



## Analysis of the effect of long-term water supply improvement by the installation of sand dams in water scarce areas

Chung, Il-Moon<sup>a</sup> · Lee, Jeongwoo<sup>b\*</sup> · Lee, Jeong Eun<sup>c</sup> · Kim, Il-Hwan<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Senior Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

<sup>b</sup>Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

<sup>c</sup>Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

<sup>d</sup>Postdoctoral Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

Paper number: 22-097

Received: 15 October 2022; Revised: 25 October 2022; Accepted: 25 October 2022

### Abstract

The Chuncheon Mullori area is an underprivileged area for water welfare that does not have a local water supply system. Here, water is supplied to the village by using a small-scale water supply facility that uses underground water and underground water as the source. To solve the problem of water shortage during drought and to prepare for the increasing water demand, a sand dam was installed near the valley river, and this facility has been operating since May 2022. In this study, in order to evaluate the reliability of water supply when a sand dam is assumed during a drought in the past, groundwater runoff simulation results using MODFLOW were used to generate inflow data from 2011 to 2020, an unmeasured period. After performing SWAT-K basin hydrologic modeling for the watershed upstream of the existing water intake source and the sand dam, the groundwater runoff was calculated, and the relative ratio of the monthly groundwater runoff for the previous 10 years to the monthly groundwater runoff in 2021 was obtained. By applying this ratio to the 2021 inflow time series data, historical inflow data from 2011 to 2020 were generated. As a result of analyzing the availability of water supply during extreme drought in the past for three cases of demand 20 m<sup>3</sup>/day, 50 m<sup>3</sup>/day, and 100 m<sup>3</sup>/day, it can be confirmed that the reliability of water supply increases with the installation of sand dams. In the case of 100 m<sup>3</sup>/day, it was analyzed that the reliability exceeded 90% only when the existing water intake source and the sand dam were operated in conjunction. All three operating conditions were evaluated to satisfy 50 m<sup>3</sup>/day or more of demand based on 95% reliability of water supply and 30 m<sup>3</sup>/day or more of demand based on 99% of reliability.

**Keywords:** Water supply capacity, Sand dam, Reliability, Drought, SWAT-K

## 물부족 지역에서 샌드댐 설치에 의한 장기 물공급 개선 효과 분석

정일문<sup>a</sup> · 이정우<sup>b\*</sup> · 이정은<sup>c</sup> · 김일환<sup>d</sup>

<sup>a</sup>한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 선임연구위원, <sup>b</sup>한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 연구위원

<sup>c</sup>한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 수석연구위원, <sup>d</sup>한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 박사후연구위원

### 요 지

춘천 물로리 지역은 지방상수도 보급되지 않은 물복지 소외지역으로 복류수 및 지하수를 수원으로 하는 소규모 급수시설로 마을에 물을 공급하고 있다. 가뭄시 물부족 문제를 해결하고 증가하는 물수요에 대비하기 위해 계획에 연하여 샌드댐을 설치하였으며, 2022년 5월부터 이 시설을 운영하고 있다. 본 연구에서는 과거 가뭄시 샌드댐이 있을 경우의 물공급 신뢰도를 평가하기 위해 MODFLOW모형을 이용한 지하수유출량 모의결과를 활용하여 미계측 기간인 2011년부터 2020년까지의 유입량 자료를 생성하였다. 기존 취수원과 샌드댐이 위치한 곳의 상류부 유역에 대해 SWAT-K 유역수문모델링을 수행하여 지하수유출량을 산정하고, 2021년 월별 지하수유출량에 대한 그 이전 10년 동안의 각 월별 지하수유출량의 상대적 비율을 구한 후 2021년 유입량 시계열 자료에 이 비율을 적용하여 2011년부터 2020년까지의 과거 유입량 자료를 생성하였다. 수요량 20 m<sup>3</sup>/일, 50 m<sup>3</sup>/일, 100 m<sup>3</sup>/일 세 가지 경우에 대해 과거 극한 가뭄시의 물공급 가능여부를 분석한 결과, 샌드댐 설치로 물공급 신뢰도가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 수요량 100 m<sup>3</sup>/일인 경우에는 기존 취수원과 샌드댐을 연계 운영해야만 신뢰도 90%를 넘는 것으로 분석되었다. 세 가지 운영조건 모두 물공급 신뢰도 95%를 기준으로 수요량 50 m<sup>3</sup>/일 이상, 신뢰도 99%를 기준으로 수요량 30 m<sup>3</sup>/일 이상을 만족하는 것으로 평가되었다.

**핵심용어:** 물공급, 샌드댐, 지하수 모델링, 배수량

\*Corresponding Author. Tel: +82-31-910-0529

E-mail: ljw2961@kict.re.kr (Lee, Jeongwoo)

## 1. 서론

우리나라의 상수도 공급률은 약 98%에 달하나 2%에 해당하는 상수도 미보급 지역에서의 물부족 문제는 상존하고 있다. 최근 기후변화로 약 7년 주기의 극한 가뭄이 도래하는데 이와 같은 물공급 사각지대에서는 그야말로 처절한 어려움을 겪어내고 있다. 대도시에 사는 주민들은 가뭄이 와도 넉넉한 상수도 공급혜택으로 물걱정을 하지 않고 살고 있으나 하천의 최상류에 거주하는 주민들에겐 큰 걱정이 아닐 수 없다. 지방·광역상수도에 비해 소규모 수도시설은 낮은 수질 안전성과 상대적으로 가뭄에 취약한 특성을 가진다. 예를 들면, 2016년 강원도 가뭄시 계곡수 결빙으로 1,443세대 3,817명(22개 면, 44개 마을)이 급수차에 의한 물 공급(285회, 1,845톤)을 받는 등 극심한 불편이 발생한 바 있으며 전국의 계곡수 이용 시설은 622개소이나 이러한 시설을 확대하는 것은 외진 지역특성상 매우 어렵다(Kim *et al.*, 2020). 일례로 춘천시 북산면 물로리 일대에서 2016년 1월 겨울가뭄이 심해 40세대 주민이 큰 어려움을 겪고 수 킬로미터에 달하는 임시 호스를 통해 주민들이 직접 물을 이송하는 어려움을 겪은 바 있다(Yonhap News, 2016).

상수도 공급이 어려운 산간 고지대 지역에서는 계곡수 또는 지하수를 집수하여 사용하고 있다. 강원도 춘천시 물로리 지역은 계곡 인근에 집수조를 설치하여 지표하층을 통해 흐르는 복류수를 모아 마을에 물을 공급하고 있다. 이 지역은 가뭄이 발생하거나 동결기 결빙으로 인해 안정적인 물공급 측면에서 취약하다. 따라서 가뭄시 물부족과 증가하는 물수요에 대비하기 위해서 기존 취수원 직하류부에 샌드댐을 추가로 설치하였다. 이에 본 연구에서는 샌드댐의 물공급 개선효과를 정량적으로 평가하기 위한 다각적인 분석을 시도하였다. 샌드댐은 하천이나 계곡의 불투수성 기반암 위에 차수구조물을 횡단하여 설치하고, 확보된 공간에 모래와 같은 투수성 재료를



Fig. 1. Winter drought in Mullro-ri, Chuncheon (Yonhap News, 2016)

를 채운 후 그 공극에 물을 저장·사용하기 위한 이수시설로서 노출된 수자원에 비해 증발손실과 오염 취약성이 낮고 다공성매질의 여과기능으로 수질개선 효과가 있다(Aerts *et al.*, 2007; Hoogmoed, 2007; Lasage *et al.*, 2008; Quilis *et al.*, 2009; Quinn *et al.*, 2019; Yifru *et al.*, 2018). 또한 강원산간지역과 같이 겨울가뭄이 심한 곳에서는 계곡수 결빙으로 인해 취수에 제약이 있는데 샌드댐은 채움재내 저장된 물을 공급할 수 있는 등 동결심도에 제약이 적다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 연구지역 물공급체계

춘천시 물로리 일대 연구지역은 계곡 인근에 대략 가로 4m, 세로 5m, 깊이 1.9m의 취수조를 설치하여 복류수(일부 용천수 형태의 지하수 포함)를 집수하고, 집수된 물은 취수조 하단의 유공배수관과 연결된 관로를 통해 마을 물탱크로 유입된다. 물탱크에서는 식수 등 생활용수로 사용될 수 있도록 염소소독 처리 후 마을 민가로 보내진다. 그러나 산간 고지대 특성상 계곡 복류수를 수원으로 하는 소규모 수도시설에만 전적으로 의존하고 있어 평상시 최소한의 생활용수 외에 타용도의 용수 공급량 확보가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 증가하는 물수요를 만족하고 가뭄시 안정적 물공급을 위해 Fig. 2와 같이 기존 취수원(Existing Pond) 직하류부에 샌드댐(Sand Dam)을 신규로 건설하여 이 지역의 물공급 체계를 개선하고자 하였다.

샌드댐은 일반적으로 하천을 가로질러 차수벽을 설치하여 유송토사와 함께 유수를 저류시키고 그 물을 사용하는 이수목적의 구조물이다(Sivils and Brock, 1981; Chung and Lee, 2019). 그러나, 국내 산간 계곡부와 같이 급류지역에 설치할 경우 홍수시 구조물 안정성에 취약할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 구조물 안정성을 고려하여 샌드댐을 계곡 유수부에 직접 설치하지 않고, 계곡 인근에 기존 취수원과 연계하여 샌드댐을 건설하였다. 샌드댐 규모는 굴착, 가용 부지면적 등 현장 여건을 고려하여 평면적 면적 약 92m<sup>2</sup>, 높이 약 2.0m로 시공하였다. 샌드댐 바닥에서 0.3m 높이에 종방향으로 길이 약 8.0m의 두 줄의 유공관을 매설하였고, 이를 통해 물이 집수된 후 기존 취수원과 연결된 관로에 합류되어 마을 물탱크로 보내진다. 기존 취수원 내 수위가 일정 높이를 초과하면 밖으로 월류되고 있는데, 샌드댐에서는 이러한 월류량을 모래채움재 공극내로 다시 충전시켜 활용하게 된다. 샌드댐의 기능은 잉여수량의 인공함양에 따른 수자원 확보 외에 동결 방지, 증발산 저감, 수질 개선 효과 등을 함께 기대할 수 있다.

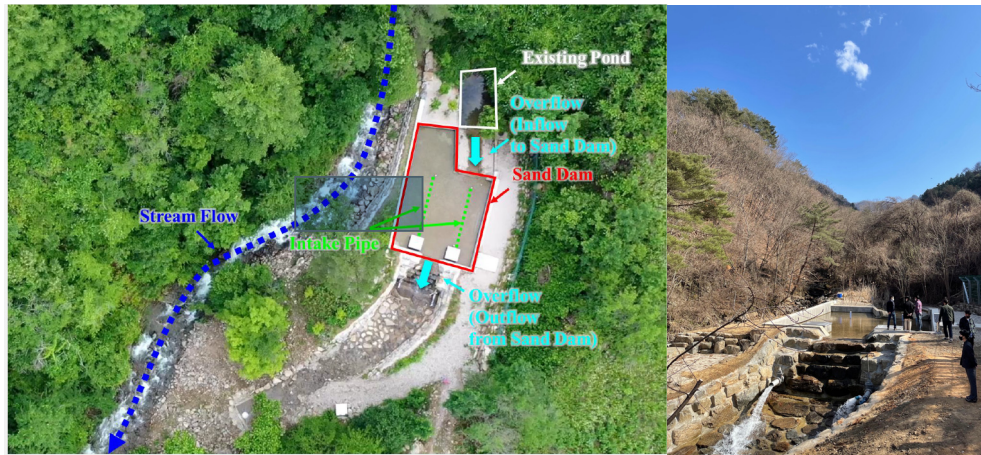


Fig. 2. Sand dam for water supply enhancement

## 2.2 해석 모형의 구축

### 2.2.1 샌드댐 유출추적

기존 취수원내에 압력식 수위자동관측 센서를 설치하여 Fig. 3(a)와 같이 1시간 단위의 수위자료를 획득하였으며, 배수관 및 위어를 통한 방류량과 수위와의 관계를 이용하여 관측 수위를 Figs. 3(b) and 3(c)와 같이 유량으로 환산하였다. 또한 수위 변화량에 수면적을 곱하여 기존 취수원의 저류량 변화량을 산정하였다. 이러한 방류량과 저류량 변화량 시계열 값을 유입량과 방류량의 차이는 저류량의 변화량과 같다는 질량보존 방정식에 대입하면 기존 취수원에서의 유입량 시계열 값 Fig. 3(d)와 같이 얻을 수 있다. 특히 기존 취수원의 위어를 통한 방류량 즉, Fig. 3(c)로 나타난 월류량은 샌드댐의 유입량이 되며, 이 유입량 조건에 따라 샌드댐에 대한 유출 추적을 수행하였다.

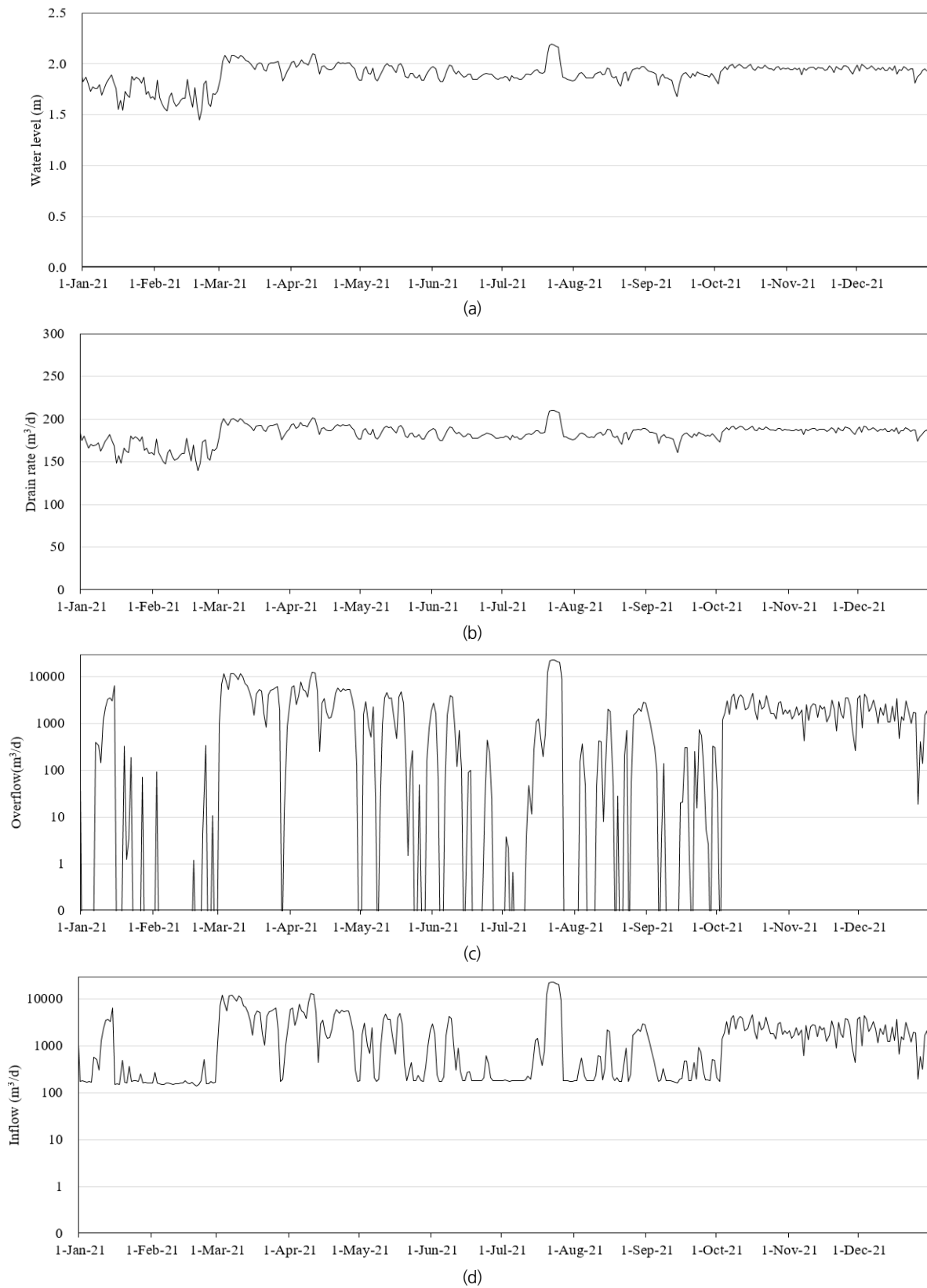
일반적으로 저수지의 수문학적 유출추적은 앞서 언급한 유입량과 방류량의 차이는 저류량 변화량과 같다는 질량보존 방정식을 이용하여 유입 수문곡선에 대한 저수위 및 방류량 수문곡선을 산정한다. 그러나 본 연구에서는 샌드댐 모래채움재내 유동을 고려하기 위해서 통상적인 수문학적 유출추적 방법 대신에 지하수 수치모델링을 통한 유출추적을 수행하였다. 지하수 수치모델링은 3차원 지하수 유동방정식의 수치해를 유한차분법으로 구하는 MODFLOW 모형(McDonald and Harbaugh, 1988)을 이용하였다.

Fig. 4와 같이 샌드댐 모델링 영역은 3개의 층으로 구분하고 하나의 셀 크기가 가로 × 세로 × 높이 1 m × 1 m × 0.8 m 로 총 276개 셀로 이산화하였다. 아래 2개의 모래채움재층은 수리전도도가 각각 172 m/일과 280 m/일인 피압/비피압 변환층으로 설정하였고, 최상부 1층은 실제 개수로 영역이나 수리전도도 50,000 m/일의 큰 값을 가진 투수성이 매우 큰 매질의 비피

압층으로 모사하였다. 계산 수두값에 따라 비피압 또는 피압 층이 되는 2층의 비산출율과 저류계수는 0.45와 0.0045로, 역시 비피압/피압 변환층인 3층의 비산출율과 저류계수는 0.39와 0.0039로 입력하였다. 그리고 1층 비피압층의 개수로임을 감안하여 비산출율값을 1.0로 설정하였다.

샌드댐 측면부와 바닥면은 불투수의 무흐름물(no-flux), 상부는 기존 취수원의 월류량이 거리에 반비례하게 분포되는 함양(recharge), 그리고 1층의 위어부와 3층의 유공배수관은 배수(drain) 경계조건을 부여하였다. 위어와 유공배수관을 통한 배수량(drain rate)은 각각 위어고와 배수관고로부터 수위 또는 수두에 비례하는 것으로 보고 그 비례계수인 배수계수 값은 모의 수위를 관측 수위에 적합시키는 검보정을 통해 산정하여 위어셀에 50,000, 유공배수관셀에는 7을 입력하였다. 초기조건으로 1층의 수위 및 2, 3층의 수두값은 1층 바닥고와 같게 놓았다(Chung *et al.*, 2022).

모의 기간은 기존 취수원에서 연속적인 수위 관측을 통해 유입량과 방류량을 산정한 2021년 뿐만 아니라 샌드댐의 장기간 운영에 따른 물공급 개선 효과를 분석하기 위해서 선행 10년을 확장하여 전체 2011년부터 2021년까지로 하였다. 2011년부터 2020년까지의 선행 10년 유입량 추정을 위해서 유역수문해석을 수행하였다. 유역수문모형 SWAT-K (Kim *et al.*, 2009)로 모의한 11년 기간 동안의 월단위 지하수 유출량을 2021년 값을 기준으로 월별 상대비율을 구하고, 지하수 유출량이 클수록 기존 취수원에서의 유입량이 커진다는 가정 하에 이 상대비율을 2021년 유입량 시계열에 곱하여 장기간 자료를 생성하였다. 11년 유입량 자료에 대해 기존 취수원과 샌드댐의 유공배수관을 통한 방류량을 모의하여 샌드댐의 물공급을 개선 효과를 분석하였다.



**Fig. 3.** Time series of water level (a), drain rate (b), overflow rate (c), and inflow of the existing pond (d)

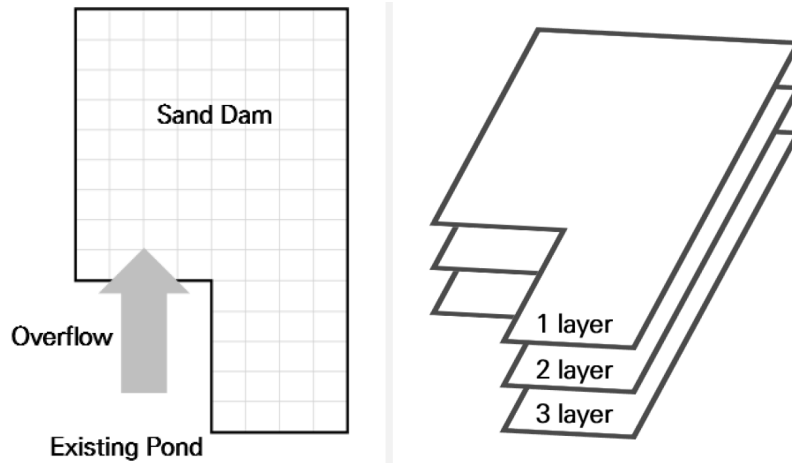


Fig. 4. Discretization of modelling domain

2.2.2 장기유출해석

상시 유량 관측이 어려운 지역의 일별 유출량은 장기유출 모형을 통해 산출할 수 있으며, SWAT, TANK, SSAR, HSPF 등 다양한 모델이 사용되고 있다. 본 연구에서는 미 농무성에서 개발, 국내외적으로 적용성이 우수한 것으로 알려져 있는 준분포형 수문모형 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형(Arnold and Fohrer, 2005)을 우리나라 수문학적 특성에 맞게 개선하고 다양한 해석모듈을 통합한 SWAT-K (Kim *et al.*, 2009)를 이용하였다. SWAT 모형은 강수, 증발산, 지표 유출, 중간유출, 침투량, 함양량, 지하수유출 등의 수문성분에 대하여 각 수문반응단위(hydrologic response unit, HRU) 별로 계산할 수 있으며, 물수지 기본 방정식은 Eq. (1)과 같다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - \omega_{seep} - Q_{latq}) \quad (1)$$

여기서  $SW_t$ 는  $t$  일의 토양수분량(mm),  $SW_0$ 는 초기토양수분량(mm),  $R_{day}$ 는  $i$  일의 강수량(mm),  $Q_{surf}$ 는  $i$  일의 지표유출량(mm),  $E_a$ 는  $i$  일의 증발산량(mm),  $\omega_{seep}$  과  $Q_{latq}$ 는  $i$  일의 토양층에서 빠져나가는 침투량(mm)과 중간유출량(mm)이다. 수문반응단위(HRU)별로 수문성분량이 계산된 후 소유역 단위로 합산되어 유역 및 하도 추적을 통해 하천의 유출량이 산정된다.

수위, 유량 관측을 위한 자동 수위계 설치 지점을 출구점으로 2.1 km<sup>2</sup>의 유역에 대해 모형을 구축하였으며, 전체 유역을 31개의 소유역과 96개의 HRU로 구분하였다(Fig. 5).

SWAT 모형의 구동을 위해서 지리정보시스템(GIS) 기반의 공간 입력자료를 구축하였다. 수치표고모형(Digital Ele-

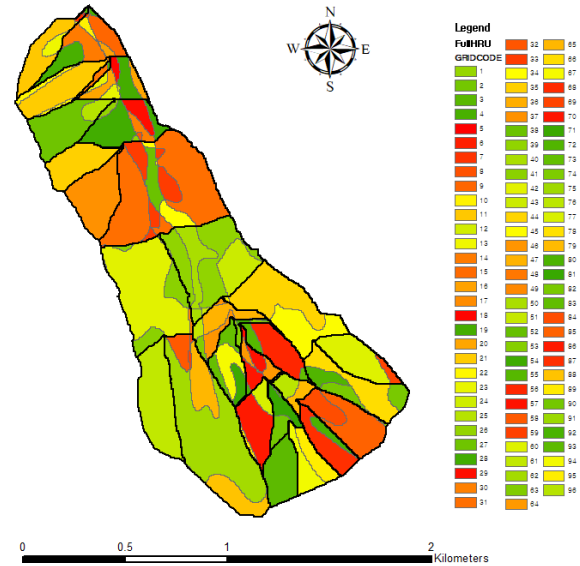


Fig. 5. Delineation of sub-catchment and HRU

vation Model, DEM)은 대상 유역의 형상 및 물의 방향 등을 결정하는 중요한 인자로서 본 연구에서는 국토지리연구원의 1:5,000 축척의 수치지형도를 이용하여 5 m 단위의 고해상도 DEM을 생성하였다. 대상 유역은 고도 분석 결과 최대 El. 298-950 m의 범위를 가지고 있는 것으로 나타났다(Fig. 6).

SWAT 모형에서 토양정보는 강수의 지하 침투, 증발 등을 결정하는 중요한 인자이다. 본 연구에서는 농촌진흥청 정밀 토양도(토양통), 농업과학기술원의 토양 구성비 및 토양물의 특성치 추정 방법을 통해 국내에 맞게 제작된 자료를 이용하였다. 대상 지역 정밀토양도 분석 결과 송산(72.2%), 덕산(12.0%), 삼각(7.4%), 수암(5.5%), 학곡(2.5%) 및 석토(0.4%)

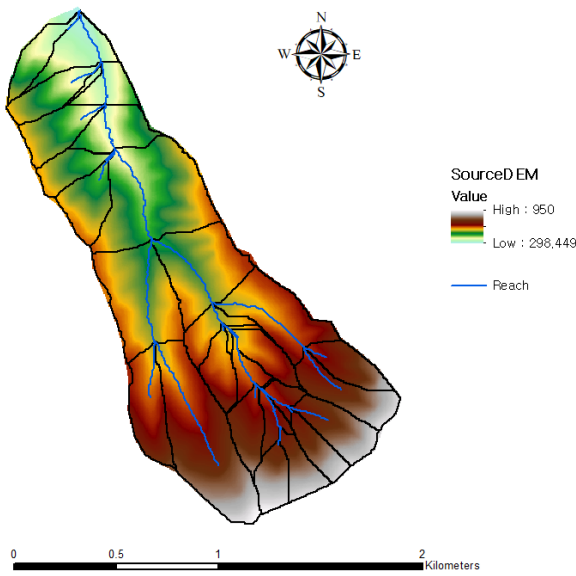


Fig. 6. DEM and reach network

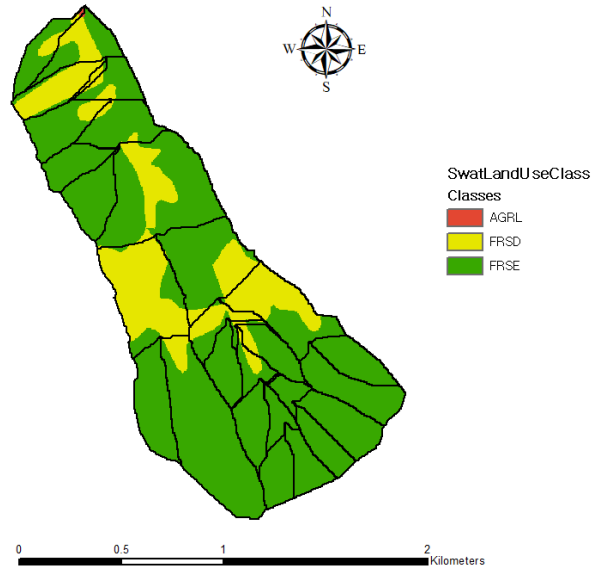


Fig. 8. Land use type map of study catchment

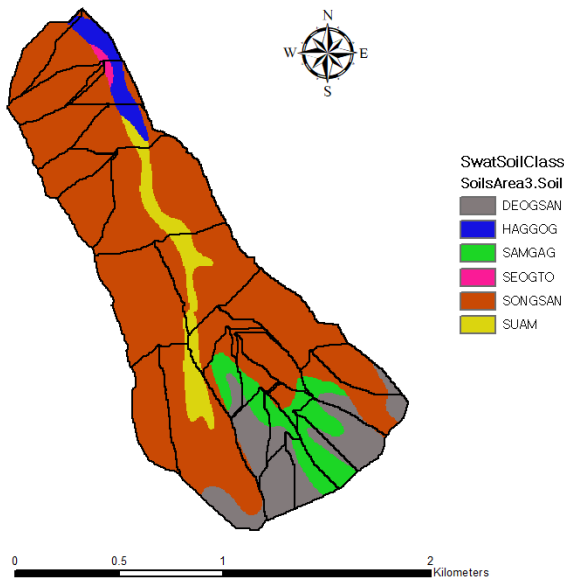


Fig. 7. Soil type map of study catchment

순으로 나타났다(Fig. 7). 토지 피복도는 환경부 환경공간정보 시스템에서 제공하는 1:25,000 해상도의 중분류 토지 피복도를 이용하였으며, SWAT에서 제공하는 분류 코드에 맞게 재분류하였다. 대상 지역의 경우 샌드담 설치 지역 인근에 극히 일부만 밭(0.1%)이 있을 뿐 거의 대부분 지역이 침엽수림(77.3%)과 활엽수림(22.6%)의 산림으로 분포해 있다(Fig. 8).

SWAT 모델의 기상 입력자료 구축을 위해서 춘천 기상대의 종관기상관측장비(Automated Surface Observing System,

Table 1. Results of parameter calibration

Parameter	Definition	Default Value	Used Value
CN2	AMC-II runoff curve number	Various	- 5%
EPCO	Plant uptake compensation factor	1.0	0.6
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor (1/days)	0.048	0.005
GW_DELAY	Grounwater delay time (days)	31.0	90.0

ASOS) 자료를 이용하였다. 최근 11년간(2010-2021)의 기상 자료를 분석한 결과 대상 지역의 연평균 최고·최저 기온은 각각 17.5°C, 6.6°C, 연평균강수량은 1,270.3 mm, 연평균 평균 풍속 1.1 m/s, 연평균 평균습도 69.8%, 연평균 일사합은 13.3 MJ/m<sup>2</sup>으로 나타났다. 2020년 5월~2021년 9월 기간 동안 자동 수위 관측자료와 수위-유량 관계 곡선식을 이용하여 도출된 일평균 유량 자료를 바탕으로 SWAT-K모델의 매개변수를 검·보정하였다. SWAT 매뉴얼 및 국내외 연구에서 유출량 관련 민감도가 높다고 알려진 Table 1의 CN2, EPCO, ALPHA\_BF, GW\_DELAY 등을 중심으로 관측유출량이 모의유출량에 잘 적합할 때까지 시행착오법으로 검보정을 수행하였다. Fig. 9는 관측과 모의 유출량을 비교하여 나타낸 것으로 결정계수(R<sup>2</sup>)는 0.64로 모의치가 대상 유역의 관측치 양상을 비교적 잘 모사하는 것으로 나타났다.

기존 취수원과 샌드담 상류 유역에 대해 수문성분을 일단 위로 모의하고, 그 중 지하수유출량을 월단위 유출고로 환산하여 Fig. 10과 같이 나타내었다. 각 월별 지하수유출량을 2021년 월별 지하수유출량으로 나누어 무차원화하면 Fig. 11과 같

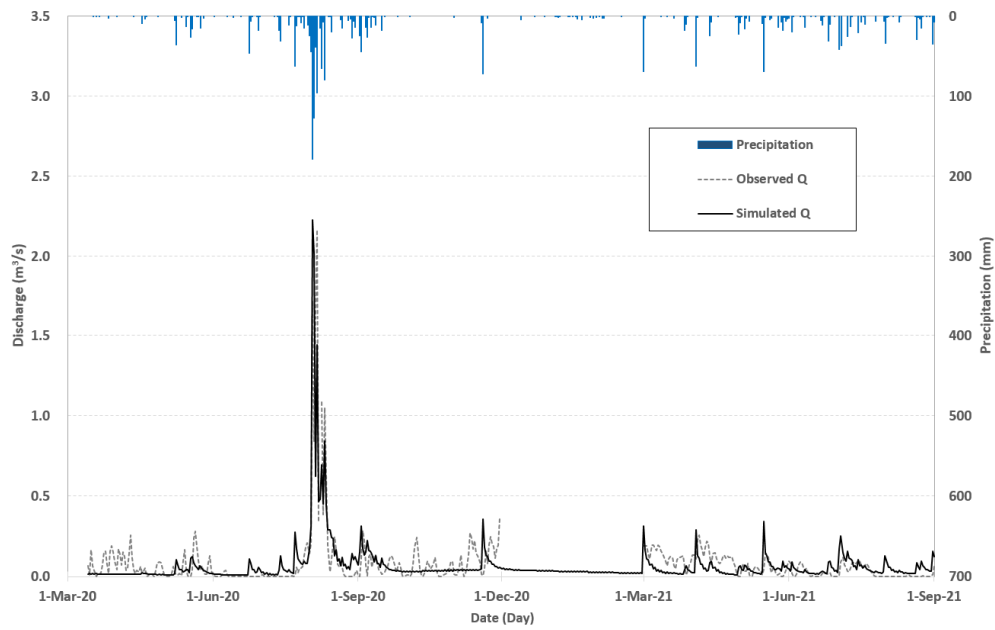


Fig. 9. Comparison of simulated and observed flow

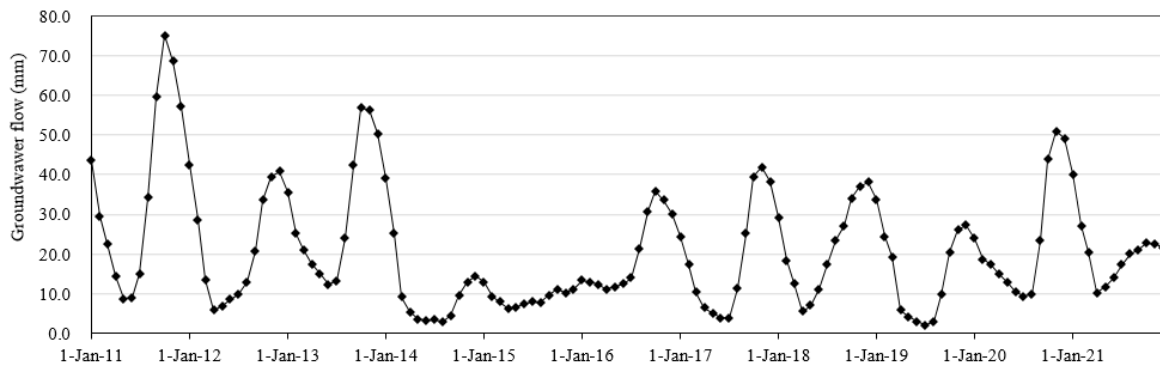


Fig. 10. Simulated monthly groundwater flow for study catchment

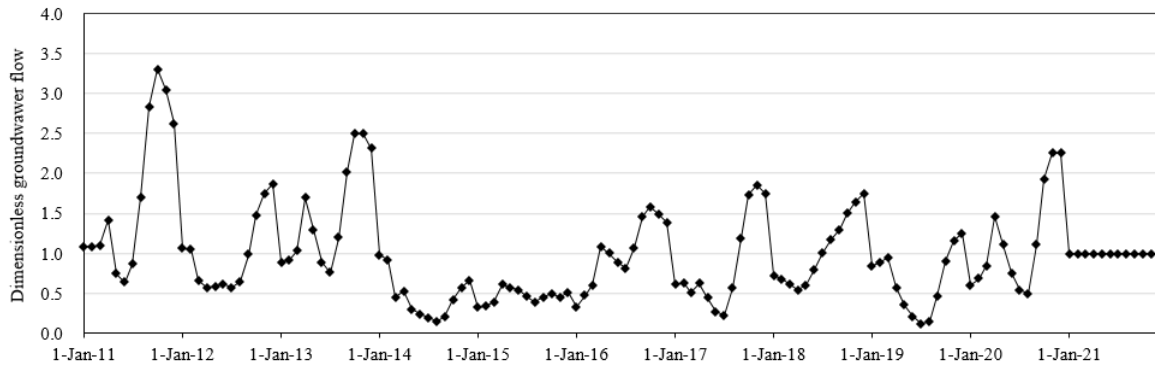


Fig. 11. Dimensionless monthly groundwater flow (relative to '21 values)

다. 즉, 2021년 값에 대한 상대비율을 나타낸 것으로 이 값에 자료를 생성하였다.  
 Fig. 2(d)의 2021년 유입량 시계열을 곱하여 과거 10년 유입량

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 샌드댐 설치에 따른 물 공급량

기존 취수원에 추가적으로 샌드댐을 설치했을 때 각 시설의 유공관을 통한 배수량을 모의하여 Fig. 12와 같이 나타내었다. Fig. 12(a)는 기존 취수원의 배수량 산정 결과로 최소 22.8 m<sup>3</sup>/일에서 최대 210.6 m<sup>3</sup>/일의 범위를 보이고 있으며, 지난 11년간 평균적으로 161.6 m<sup>3</sup>/일로 모의되었다. 특히 2014년, 2015년은 연속 가뭄으로 물부족 피해를 심하게 겪었던 해로서 다른 년도에 비해 배수량이 작게 모의된 것을 확인할 수 있으며

가뭄시 대략 20 m<sup>3</sup>/일 정도의 물 공급을 했을 것으로 추정된다. Fig. 12(b)는 샌드댐으로부터 추가적으로 공급 가능한 배수량을 모의하여 나타낸 것으로 기존 취수원으로부터의 잉여수량인 월류량이 없어 추가 공급이 되지 않는 경우도 빈번하지만 평균적으로 약 119.4 m<sup>3</sup>/일 만큼 더 공급량을 늘릴 수 있는 것으로 분석되었다. Fig. 12(c)는 기존 취수원과 샌드댐 각각의 배수량을 합하여 마을로 보낼 수 있는 물공급량을 나타낸 것으로 평균 281.0 m<sup>3</sup>/일, 최대 461.9 m<sup>3</sup>/일로 기존 취수원 단독 운영에 비해 크게 증가한 것을 알 수 있다. 일 최소 공급량은 단독 및 연계 운영 모두 약 23 m<sup>3</sup>/일로 샌드댐의 물공급 개선

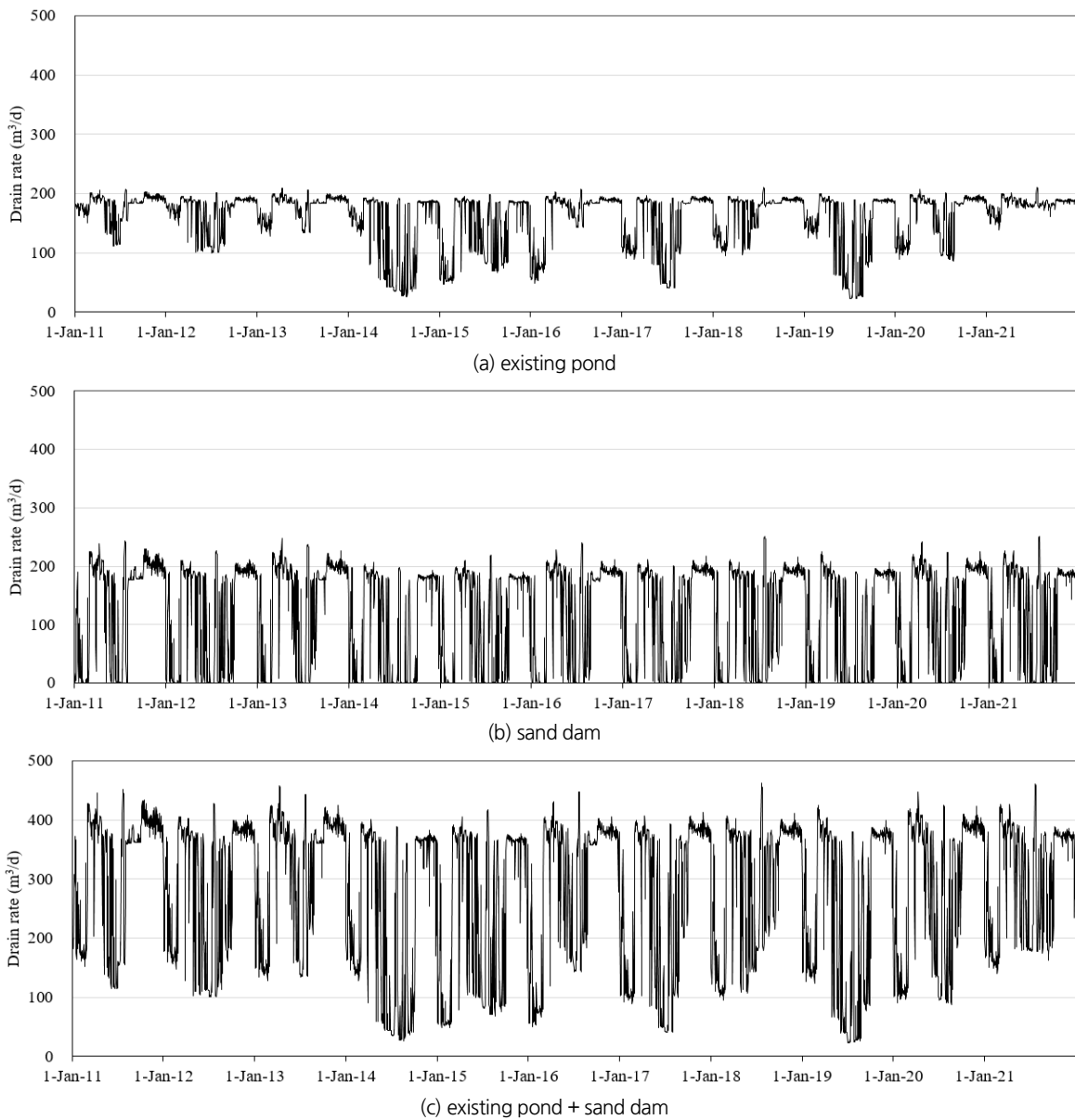


Fig. 12. Computed daily water drain rates for combined use of existing pond and sand dam



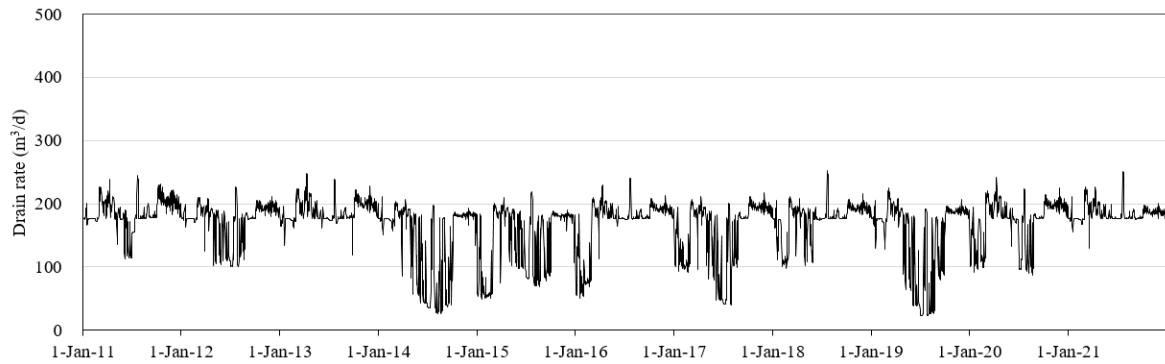


Fig. 13. Computed daily water drain rates for use of sand dam alternative to existing pond

Table 2. Computed daily drain rates for entire period (Unit : m<sup>3</sup>/day)

Statistics	Existing Pond	Sand Dam	Existing Pond + Sand Dam
max	210.6	252.1 ( 19.7%)	461.9 (119.3%)
mean	161.6	167.4 ( 3.6%)	281.0 ( 73.9%)
min	22.8	22.9 ( 0.2%)	23.2 ( 1.7%)

Table 3. Computed annual mean drain rates for January and February (Unit : m<sup>3</sup>/day)

Month	Existing Pond	Sand Dam	Existing Pond + Sand Dam
January	134.9	149.9 ( 11.1%)	185.5 ( 37.5%)
February	127.0	139.5 ( 9.9%)	135.3 ( 6.5%)

효과는 미미하지만, 실제로 겨울 가뭄이 심했던 2015년 1월에서 2월의 월 평균 공급량은 기존 취수원 64.1 m<sup>3</sup>/일이었으나 두 시설 운영으로 84.9 m<sup>3</sup>/일로 증가하여 샌드댐 설치로 30% 넘는 물 공급 개선효과를 나타내었다.

Fig. 13은 기존 취수원을 운영하지 않고 물 공급을 샌드댐으로 대체했을 경우 배수량을 모의하여 나타낸 것이다. 기존 취수원의 유공관 배수를 억제하였기에 샌드댐으로 월류되는 양이 Fig. 12 조건에 비해 증가하여 샌드댐 배수량이 Fig. 12(b) 보다 크게 증가한 것 알 수 있다. 배수량 최대치는 샌드댐의 경우가 크지만 전반적으로 기존 취수원 단독 운영 결과인 Fig. 12(a)와 유사한 양상을 보이고 있다. 일단위로 최소 22.9 m<sup>3</sup>/일, 최대 252.1 m<sup>3</sup>/일, 평균 167.4 m<sup>3</sup>/일 만큼의 공급 가능한 것으로 모의되었다. 기존 취수원에 비해 샌드댐 유공배수관의 개공률이 커서 배수에 유리하지만 조밀한 필터층을 추가로 두었기에 배수에 불리할 수도 있어 결국 두 시설의 배수계수 값의 차이가 작으며, 또한 두 시설의 높이와 만수시 배수량 실측치 또한 비슷한 값을 보였기 때문에 전반적으로 배수량 규모와 양상이 비슷하게 발생하였다. 기존 취수원 또는 샌드댐 단독 운영시 일

최소 배수량 차이는 거의 없지만, 겨울 가뭄이 발생하였던 2015년 1월과 2월의 평균 배수량은 샌드댐 단독 운영으로 73.5 m<sup>3</sup>/일로 산정되어 기존 취수원 64.1 m<sup>3</sup>/일에 비해 약 15%의 물 공급 개선 효과를 나타낼 수 있는 것으로 분석되었다.

Figs. 12 and 13을 바탕으로 모의 기간에 대해 기존 취수원과 신규 샌드댐 단독 운영과 두 시설을 함께 운영했을 때의 일 단위 최대, 평균, 최소 배수량을 비교하여 Table 2에 정리하였다. 샌드댐이 기존 취수원을 대체했을 경우 평균적으로 3.6%, 기존 취수원과 샌드댐을 함께 운영했을 경우는 평균 73.9%의 물 공급 개선 효과를 얻을 수 있으며, 특히 일 최대 공급량 측면에서는 샌드댐 단독 운영으로 19.7%, 두 시설 연계 운영으로 119.3%로 물 공급 개선 효과가 크다. 반면 일 최소 공급량 개선 효과는 미미하게 나타났지만, Table 3과 같이 샌드댐 단독 혹은 추가 운영으로 평균적으로 1월에는 11.1% 및 37.5%, 2월에는 9.9%, 6.5%의 물 공급 개선 효과를 보여 겨울 가뭄이 우려되는 연구 지역의 보다 안정적인 물 공급 체계 구축에 기여할 수 있을 것으로 평가되었다.

### 3.2 샌드댐 설치에 따른 물 공급 신뢰도

샌드댐 추가 설치에 따른 이수안전도 개선 효과를 평가하기 위해서 전체 분석기간 중 수요량(목표 공급계획량)을 만족하는 물공급 기간의 비율인 기간 신뢰도를 산정하였다. 다목적댐과 같이 수자원 공급시설의 이수안전도 평가는 일반적으로 5일 또는 10일 단위의 분석 단위기간을 설정하고 있으나, 샌드댐 직하류부 마을만을 대상으로 하기에 취수-공급 구간이 짧고 다른 물공급 대체 시설이 없는 점을 감안하여 정교하고 보수적인 물 부족 평가를 위해 본 연구에서는 분석 단위기간을 1일로 설정하였다. 전체 분석기간 2011년부터 2021년까지 총 4,018일 중에서 Table 4와 같이 수요량을 만족하지 못하는 물공급 실패 일수를 집계하였고, 이를 바탕으로 Table 5와 같이 수요량에 따른 취수 시설별 물공급 신뢰도를 계산하였다.

**Table 4.** Total (Annual mean) number of days of water supply failure (Unit : days)

Demand (m <sup>3</sup> /day)	Existing Pond	Sand Dam	Existing Pond + Sand Dam
10	0 ( 0.0)	0 ( 0.0)	0 ( 0.0)
20	0 ( 0.0)	0 ( 0.0)	0 ( 0.0)
30	40 ( 3.6)	35 ( 3.2)	37 ( 3.4)
40	88 ( 8.0)	74 ( 6.7)	72 ( 6.6)
50	155 (14.1)	136 (12.4)	141 (12.8)
60	231 (21.0)	200 (18.2)	207 (18.8)
70	265 (24.1)	230 (20.9)	230 (20.9)
80	310 (28.2)	284 (25.8)	267 (24.3)
90	395 (35.9)	350 (31.8)	332 (30.2)
100	490 (44.5)	427 (38.8)	397 (36.1)

**Table 5.** Results of calculation of water supply reliability

Demand (m <sup>3</sup> /day)	Existing Pond	Sand Dam	Existing Pond + Sand Dam
10	1.000	1.000	1.000
20	1.000	1.000	1.000
30	0.990	0.991	0.991
40	0.978	0.982	0.982
50	0.961	0.966	0.965
60	0.943	0.950	0.948
70	0.934	0.943	0.943
80	0.923	0.929	0.934
90	0.902	0.913	0.917
100	0.878	0.894	0.901

Table 4에서 알 수 있듯이 수요량이 20 m<sup>3</sup>/일 이하인 경우는 기존 취수원만으로도 연중 끊임없는 물공급 가능하며, 그 이상의 수요량에 대해서는 수요량이 커질수록 물부족 발생 일수가 증가하지만 샌드댐을 설치하면 물부족 발생일수가 설치 전에 비해 줄어든다. 팔호안의 연평균 물부족 일수를 보면 50 m<sup>3</sup>/일을 넘는 수요량에 대해서는 샌드댐 설치로 작계는 약 2일에서 길게는 8일 정도 물부족 일수의 감소 효과를 나타내었다. 전반적으로 기존 취수원과 샌드댐을 함께 운영했을 때가 물부족 일수가 가장 작으나 샌드댐 단독 운영과 큰 차이를 보이지 않는다. 3.1절에서와 같이 연평균 공급량 규모 측면에서는 기존 취수원과 샌드댐을 함께 운영하는 것이 월등히 유리하지만, 최소 수요량 만족 측면에서는 기간 신뢰도 분석 결과로 볼 때 샌드댐 단독 운영만으로도 두 시설 연계에 준하는 물공급 개선 효과를 보일 수 있다. 수요량 100 m<sup>3</sup>/일인 경우에는 기존 취수원과 샌드댐을 연계 운영해야만 신뢰도 90%를 넘는 것으로 분석되

었다. 세 가지 운영조건 모두 물공급 신뢰도 95%를 기준으로는 수요량 50 m<sup>3</sup>/일 이상, 신뢰도 99%를 기준으로는 수요량 30 m<sup>3</sup>/일 이상을 만족하는 것으로 평가되었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 2016년 겨울 가뭄 등 최근 물 부족 피해를 겪었던 춘천 물로리 지역의 물 공급 체계 개선을 위해서 기존 취수원 직하류부에 연이어 샌드댐과 지하수 집수정을 신규로 설치하였고 이에 따른 장기간 물 공급 개선 효과를 수치모형링을 통한 분석, 제시하였다. 기존 취수원의 연속적인 수위 관측을 통해 유입량과 방류량 산정이 가능한 2021년을 포함하여 그 전 2011년까지 총 11년을 분석 기간으로 선정하고, 이 기간 동안 샌드댐 추가 설치에 따른 기존 대비 배수량 증가 효과를 정량적으로 모의 분석하였다.

장기간 분석을 위해 기존 취수원에서의 유입량이 해당 유역의 지하수유출량에 비례한다는 가정하에 지하수유출량 모의결과를 활용하여 미계측 기간인 2011년부터 2020년까지의 유입량 자료를 생성하였다. 기존 취수원과 샌드댐이 위치한 곳의 상류부 유역에 대해 SWAT-K 유역수문모형링을 수행하여 지하수유출량을 산정하고, 2021년 월별 지하수유출량에 대한 그 이전 10년 동안의 각 월별 지하수유출량의 상대적 비율을 구한 후 2021년 유입량 시계열 자료에 이 비율을 적용하여 2011년부터 2020년까지의 과거 유입량 자료를 생성하였다. 분석 결과 샌드댐 설치로 물공급 신뢰도가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 수요량 20 m<sup>3</sup>/일, 50 m<sup>3</sup>/일, 100 m<sup>3</sup>/일 세 가지 경우에 대해 과거 극한 가뭄시의 물공급 가능여부를 분석한 결과, 샌드댐 설치로 물공급 신뢰도가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 수요량 100 m<sup>3</sup>/일인 경우에는 기존 취수원과 샌드댐을 연계 운영해야만 신뢰도 90%를 넘는 것으로 분석되었다. 세 가지 운영조건 모두 물공급 신뢰도 95%를 기준으로는 수요량 50 m<sup>3</sup>/일 이상, 신뢰도 99%를 기준으로는 수요량 30 m<sup>3</sup>/일 이상을 만족하는 것으로 평가되었다.

## 감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 수요대응형 물공급 서비스사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (과제번호 146525).

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

## 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*, Vol. 6, No. 3, pp. 572-580.
- Arnold, J.G., and Fohrer, N., (2005). "SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling." *Hydrological Processes*, Vol. 19, No. 3, pp. 563-572.
- Chung, I.-M., and Lee, J.W. (2019). "Preliminary hydrological design for sand dam installation at the valley of Seosang-ri, Chuncheon." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 39, No. 6, pp. 725-733.
- 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*, Vol. 14, No. 19, 3039.
- Hoogmoed, M. (2007). *Analyses of impacts of a sand storage dam on groundwater flow and storage: Groundwater flow modeling in Kitui district, Kenya*. Master Thesis, VU University Amsterdam, Amsterdam, Netherlands, pp. 20-28.
- Kim, G.B., Chung, I.-M., and Ha, G. (2020). "GW-SMART research project." *Water Journal*, July, 2020, No. 192, pp.32-39 (in Korean).
- Kim, N.W., Chung, I.M., Kim, C., Lee, J., and Lee, J.E., (2009). "Development and applications of SWAT-K (Korea)." *In Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Global Applications*, Edited by Arnold, J., Srinivasan, R., Neitsch, S., George, C., Abbaspour, K., Hao, F.H., van Griensven, A., Gosain, A., Debels, P., Kim, N.W., Special Publication No. 4, World Association of Soil and Water Conservation, Bangkok, Thailand.
- Lasage, R., Aerts, J., Mutiso, G.-C.M., 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*, Vol. 33, pp. 67-73.
- McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W. (1988). *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A1, U.S. Geological Survey, Reston, VA, U.S., pp. 1-588.
- 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*, Vol. 34, No. 4-5, pp. 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*, Vol. 4, 100035.
- Sivils, B.E., and Brock, J.H. (1981). "Sand dams as a feasible water development for arid regions." *Journal of Range Management*, Vol. 34, pp. 238-239.
- 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*, Vol. 28, No. 4, pp. 529-540.
- Yonhap News (2016). Prolonged winter drought in Chuncheon... Alternative water source development, accessed 1 October 2022, <<https://www.yna.co.kr/view/AKR20160203089100062>>