	41.91
Storage (m ³)	90.54	10.09×10 ³
Water withdrawal (m ³)	70.34	8.15×10 ³
Water withdrawal rate (%)	77.69	80.77

%로 나타났다.

4. 결 언

지하수댐 개발 방법 중 샌드댐의 원리를 이용하여 우리나라의 상시 가뭄 지역인 춘천시 북산면 물로리 일대에 적용하였다. 물로리는 유역 최상류의 산간지역으로 가뭄에 매우 취약하다. 샌드댐 설치에 따른 채움재 취수율의 불확실성을 최소화하기 위해 축소 모형을 제작하여 여러 차례 실험을 진행하고, 현장에 적용하였다.

축소 모형은 집수관을 제외하고 현장 샌드댐의 1/15 크기로 제작하였으며, 집수관은 내구성 등의 문제로 1/5 크기로 제작하였다. 채움재는 두 개의 층으로 구성하였으며, 현장의 채움재 유실을 막기 위한 25 mm 자갈층은 제외하였다. 현장과 실험 모형간의 채움재의 이론적인 공극률 차이는 약 0.22% 실험 모형이 큰 것으로 나타났다. 채움재의 공극률을 이용하여 저류량을 분석하고, 유공관을 통해 유출되는 양을 취수량으로 측정하였다. 샌드댐 모형의 이론적인 저류량 대비 평균 유입량의 오차는 약 1.3% 차이로 이론적인 저류량과 유사하게 나타났다. 오차의 범위는 -5.6%에서 4.3%까지 나타났는데, 채움재 내부의 공극의 수분량에 따라 오차가 발생한 것으로 보여진다. 유출 실험을 통해 샌드댐 모형의 저류량 대비 유출량은 80.8%로 나타났으며, 모형실험에서의 유출량은 현장에서의 취수량으로 나타낼 수 있다. 따라서, 모형실험에서의 취수율은 80.8%로 나타났다.

현장 샌드댐의 총 취수율인 저류량 대비 취수율은 77.7%로 나타났다. 현장 샌드댐의 취수율에 대비하여 모형 샌드댐이 약 3.1% 높게 나타났으며, 현장과 모형은 수문학적 환경과 샌드댐 구조물 재료의 차이가 있다. 현장은 샌드댐이 직사광선에 노출되어

있으며, 바람의 영향으로 증발이 일어나기 쉬운 조건이었다. 또한 현장의 실험은 67시간 50분이라는 긴 시간동안 이루어져 상대적으로 증발에 대한 영향이 더 컸을 것이다. 모형의 실험 시간은 15분 내외의 짧은 시간에 이루어졌으며, 실내의 밀폐된 공간에 위치하고 있기 때문에 상대적으로 증발에 대한 영향이 적었다. 재료의 차이는 현장의 샌드댐 구조물은 시멘트로 구성되어져있는 반면에 모형은 아크릴로 이루어져 있어 완전 불투수면을 이루고 있어 상대적으로 높은 회수율을 나타냈다고 판단된다.

취수율은 저류량 대비 취수량의 비율로 샌드댐의 지속가능한 용수 공급원으로 사용 가능한지를 판단할 수 있는 기준이 될 수 있다. 샌드댐 취수율의 정량적인 평가는 가뭄에 취약한 물 복지 사각지대를 대상으로 샌드댐의 보급을 위해서는 반드시 필요하다. 지역적인 특성에 따라 구조물의 형태 등은 변경되어야 하며, 각각의 특성에 따라 채움재의 구성도 변경이 필요하다. 취수율의 정량적 평가와 더불어 샌드댐 시스템의 표준화가 필요하다. 추후 샌드댐 시스템의 표준이 될 수 있는 실내 모형을 구축한다면, 신규 물 복지 사각 지역에 샌드댐의 적용성을 높일 수 있을 것이다. 또한, 현장과 동일한 채움재에 대해서 실험을 진행하였지만 추후에는 채움재의 조합에 따른 취수율과 더불어 오염물 저감효과 등 다양한 기준을 만족하는 정량적인 평가가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 계절 특성에 따른 샌드댐의 증발에 대한 손실량 평가가 함께 이루어진다면, 샌드댐 운영에 필요한 수량의 안전율에 대한 명확한 근거를 마련할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술의 수요대응형 물공급서비스사업의 지원(과제번

호 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.
- 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).
- De Trincheria, J., Wibbing, J., Leal Filho, W. and Otterpohl, R., 2016, Practical recommendations to prevent, restore and rehabilitate silted-up sand storage dams in arid and semi-arid areas. In *RWSN Forum*, Abidjan, Cote d'Ivoire.
- Driscoll, F.G., 1986, *Groundwater and wells*. St. Paul, MN: Johnson Division, 1089.
- Hanson, G. and Nilsson, Å., 1986, *Ground-Water Dams for Rural-Water Supplies in Developing Countries*. *Groundwater*, 24, 497-506.
- Hatem, A., 2016, Experimental investigation about the effect of sand storage dams on water quality. *International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology*, 28, 485-491.
- Jadhav, M.V., Shaikh, A.P., Gite, B.E. and Yadav, A.P., 2012, Sand dam reservoir-Need of semi arid areas. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2, 1690-1694.
- Lasage, R., Aerts, J.C., 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.
- Min, S.K., Kwon, W.T., Park, E.H. and Choi, Y., 2003, Spatial and temporal comparisons of droughts over Korea with East Asia. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 23, 223-233.
- 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.
- Ryan, C. and Elsner, P., 2016, The potential for sand dams to increase the adaptive capacity of East African drylands to climate change. *Regional Environmental Change*, 16, 2087-2096.
- Sivils, B.E. and Brock, J.H., 1981, Sand dams as a feasible water development for arid regions. *Journal of Range Management Archives*, 34, 238-239.
- Yifru, B.A., Chung, I.M., Kim, M.G. and Chang, S.W., 2022, Augmenting freshwater availability in mountain headwater streams: Assessing the sustainability under baseline and future climate change scenarios. *International Soil and Water Conservation Research*, 10, 293-307.
- Yifru, B.A., Kim, M.G., Chang, S.W., Lee, J. and Chung, I.M., 2018, Numerical modeling of the effect of sand dam on groundwater flow. *The Journal of Engineering Geology*, 28, 529-540.
- 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, <https://doi.org/10.3390/su13115905>.

Received : November 22, 2022

Revised : December 26, 2022

Accepted : January 6, 2023