

유역 수문모형과 저수지 추적기법을 연계한 샌드댐 저류량 산정

정일문¹ · 이정우^{2*} · 이정은³ · 최정렬⁴

¹한국건설기술연구원 국토보전연구본부, 선임연구위원

²한국건설기술연구원 국토보전연구본부, 연구위원

³한국건설기술연구원 국토보전연구본부, 수석연구위원

⁴(주)에스디엠이앤씨 기술연구소, 과장

The Estimation of Sand Dam Storage using a Watershed Hydrologic Model and Reservoir Routing Method

Il-Moon Chung¹ · Jeongwoo Lee^{2*} · Jeong Eun Lee³ · Jung-Ryel Choi⁴

¹Dept. of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), Senior Research Fellow

²Dept. of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), Research Fellow

³Dept. of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), Senior Researcher

⁴Research and Development Team, SDM_ENC Co., Ltd., Section Chief

Abstract

The implementation of drought measures in the upstream areas of river basins is seldom considered with respect to water supply. However, the demand for such measures is increasing rapidly owing to the occurrence of severe droughts, and interventions on streams and the water supply are needed. Physical interventions are an option to prevent streams from becoming dry and to maintain stream water flow, but dam construction is challenging because of environmental and ecological considerations. Here, a feasibility study was conducted to assess the potential effects of sand dams, which are widely used in arid regions in Africa. The SWAT-K model, which is a hydrologic model used for Korean watersheds, is used to estimate the flow rate of water in an ungauged watershed. The changes in water storage of the sand-dammed reservoir and in downstream flow rates are estimated for two types of sand dam (natural and dredged). The results show that sand dams are capable of increasing the downstream flow rate during normal conditions and of mitigating water supply problems caused by the withdrawal of water during drought periods.

Keywords: sand dam, water storage, SWAT-K, reservoir routing

초 록

지속적 가뭄 발생에 따라 물공급의 사각지대인 유역 상류부 가뭄 대책 마련에 대한 수요가 급증하는 추세이며, 하천 및 상수도과 연계된 시스템 구축이 필요한 시점이다. 또한 하천의 건천화 방지와 적정 하천 유지유량 확보를 위한 시설 설치가 필요하나, 하천의 환경 및 생태계 보전 등의 이유로 지상 댐의 건설이 어려운 실정이다. 본 연구에서는 이에 대한 대안으로 아프리카 건조지역에서 많이 활용되는 샌드댐의

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Jeongwoo Lee
E-mail: ljw2961@kict.re.kr

Received: 31 October, 2018

Revised: 26 November, 2018

Accepted: 30 November, 2018

© 2018 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

효과를 살펴보기 위한 타당성 평가를 수행하였다. 미계측 유역의 계곡수 유출량을 산정하기 위해 한국형 유역수문모형 SWAT-K를 이용하였으며, 모의 유출량을 저수지 추적기법과 연계하여 샌드댐의 저류량을 평가하였다. 기존하상을 이용하는 샌드댐과 준설형 샌드댐의 2가지 경우에 대해 취수시 저류량 변화와 하류 유량의 증감을 분석한 결과 샌드댐은 평시 하류 유량을 증대시키는 효과와 가뭄시의 취수를 통한 물공급 대응이 가능한 시설이라는 것을 정량적으로 확인할 수 있었다.

주요어: 샌드댐, 저류, SWAT-K, 저수지 추적

서론

최근의 기후변화로 인해 강수량의 계절적 편차가 커지고 증발산량이 커짐에 따라, 지역별로 강수량이 크게 감소하는 현상이 나타나고 있다(Won and Chung, 2016). 또한 2014년부터 연속가뭄이 일어나 2015년 전국 평균 강수량은 900.2 mm에 그쳤다(Kim et al., 2016). 대도시에서는 이와 같은 가뭄에 대한 충격이 광역상수도의 공급으로 인해 나타나지 않지만 그 혜택을 받지 못하는 유역 상류부에서는 가뭄에 대한 충격이 매우 크다. 우리나라는 2~3년마다 크고 작은 가뭄이 발생했고 약 7년 주기로 극한 가뭄이 발생하였다. 최근 극심한 이상 가뭄이 빈번해지는 등 기후변화로 인해 미래(2061~2090년)에는 과거(1997~2006년)에 비해 가뭄 발생기간이 3배 이상 증가할 것으로 전망되고 있다(MLTM, 2011). 따라서 가뭄피해가 빈번한 유역상류의 물 공급 취약지역에 대해 극한 가뭄에도 안정적인 물 공급이 가능한 수자원 확보 체계가 시급한 실정이다. 특히 지방상수도에 비해 소규모 간이수도시설은 낮은 수질 안전성과 가뭄에 매우 취약하기 때문에 이들 시설이 집중된 산간·도서지역과 같은 물복지 소외지역에 대한 정책과 인프라 구축은 매우 시의적절하다. 본 연구에서는 이와 같은 물복지 소외지역에 대한 공급 대안으로 샌드댐의 설치를 고려한 분석을 수행하였다. 가뭄시 제한급수가 시행된 전국 단위 취약지역으로부터 선택된 시험지역에 대해 유역수문모형 SWAT-K (Kim et al., 2009)를 이용한 유출량 모의를 수행하고 이를 기본자료로 샌드댐 건설에 따른 저류량의 변화와 물공급 가능성을 타진하는 예비 해석이 본 연구의 목적이다.

재료 및 방법

샌드댐 및 테스트 베드 개요

샌드댐은 Fig. 1과 같이 계곡이나 하천의 불투수성 기반암위에 댐이나 보 등을 설치하고 확보된 공간에 모래와 같은 투수성 재료를 채운 후 그 공간에 물을 저장하여 사용하기 위한 구조물로 제체가 부분적으로 지상에 노출된 지하댐의 한 종류로 주로 아프리카 건조지역인 케냐와 에티오피아에 많이 설치되어 활용되고 있다(Hanson and Nilsson, 1986).

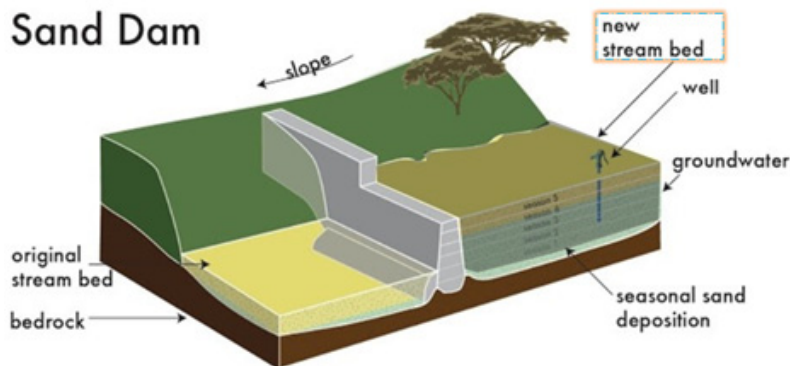


Fig. 1. Structure of the sand dams (source: churchwilnerotary.org).

샌드담을 설치하게 되면 증발 손실을 막고 지하수 함양의 증가로 수량 확보 효과가 크며, 노출된 수자원에 비해 오염 취약성이 낮고 모래층을 통과하여 자연 정화되어 수질 개선 효과가 큰 장점이 있다. 샌드담은 제체 재료에 따라 석조담, 철근 콘크리트담, 흙담, Geo-membrane담 등으로 분류된다. 국내의 샌드담 건설 사례는 전무하나, 사방담을 이용하여 비상시 물공급을 하는 사례는 간간히 볼 수 있다.

샌드담 설치 검토지역은 춘천시 서면 서상리 일대(Fig. 2)로 직선형 V자 계곡으로 이뤄져있으며, 다른 후보지에 비해 유역면적(2.39 km^2)이 넓고 하천연장(1.1 km)이 길어 저류 및 취수에 유리한 지역이다. 또한 계곡수를 음용수로 활용(Fig. 3)하고 있어 수질도 매우 양호한 편이다. 주변 여건은 가덕산(해발 858 m) 등 산악지형에 둘러쌓여 특이한 오염원은 없으며, 담 후보지 하류에 규모가 큰 신매저수지가 위치한다.

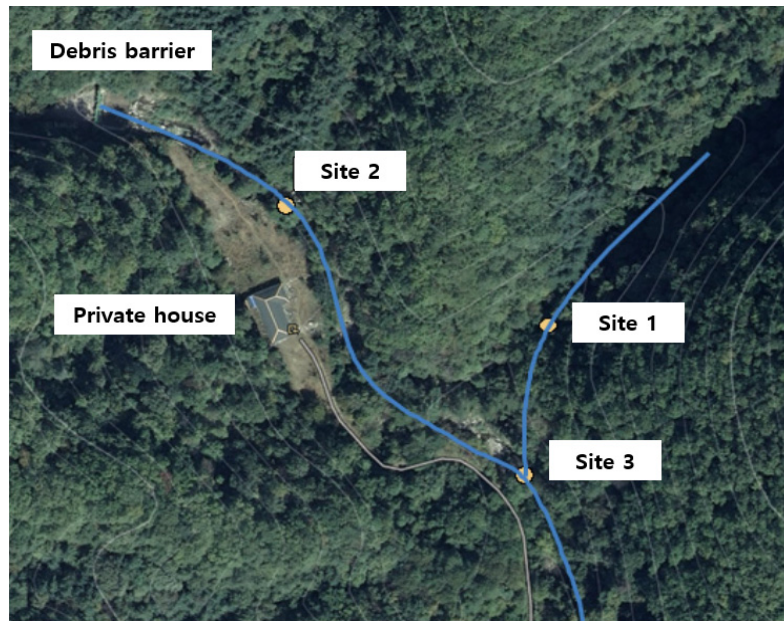


Fig. 2. Test watershed.



Fig. 3. Test bed of the sand dams.

유역수문모형 SWAT-K 구축

SWAT-K (Kim et al., 2009) 모형은 USDA에서 개발된 SWAT2000 (Soil and Water Assessment Tool) 모형 (Arnold and Fohrer, 2005)을 우리나라 지형과 수문특성에 맞게 개선한 모형이다. 주요 개선내용은 하도추적 모듈의 개선, 시간가중평균 CN방법, SWAT과 MODFLOW의 완전연동형 결합(Kim et al., 2008), 우리나라 논농사 패턴을 고려한 SWAT-AGRIMAN 등 다양한 개선사항을 포함하고 있다. 특히 SWAT의 개선모형인 SWAT-MODLFLOW 지표수-지하수 통합모형을 이용하여 지하담 건설에 따른 지하수위 증가 및 유황 개선 효과를 분석한 사례(Kim et al., 2009; Kim et al., 2014)가 있다.

SWAT은 유역을 다수의 소유역으로 분할하고, 소유역 내에서는 동일한 토지이용조건과 토양조건을 중첩시켜 만든 다수의 HRU (Hydrologic Response Unit)로 분할하여, 개개의 HRU에 대해 지표면, 지표하, 지하수 등의 수문성분을 산정한다. SWAT에서는 식물의 뿌리깊이까지의 영역인 토양수대, 비포화대, 포화대로 구분하여 다음 식 (1)과 같이 토양수를 기준으로 표현된 물수지 식을 기본 개념으로 사용하고 있다(Kim et al., 2007).

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

여기서 SW_t 는 시간 t 일의 토양수분량, SW_0 는 초기토양수분량, R_{day} 는 일강수량을 나타내고 있으며, Q_{surf} 는 지표면 유출량, E_a 는 증발산량, w_{seep} 는 토양층의 특성을 반영한 침투량, Q_{gw} 는 하천으로의 회귀수이다(Kim et al., 2009).

대상 유역은 서상리 샌드댐 상류유역으로 유역면적은 2.39 km²이고, ArcView를 이용한 전처리 작업을 수행하였다. 수치표고모형을 가공하여 5 m 격자로 구성하였으며, 지형 고도를 반영하여 총 5개의 소유역으로 구분하였다(Fig. 4). 다음으로 농업과학원의 1:25,000 정밀토양도를 이용하여 분석한 결과 CHUNCHEON (0.9%), DEOGSAN (21.3%), OESAN (77.8%)의 토양통 비율이 확인되었다(Fig. 5). 또한 환경부에서 제공한 1:25,000축척의 중분류 토지피복도를 이용하여 살펴본 결과 전 지역이 혼효림인 FRST (Forest-Mixed)로 구성되었음을 알 수 있었다(Fig. 6).

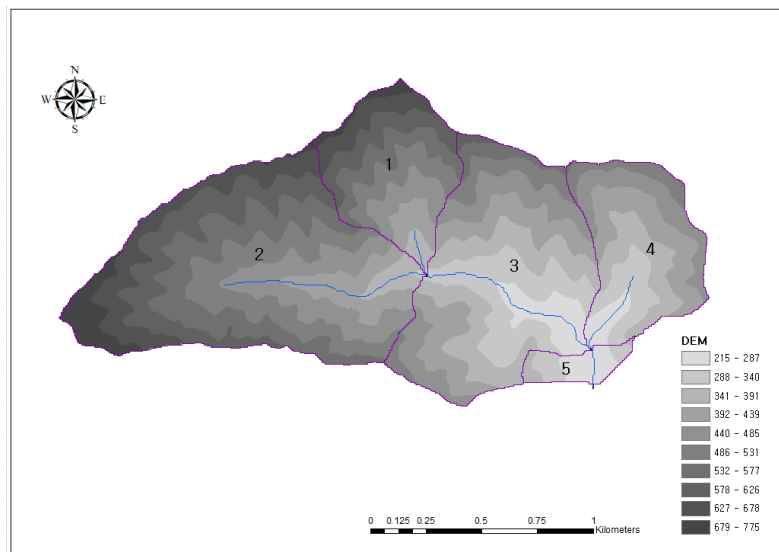


Fig. 4. Digital elevation model of the watershed.

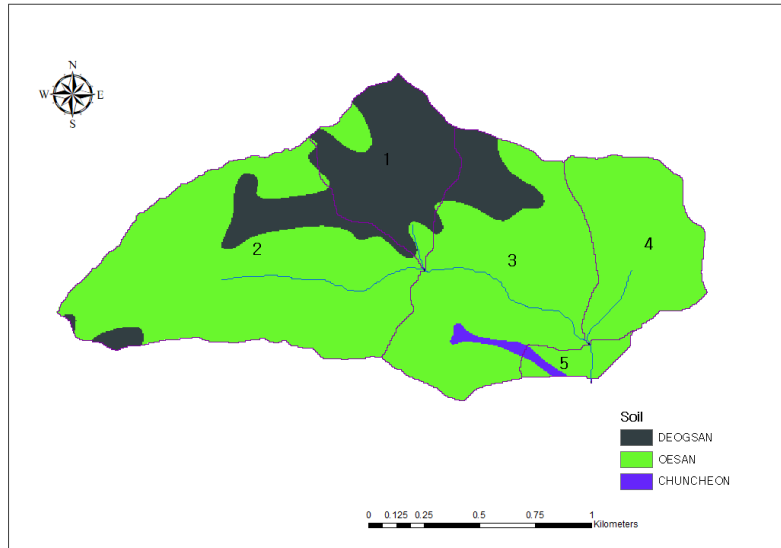


Fig. 5. Soil map of the watershed.

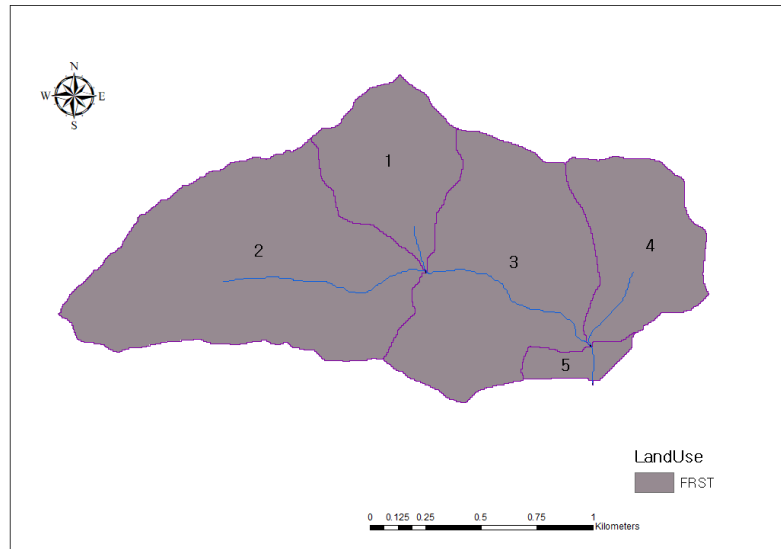


Fig. 6. Land use of the watershed.

기상자료를 구축하기 위해 기상청 관측소 위치 정보를 활용하여 Thiessen Polygon을 생성하였으며, 대상유역에 영향을 미치는 관측소를 선정하였으며 그 수집기간은 다음 Table 1과 같다.

Table 1. Locations and data periods of the weather stations

No.	Name	latitude	longitude	EL.m	Period
101	Chuncheon	37.9026	127.7357	75.6	2010.01.01.~2018.09.30
531	Gapyongbukmyeon	37.8856	127.5502	106.6	2010.01.01.~2018.09.30

각 기상대별 약 10년간(2010.01.01.~2018.09.30.) 일최고·최저 기온(°C), 일강수량(mm), 평균풍속(m/s), 평균습도(%),

일사량합(MJ/m^2)의 자료를 구축한 결과 춘천 기상대의 경우 연평균 최고 기온은 17.35°C , 최저 기온은 6.46°C , 연평균 풍속과 강수량은 각각 1.30 m/s , $1,290.40 \text{ mm}$ 로 나타났다(Table 2). 가평북면 기상대의 경우 연평균 최고 기온은 17.74°C , 최저 기온 4.27°C , 연평균 풍속 1.30 m/s , 연평균 강수량은 $1,420.13 \text{ mm}$ 로 나타났다(Table 3).

Table 2. Monthly weather data for Chuncheon station

Month	Temperature ($^\circ\text{C}$)		Precipitation (mm)	Wind speed (m/s)
	Max.	Min.		
1	0.85	-10.57	12.87	1.04
2	4.87	-7.09	29.62	1.22
3	11.64	-1.07	29.29	1.54
4	18.48	5.19	91.24	1.62
5	24.77	11.82	89.48	1.53
6	28.95	17.81	121.94	1.42
7	29.67	22.15	429.00	1.28
8	30.40	22.18	229.89	1.34
9	25.66	15.68	120.29	1.20
10	19.88	8.17	52.19	1.06
11	10.95	0.82	53.00	1.16
12	2.11	-7.60	31.59	1.14
Annual	17.35	6.46	1290.40	1.30

Table 3. Monthly weather data for Gapyong-bukmyeon station.

Month	Temperature ($^\circ\text{C}$)		Precipitation (mm)	Wind speed (m/s)
	Max.	Min.		
1	1.01	-12.79	10.50	1.07
2	4.97	-8.84	29.44	1.22
3	12.04	-3.04	29.11	1.45
4	19.05	2.96	89.78	1.52
5	25.36	9.23	106.28	1.37
6	29.55	15.59	122.22	1.13
7	29.93	20.56	489.50	0.91
8	30.77	20.44	278.17	0.89
9	26.11	12.99	126.94	0.91
10	20.38	5.20	56.50	0.95
11	11.31	-1.23	54.88	1.06
12	2.48	-9.78	26.81	1.10
Annual	17.74	4.27	1420.13	1.13

결과 및 고찰

유출량의 검보정

유출모형을 검보정하기 위해서는 실측 유량이 필요하나 테스트베드 지역은 미세측 지역이므로 실제 계곡부 갈수량을 현장조사하였다. 유량 및 갈수량 조사는 취수지역 부근에서 진행되었으며 취수지역을 기반으로 Fig. 7과 같이 유량측정 지점 3개소를 선정하여 하상단면을 측량하고 월 1회의 유량측정을 수행하였다(Fig. 8).

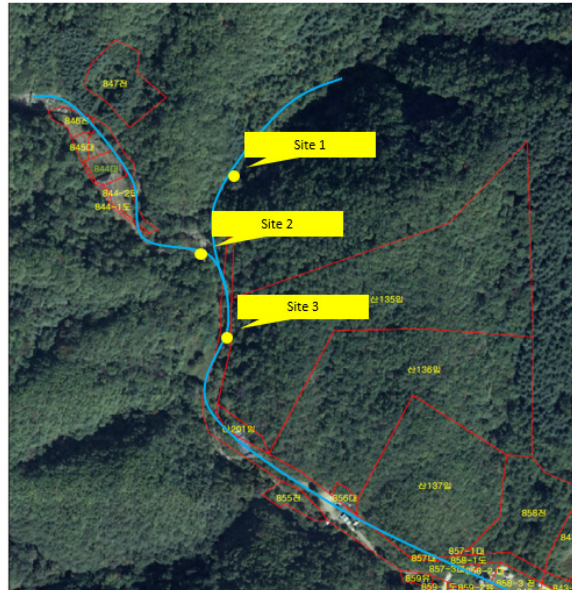


Fig. 7. Locations for the observed flows.

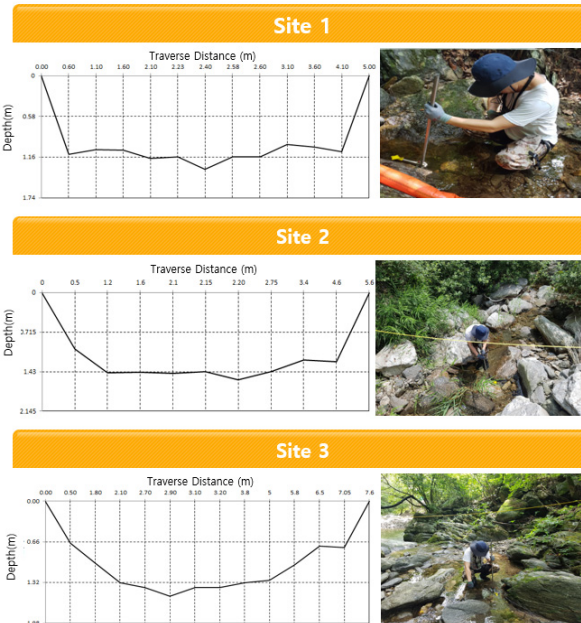


Fig. 8. Flow measurement of the test watershed.

모형의 보정은 유역출구인 조사지점 3에 대해 진행되었다. 2018년 8월 14일에 계측한 유량은 0.009 m³/sec, 2018년 9월 12일에는 그보다 증가한 0.0168 m³/sec로 나타났다.

이 두 관측유량값에 적합할 때까지 모형의 매개변수 검보정을 실시하였으며, 샌드댐 설치 부지가 최종 선정된 이후에는 주기적 유량 측정, 수위-유량관계식 유도 등을 통해 연속적 유량관측자료를 확보하고 이를 기준으로 모형의 매개변수 검보정을 재실시할 계획이다. 관측유량과 모의유량값은 Fig. 9에 나타내었으며, 상대오차가 약 20 %로 모의가 비교적 양호하게 이루어진 것으로 분석되었다.

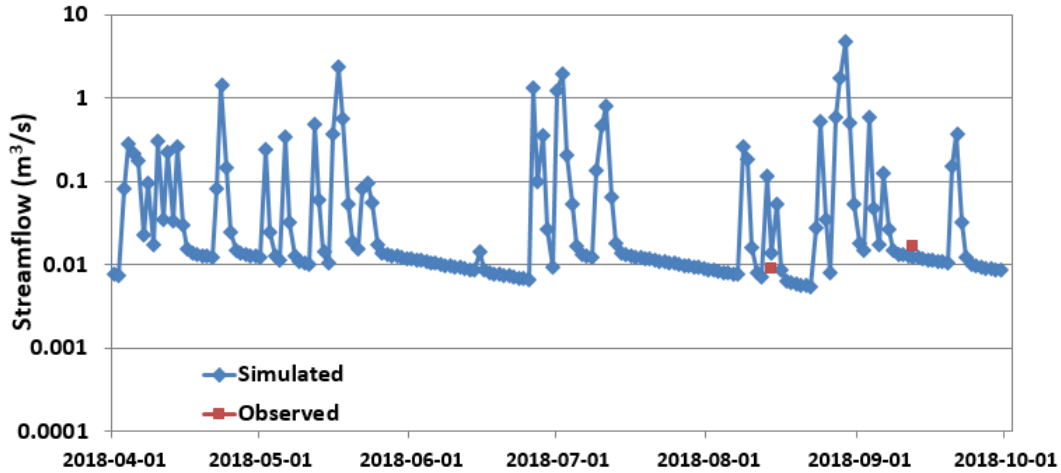


Fig. 9. Simulated and observed flows at the outlet of the watershed.

저수지 추적모형과의 연계분석

본 연구에서는 SWAT-K 모형으로 산정된 유량값을 이용하여 저수지 유출추적 모형과의 연계를 수행하였다. 저류방정식을 이용한 저수지 유출추적의 식은 다음 식 (2)와 같다.

$$I - Q = dS/dt \tag{2}$$

여기서, I : 샌드댐 유입량, Q : 샌드댐 방류량, S : 샌드댐 저류량, t : 시간

다음으로는 실제 샌드댐의 조건을 반영하기 위해 위어월류량, 오리피스방류량, 취수량을 고려한 저류방정식을 식 (3)과 같이 나타내었다.

$$I - Q_1 - Q_2 - Q_3 = dS/dt \tag{3}$$

여기서, $Q_1 = f_1(h)$: 오리피스방류량, $Q_2 = f_2(h)$: 위어월류량, Q_3 : 취수량, h : 저수위

저류방정식을 이산화하고, 미지수 $Q = f(h)$ 와 $S = f(h)$ 를 가진 음함수의 해를 수치해석적으로 산정하면 샌드댐의

저류공간에서 유입-유출-저류량과의 관계가 얻어진다.

Table 4와 같은 설계조건에 대해서 샌드댐 설치로 인한 저류량과 유출량의 변화를 평가하였다. 샌드댐 타입은 Fig. 10과 같이 기존하상에 모래를 쌓는 경우(설계조건1)와 Fig. 11과 같이 저류량을 증대하기 위해 하상을 준설하고 모래를 채운 가상 경우(설계조건2) 두 가지에 대해 모의실험을 수행하였다.

Table 4. Design conditions for the sand dams

Type	Length	Width (m)	Height (m)	Porosity	Maximum storage (m ³)
Natural	25	5	2	0.3	37.5
Dredged	25	5	2	0.3	75.0

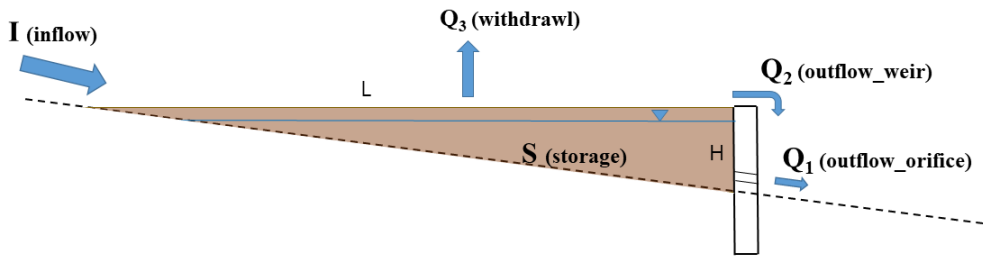


Fig. 10. Schematic diagram of the sand dam water budget (Case 1).

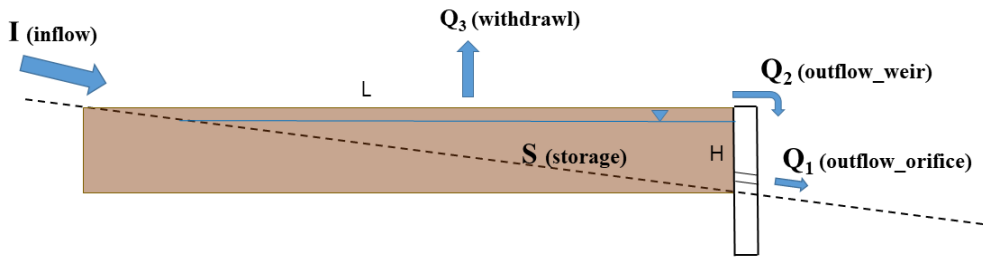


Fig. 11. Schematic diagram of the sand dam water budget (Case 2).

또한 샌드댐 내 모래의 공극률을 0.3으로 가정한 상태에서 기존하상을 유지하는 설계조건 1에 대해 유입량과 유출량 그리고 저류량을 비교하였다.

- 설계조건 1 (최대저류량 $S_{max} = 1/2 \times L \times H \times W \times n = 1/2 \times 25 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 0.3$)

Fig. 12에서 보는 바와 같이 샌드댐을 설치하게 되면 저류량이 증가하고 배출구로 압력이 증가함에 따라 유출량은 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 샌드댐의 설치로 인해 샌드댐 하류부의 유량이 증가되어 건천상태의 개선효과를 기대할 수 있을 것이다. 또한 이때 저류량은 일정하게 유지되다가 겨울철 가뭄이 시작되면서 다소 감소하는 것을 볼 수 있었다.

Fig. 13는 샌드댐에서 일 20 m³의 취수를 허용하는 조건에서의 결과이다. 샌드댐으로 인해 증가된 저류량은 취수로 인해 소비되며 그로인해 저류량이 감소하는 것을 볼 수 있다. 취수전에 비해 유출량이 감소하지만 유입량에 비해 다소 증가하는 것으로 나타나 이와 같은 설계조건에서는 일 20 m³을 상회하는 취수가 가능한 거승로 평가되었다. 다만, 풍수기와 같

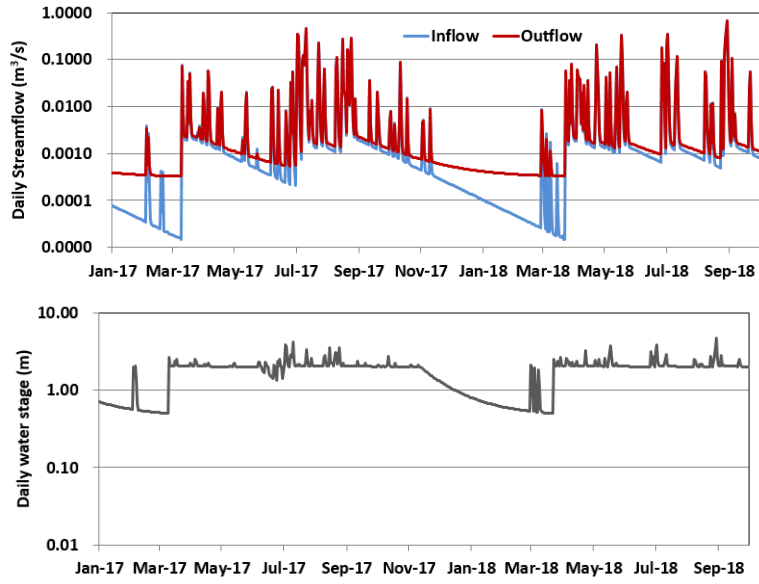


Fig. 12. Results of reservoir routing (Case 1, without withdrawal).

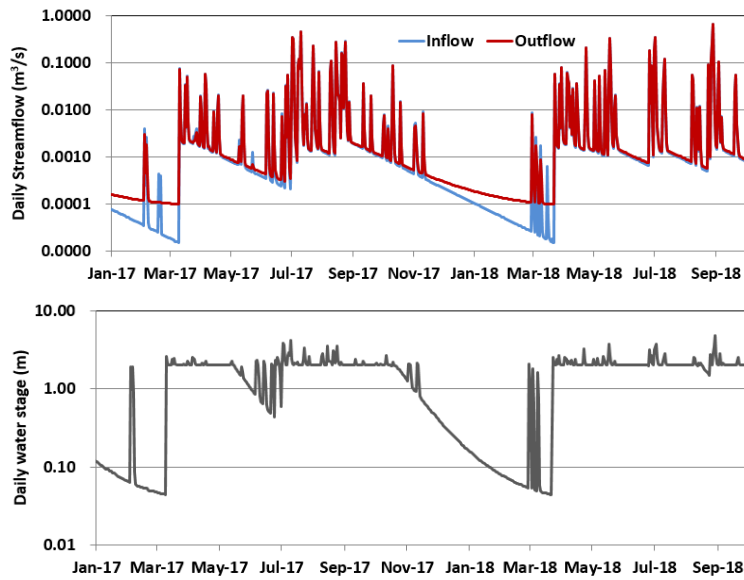


Fig. 13. Results of reservoir routing (Case 1, 20 m³/d withdrawal).

수기에 따라 적정 취수량은 다소 달라질 수 있어 향후 정밀한 추가 분석이 요구된다.

다음으로는 자연하상이 아닌 하상을 저류량 만큼 추가 준설하고 거기에 모래를 채운 조건에서의 저류량을 평가하였다.

- 설계조건 2 (최대저류량 $S_{max} = L \times H \times W \times n = 25 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 0.3$)

Fig. 14에서 보는 바와 같이 Case 2의 준설형 샌드댐을 설치하게 되면 유출량이 훨씬 많아지며 저류량 또한 대폭 증가하여 겨울철 갈수기의 저류량 감소현상이 완화되는 것으로 나타났다.

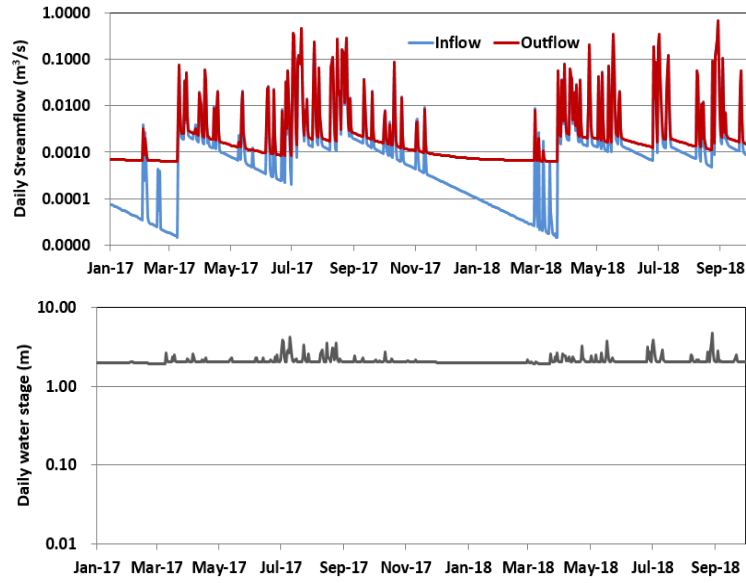


Fig. 14. Results of reservoir routing (Case 2, without withdrawal).

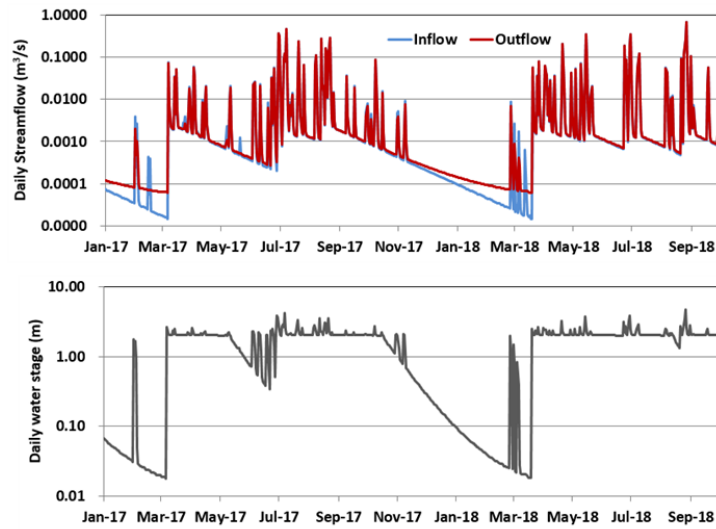


Fig. 15. Results of reservoir routing (Case 2, 50 m³/d withdrawal).

Fig. 15는 준설형 샌드담에서 일 50 m³의 취수를 허용하는 조건에서의 결과로 기존하상을 유지하는 샌드담에 비해 저류량 감소가 훨씬 줄어들어 늘어난 취수량으로 인해 가뭄시 탄력적 운영이 더욱 증대될 것으로 기대되었다. 이와 같은 설계 조건에서는 일 50 m³의 취수로도 저류량의 하한치가 나타나지 않았으며 겨울철 갈수시에도 지속적인 물이용이 가능할 것으로 판단된다.

결론

지속적 가뭄 발생에 따라 물공급의 사각지대인 유역 상류부 가뭄 대책 마련에 대한 수요가 급증하는 추세이며, 하천 및

상수도와 연계된 시스템 구축이 필요한 시점이다. 또한 하천의 건천화 방지와 적정 하천유지유량 확보를 위한 시설 설치가 필요하나, 하천의 환경 및 생태계 보전 등의 이유로 지상 댐의 건설이 어려운 실정이다. 이에 대한 대안으로 본 연구에서는 아프리카 건조지역에서 많이 활용되는 샌드댐의 효과를 살펴보기 위한 타당성 평가를 수행하였다. 미계측 유역의 계곡수 유출량을 산정하기 위해 한국형 유역수문모형 SWAT-K를 이용하였으며, 기존하상을 이용하는 샌드댐과 준설형 샌드댐의 2가지 경우에 대해 취수시 저류량 변화와 하류 유량의 증감을 분석한 결과 계곡부이 샌드댐은 평시 하류 유량을 증대시키는 효과와 가뭄시의 취수를 통한 물공급 대응이 가능한 시설이라는 것을 정량적으로 확인할 수 있었다. 이와 같은 시설은 기존의 마을 상수도와 연계하여 용수 확보를 할 수 있는 유용한 시설로 기대된다.

사사

본 연구는 환경부 환경기술진흥원의 “상시 가뭄지역의 지하수 최적 공급 관리를 위한 IoT기반 인공함양 및 well network 기술개발(1차년도)”연구비 지원(18DWSP-B146519-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Arnold, J. G., and Fohrer, N., 2005, SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling, *Hydrological Processes*. 19(3), 563-572.
- Hanson, G., Nilsson, A. Ground-Water Dams for Rural-Water Supplies in Developing Countries. *Ground Water* 1986, 24, 497-506, doi:10.1111/j.1745-6584.1986.tb01029.x.
- Kim, H. S., Kim, H. S., Jeon, G. I., Kang, S. W., 2016, Evaluation of drought (2014-2015), *Magazine of Korean Water Resources Association*. 49(6), 61-75 (in Korean).
- Kim, J.-T., Kim, G.-B., Chung, I.-M., and Jeong, G.-C., 2014, Analysis of flow duration and estimation of increased groundwater quantity due to groundwater dam construction, *The Journal of Engineering Geology*, 24(1), 91-99 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.-T., Kim, M.-I., Chung, I.-M., Kim, N.-W., and Jeong, G.-C., 2009, An analysis of groundwater level fluctuation caused by construction of groundwater dam, *The Journal of Engineering Geology*, 19(2), 227-233 (in Korean with English abstract).
- Kim, N. W., Chung, I. M., Kim, C., Lee, J., Lee., J. E., 2009, Development and applications of SWAT-K(Korea). In: *Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Global Applications* (Eds. J. Arnold et al.), Special Publication No. 4, World Association of Soil and Water Conservation, Bangkok, Thailand.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Lee, J., and Won, Y. S., 2007, Analysis of hydrological processes for Musim river basin by using integrated surface water and groundwater model, *Journal of Korea Water Resources Association*, 40(5), 419-430 (in Korean with English abstract).
- Kim, N. W., Chung, I. M., Won, Y. S., and Arnold, J. G., 2008, Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model, *Journal of Hydrology*, Vol. 356, pp. 1-16.
- Kim, N.-W., Chung, I.-M., Yoo, S., Lee, J., and Yang, S.-K., 2009, Integrated surface-groundwater analysis in Jeju Island, *Journal of the Environmental Sciences*, 8(9), 1017-1026 (in Korean with English abstract).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011, Long-term comprehensive plan for water resources (in Korean).
- Won, K. J. and Chung, E. S. (2016). Drought analysis of Cheongmicheon watershed using meteorological, agricultural and hydrological drought indices, *J. of Korean Water Resources Association*. 49(6), 509-518 (in Korean with English abstract).
- <http://churchwilnerotary.org>