



## An analysis of runoff characteristic by using soil moisture in Sulma basin

Kim, Kiyong<sup>a</sup> · Lee, Yongjun<sup>b</sup> · Jung, Sungwon<sup>c</sup> · Lee, Yeongil<sup>d\*</sup>

<sup>a</sup>Team Manager, Korea Institute of Hydrological Survey, Research & Development Division, Gyeonggi-do, Korea

<sup>b</sup>Researcher, Korea Institute of Hydrological Survey Research & Development Division, Gyeonggi-do, Korea

<sup>c</sup>Principal Manager, Korea Institute of Hydrological Survey, Gyeonggi-do, Korea

<sup>d</sup>General Manager, Korea Institute of Hydrological Survey, Research & Development Division, Gyeonggi-do, Korea

Paper number: 19-049

Received: 22 July 2019; Revised: 29 August 2019; Accepted: 29 August 2019

### Abstract

Soil moisture and runoff have very close relationship. Especially the water retention capacity and drainage characteristics of the soil are determined by various factors of the soil. In this study, a total of 40 rainfall events were identified from the entire rainfall events of Sulma basin in 2016 and 2017. For each selected events, the constant-K method was used to separate direct runoff and baseflow from total flow and calculate the runoff coefficient which shows positive exponential curve with Antecedent Soil Moisture (ASM). In addition to that, the threshold of soil moisture was determined at the point where the runoff coefficient starts increasing dramatically. The threshold of soil moisture shows great correlation with runoff and depth to water table. It was founded that not only ASM but also various factors, such as Initial Soil Moisture (ISM), storage capacity of soil and precipitation, affect the results of runoff response. Furthermore, wet condition and dry condition are separated by ASM threshold and the start and peak response are analyzed. And the results show that the response under wet condition occurred more quickly than that of dry condition. In most events occurred in dry condition, factors reached peak in order of soil moisture, depth to water table and runoff. However, in wet condition, they reached peak in order of depth to water table, runoff and soil moisture. These results will help identify the interaction among factors which affect the runoff, and it will help establish the relationship between various soil conditions and runoff.

**Keywords:** Soil moisture, Runoff, Rainfall, Response time

## 설마천 연구지역에서의 토양수분량을 활용한 유출 발생 특성분석

김기영<sup>a</sup> · 이용준<sup>b</sup> · 정성원<sup>c</sup> · 이연길<sup>d\*</sup>

<sup>a</sup>한국수자원조사기술원 연구개발실 팀장, <sup>b</sup>한국수자원조사기술원 연구개발실 연구원, <sup>c</sup>한국수자원조사기술원 원장,

<sup>d</sup>한국수자원조사기술원 연구개발실 실장

### 요 지

토양수분과 유출은 매우 밀접한 관계를 가지고 있으며, 특히 토양 내의 여러 요소들에 의해 토양의 수분보유능력과 배수의 특성이 결정된다. 본 연구에서는 2016년, 2017년 설마천 유역에서 총 40개의 사상을 분리하였다. 선정된 사상별로 constant-K 방법을 적용하여 직접유출과 기저유출을 분리하고 유출계수를 산정하였다. 산정된 유출계수는 선행토양함수와 지수함수 형태의 증가를 보였다. 또한 유출계수가 급증하기 시작하는 토양수분의 임계값을 선정하였으며, 이 값은 유출과 지하수면과의 큰 상관관계를 나타내었다. 선행토양함수뿐만 아니라 초기 토양수분, 토양 저류량, 강우량 등 여러 인자들도 유출 결과에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 또한 선행토양수분의 임계값에 따라 강우사상을 건조, 습윤 상태로 분리하여 시작 반응과 침투 반응을 분석해 보았으며, 습윤 상태에서의 반응이 건조 상태에서 보다 빠르게 발생하였다. 건조 상태에 속하는 대부분의 사상에서는 토양수분이 정점에 도달한 후 지하수면과 유출량 순으로 정점에 도달하는 침투 반응이 일어났으나 습윤 상태에서는 반대로 지하수면과 유출량이 토양수분보다 먼저 정점에 도달하였다. 본 연구의 결과는 유출에 기여하는 인자들 사이의 상호작용을 확인하고 토양의 다양한 조건과 유출 사이의 관계를 규명하는 데에 크게 기여할 것으로 판단된다.

**핵심용어:** 토양수분, 유출, 강우, 반응 시간

\*Corresponding Author. Tel: +82-31-929-0922

E-mail: sugawon@kihs.re.kr (Y. Lee)

## 1. 서론

전 세계 지표면에 내리는 강우의 약 76%는 토양 내부로 흡수되며, 토양 내부의 수분들은 증발산, 유출, 지하수 침투 등을 통해 끊임없이 배출된다(L'vovich, 1979). 토양의 특성에 따라 강우로 인한 홍수가 저감되기도 하며, 빗물을 저장하고 천천히 방류하여 하천의 수위를 조절해주는 자연적인 저류시설이다. 이러한 저류시설 역할을 하는 토양 내부의 수분 흐름에 대한 파악 및 분석은 홍수와 가뭄 등의 수재해 발생에 대한 예방 및 대책을 수립할 수 있는 필수적인 연구로서 가치가 있다.

일반적으로 토양 내부의 수분을 측정하기 위한 방법은 토양을 직접 채취하는 방법이 활용되어 왔다. 이 방법은 토양 내부의 수분을 측정하는 가장 정확한 방법이지만 시료 채취로 인해 토양이 흐트러진다는 단점을 가지고 있다(Reynolds, 1970). 최근들어 비파괴적이고 연속적인 토양 내 수분 측정을 위해 많은 연구들이 진행되었다. 이 방법은 기존의 방법에 비하여 자연상태의 흙을 훼손하지 않을뿐더러 토양내의 수분 흐름을 연속적으로 측정할 수 있다는 장점이 있다(Walker et al., 2004). 대표적으로 흡속의 유전율에 기반하는 방식인 TDR (Time Domain Reflectometer), FDR (Frequency Domain Reflectometer)을 활용한 지점 관측방식과 microwave, cosmic-ray 등을 활용한 광역적인 관측방식이 있다(Jeong et al., 2018). 다양한 방법을 통한 토양 내의 수분을 다양한 측면에서 분석하기 위하여 전 세계에서 깊이 및 여러 범위별 측정을 수행하고 자료를 공유하는 노력들이 진행되고 있다(Dorigo et al., 2011).

이러한 다양한 연구에도 불구하고 유역 내에 존재하는 토양층 내부 수분의 흐름에 기여하는 광범위한 요소들이 내제되어 있기 때문에 토양수분 흐름을 파악하는데 한계점이 존재한다. 최근에 지점 기반이 아닌 다른 다양한 수문모형들이 제시되고는 있지만 아직까지 신뢰성이 높은 결과를 도출하기는 어려운 상황이기 때문에 지속적으로 정확성을 향상 시키기 위한 다양한 토양의 요소들에 대한 분석이 요구 되고 이뤄지고 있다(Reichle and Koster, 2005).

토양 내의 수분 보유능력과 배수 특성을 평가하기 위해 우선 토양의 구조와 토성(soil texture) 분석이 필요하며, 토양수분의 초기 상태와 이력현상(hysteresis)에 대해 파악해야한다(Arya and Paris, 1981). 이전 연구들에서는 토성 분류에 따라 공극과 공극률이 변화하는 관계와 그에 따른 퍼텐셜(potential)에 대한 연구가 이루어졌으며, 토양수분간의 특성 곡선을 통해 수분 보유능력의 평가와 토양의 침투속도를 정량화 하였다. 이 뿐만 아니라 토양 초기상태에서의 유출반응, 토양별 이력현상 등 역학적인 현상에 대한 많은 연구들이 제시되었다(Topp, 1971; Zehe et al., 2005).

본 연구에서는 한국건설기술연구원(Korea Institute of Civil Engineering Technology, KICT)과 한국수자원조사기술원(Korea Institute of Hydrological Survey, KIHS)에서 관리하고 있는 설마천 유역의 2016, 2017년 수문자료를 대상으로 강우사상을 분류하고 발생한 강우 중 유출이 발생한 비율인 유출계수(비율)와 선행토양수분간의 관계성을 분석하여 임계값을 선정하였다. 또한 임계값에 따른 지하수면과 유출량을 분석하고 실제 발생하는 유출량에 영향을 미치는 초기토양수분, 강수량 등의 다양한 요소들과 함께 제시하였으며, 그에 따른 유출반응시간을 검토하므로써 산지 특성을 가진 설마천 유역의 유출특성을 분석하고자 하였다.

## 2. 연구지역

### 2.1 지역특성

본 연구가 이루어진 설마천 유역은 임진강의 제 1 지류로서, 임진강 하구에서 약 46 km 정도 떨어진 곳에 위치해 있다. 유역의 면적은 18.56 km<sup>2</sup>, 연장은 10.77 km이며, 동경 126° 52' 44" ~ 126° 58' 40", 북위 37° 55' 00" ~ 37° 58' 05"에 위치하고 있다(Kim et al., 2019).

설마천은 하천수리학적으로는 전형적인 급경사 산지 사행 하천으로 분류된다. 설마천 유역은 경기편마암 복합체로 이루어져 있는데, 유역의 남부는 호상의 엽리를 보이는 편마암이 주를 이루며, 유역의 북부로 갈수록 안구상 편마암(augengneiss)이 주를 이룬다. 지질구조학적인 측면에서 보면 설마천은 작은 절리가 잘 발달된 지형인데, 절리나 단층의 틈이 좁고 연장성이 강하지 않은 특성을 지니고 있다. 그러한 지질구조상 특성으로 인해 초기 강우 시의 소량의 강우에는 하천의 수위에 큰 변화가 나타나지 않지만, 이후에 파쇄대가 다 채워지면 하천 수위가 급격하게 증가하는 현상이 발생한다.

미국 농무부(U.S Department of Agriculture, USDA)의 토성 분류를 기준으로 보면 설마천 유역 내의 대부분의 지역은 주로 Loamy sand로 이루어져 있으며, 이러한 흙은 쉽게 부서지고, 약간의 미사와 점토 등이 묻어나는 특성을 갖고 있다. 일반적인 토양의 용적밀도는 1.0~1.2 g/cm<sup>3</sup>인데 반해 설마천 유역은 평균적으로 0.92 g/cm<sup>3</sup>의 낮은 용적밀도를 갖고 있는데, 이는 유기물, 화학물질, 토양미생물 등에 의해 발생한 입단화(soil aggregation)로 토양에 대공극이 활발하게 발달하게 되었기 때문으로 보인다. 그러한 특성들로 인해 설마천 유역에서는 물의 저류보다는 배수가 활발하게 발생하는 것으로 판단된다(Kim et al., 2019). 설마천 유역의 식생은 90% 이상이 20~40년 수령의 침엽수와 활엽수로 구성되어 있으며,

침엽수는 대부분 조림수이다. 설마천은 표토가 얇아 수분 함양능력이 비교적 낮고, 산지 사면에 다량의 돌과 자갈이 산재해 있어 집중호우 발생 시 토석류가 발생하는 특성을 지니고 있다(KICT, 2013).

현재 설마천 유역에서는 강우량관측소, 수위관측소, 증발산량관측소, 토양수분 관측소가 운영되고 있다. 강우량 관측소는 6개소(설마리, 감악산, 범륜사, 전적비교, 비룡포대, 빈배이 지점)가 설치되어 있으며, 최소 관측단위가 0.5 mm(전도형 0.5 mm/0.2 mm, 증량형 0.01 mm)인 장비를 이용해 10분 간격으로 관측을 수행하고 있다(KICT, 2013). 수위관측소 및 지하수면 관측소는 1개소가 전적비교 지점에 설치되어 있는데, 한국건설기술연구원이 매년 유량측정을 수행하여 수위자료와 유량자료를 생산하고 있다. Flux tower 1개소와 토양수분관측소 1개소는 범륜사 인근 사면에 설치되어 있으며, Flux tower에서는 에디공분산(eddy covariance) 방법을 이용해 증발산량자료와 강우량을 관측하고 있고, 토양수분 관측소에서는 TDR 방식을 이용해 토양수분 자료를 생산하고 있다(Fig. 1).

## 2.2 유량, 강우, 토양수분 자료

본 연구에는 설마천 관측소 유역은 한국건설기술연구원과 한국수자원조사기술원에서 운영 및 관리를 수행하고 있으

며, 수위 관측소 1개, 지하수면 관측소 1개, 강우량 관측소 7개, 토양수분 관측소 19개 지점이 설치되어 있다. 특히 강우량 관측소는 7개의(설마리, 감악산, 범륜사, 전적비교, 비룡포대, 빈배이, Flux tower)지점이 설치되어 있으나 빈배이 지점의 고장으로 본 연구에서는 6개의 강우량 관측소가 활용되었으며, 자료는 2016년부터 2017년까지의 동절기 결빙이 발생한 날을 제외한 자료가 사용되었다. 해당 지역의 관측소에서는 수위와 강우량을 10분 단위로 관측하고 있으나 토양수분 자료와의 비교를 위해 1시간 단위로 평균을 계산한 자료를 사용하였다.

본 관측소에 설치된 토양수분 관측센서는 TDR (Time Domain Reflectometer)방식을 이용하였으며, 탐침을 통해 전자기 펄스를 내보내면 토양내의 수분에 따라 변하는 유전상수에 의해 속도가 결정되는 반향파의 속도를 계산하여 토양수분을 산정하는 정확도 높은 측정 방식이다. 토양수분 관측 지점은 총 19개(총 51개 센서)가 설치되어 있으며, 토양내 유출 흐름에 따라 A, B, C 라인으로 나누어 관측지점을 설치하고 각 지점마다 10 cm, 30 cm, 60 cm의 깊이로 탐침을 설치하였다(Fig. 1). A라인에는 사면 상단부의 A1부터 사면 하단부의 A7에 이르기까지 8개의 지점에 토심별로 총 21개의 센서가 매설되어 있다. B라인에는 사면 상단의 B1에서 하단의 B8에

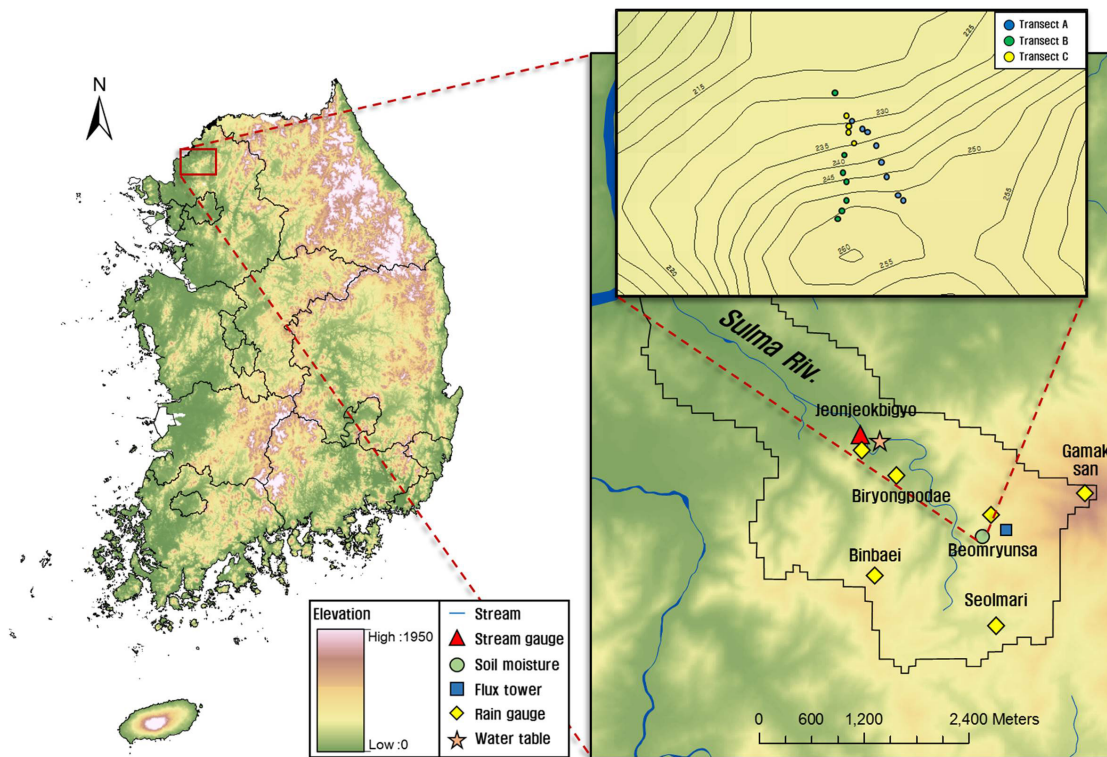


Fig. 1. Location of study area (Seolmacheon basin)

이르기까지 7개 지점에 토심별로 총 18개의 센서가 설치되어 있으며, 사면 하단부에 위치한 C라인에는 4개 지점에 총 12개의 센서가 토심별로 매설되어 있다. 토양수분 자료는 동절기 결빙기간을 제외한 나머지 기간에는 2시간 간격으로 반복적으로 측정되고 있다.

### 3. 방법론

#### 3.1 직접유출 사상 선정

유출반응의 분석을 위해 우선적으로 단일 강우사상을 분리하여 사상별로 유량과 토양수분을 분석하였다. 강우는 단속적인(intermittent) 성격을 지니기 때문에 강우사상을 어떤 기준으로 분리하였는가에 따라 사상(event)별 특성이 상이하게 달라지므로 적절한 기준을 선택해 단일 강우사상을 분리해 주어야 한다. 강우사상을 분리하는 방법으로는 N-day, Uniform, SCS Distributions, Yen-Chow, Huff's Quartile Distributions 등 다양한 방법이 제시되고 있으나 국내 연구에서는 10시간에서 12시간 정도 무강우가 이어지면 강우사상을 분리하는 것을 권장하고 있다(Kwon *et al.*, 2004). 본 연구에서도 최소 무강우 간격을 12시간으로 선정 하였으며, 총 강우량이 10 mm 이상인 강우사상만을 분리하였다(Fig. 2). 설마천 유역에서는 겨울철 결빙기간을 제외한 2년(2016, 2017년) 동안 총 40개의 사상이 산출되었다(Fig. 3, Table 1).

강우가 유출에 직접적으로 미치는 영향을 분석하기 위해

각각의 강우사상별로 수문곡선분리(hydrograph separation)를 수행하였으며, K상수 방법(constant-K method)을 이용하여 총 유출(Q)을 기저유출(Q<sub>0</sub>)과 직접유출(Q<sub>s</sub>)로 분리했다. K 상수 방법은 직접유출이 지수함수 형태로 감소하고 기저유출은 일차함수 형태로 저장된다는 가정을 기초로 하여 두 유출 사이의 거동이 유사성을 갖는 시간을 기준으로 분리하는 방법이다(Blume *et al.*, 2007). 유출의 감쇠 곡선은 지하수면의 흐름, 수직 흐름 성분 및 모세관 효과를 무시할 수 있다는 가정의 Dupuit-Boussinesq식을 사용하였다. 이는 t 시간에서의 Eq. (1)과 같으며 여기서, k 감쇠 변수, Q<sub>0</sub>는 초기 흐름 값이다.

$$Q(t) = Q_0 e^{-kt} \tag{1}$$

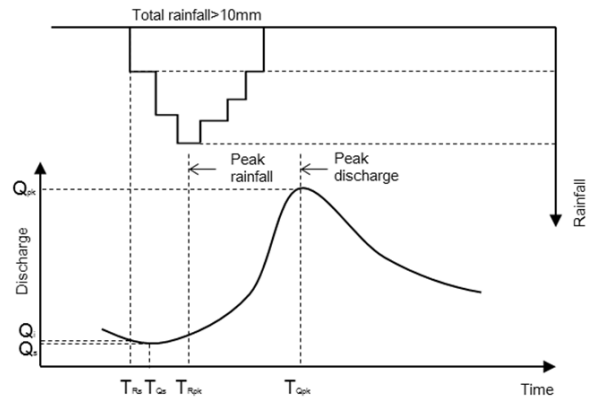
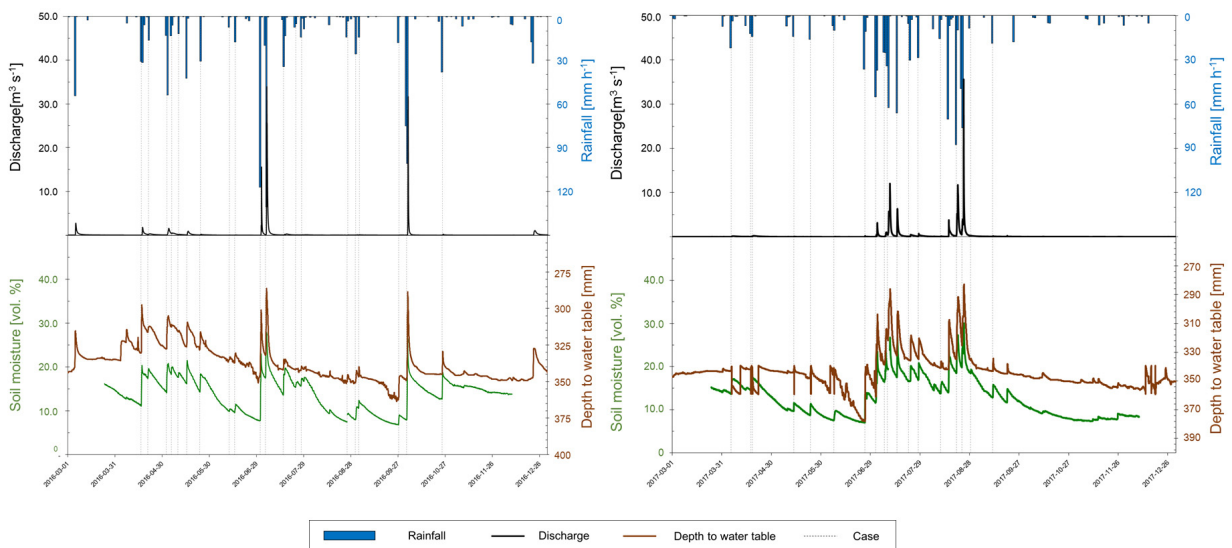


Fig. 2. The conception of storm event using hydrograph



(a) 2016 Year

(b) 2017 Year

Fig. 3. Time series of rainfall, soil moisture, discharge, and depth of water table

**Table 1.** Storm characteristics for 40 events (Properties of selected rainfall-runoff events)

DATE	Total Rainfall (mm)	Duration (h)	Total direct runoff (mm)	Peak discharge (m <sup>3</sup> /s)	Soil moisture storage change (mm)	Runoff coefficient (-)
2016-04-16 14:00	65.50	53	4.71	1.80	43.45	0.07
2016-04-21 00:00	17.50	10	0.55	0.31	9.26	0.03
2016-05-02 19:00	58.50	29	8.14	1.57	12.18	0.14
2016-05-05 21:00	20.50	17	0.38	0.53	9.58	0.02
2016-05-10 04:00	12.00	11	0.45	0.21	0.47	0.04
2016-05-15 15:00	44.00	12	7.77	0.94	16.07	0.18
2016-05-24 02:00	28.50	13	0.40	0.25	13.66	0.01
2016-06-11 16:00	16.00	10	0.01	0.04	2.02	0.00
2016-06-15 06:00	18.50	12	0.11	0.05	6.88	0.01
2016-07-01 13:00	112.50	11	33.11	15.39	61.95	0.29
2016-07-04 17:00	159.50	32	140.74	33.94	12.38	0.88
2016-07-15 23:00	52.00	51	2.10	0.28	31.08	0.04
2016-07-23 18:00	15.50	16	0.13	0.09	6.64	0.01
2016-07-27 12:00	15.00	16	0.13	0.11	0.55	0.01
2016-07-29 04:00	11.50	5	0.46	0.11	-3.20	0.04
2016-08-25 17:00	20.00	13	0.18	0.06	10.40	0.01
2016-08-30 22:00	25.00	21	0.45	0.10	16.64	0.02
2016-09-02 03:00	12.50	2	0.32	0.13	3.71	0.03
2016-09-27 11:00	17.00	12	0.08	0.05	11.51	0.00
2016-10-02 12:00	211.50	18	107.48	31.68	70.79	0.51
2016-10-25 01:00	37.50	12	1.03	0.24	29.27	0.03
2017-04-05 14:00	24.50	14	1.00	0.17	19.37	0.04
2017-04-17 12:00	11.50	4	0.17	0.10	6.90	0.01
2017-04-18 12:00	15.00	9	0.65	0.24	8.28	0.04
2017-05-13 15:00	14.00	2	0.33	0.08	8.92	0.02
2017-05-23 15:00	15.00	6	0.15	0.06	12.04	0.01
2017-06-06 18:00	24.00	20	0.20	0.04	13.45	0.01
2017-06-25 17:00	42.50	17	1.12	0.23	41.15	0.03
2017-07-02 05:00	82.00	24	13.39	3.19	36.41	0.16
2017-07-07 10:00	48.50	26	5.42	1.04	15.13	0.11
2017-07-09 04:00	85.50	31	84.61	11.99	-4.15	0.99
2017-07-15 02:00	61.50	15	36.10	6.36	10.94	0.59
2017-07-22 04:00	25.50	38	2.20	0.51	17.53	0.09
2017-07-27 23:00	18.00	18	2.61	0.76	14.33	0.15
2017-08-10 14:00	15.50	16	0.73	0.18	1.71	0.05
2017-08-15 03:00	78.00	28	15.66	3.82	38.89	0.20
2017-08-20 02:00	95.50	32	91.03	11.73	3.84	0.95
2017-08-23 10:00	142.00	29	82.93	35.13	-20.99	0.58
2017-08-28 17:00	10.00	4	0.44	0.32	3.54	0.04
2017-09-11 01:00	18.50	7	0.40	0.20	15.84	0.02

$k$ 를 계산하기 위해서는 미분을 하여 Eq. (2)와 같이 나타내었다.

$$k = -\frac{dQ}{dt} \frac{1}{Q(t)} \quad (2)$$

여기서, 직접유출이 시작되는 지점( $t_s$ )으로부터 끝나는 지점( $t_e$ )까지를 보간(interpolation)해 기저유출을 분리하였으며, 직접유출은 총 유출에서 기저유출을 제외하여 산정하였다.

유역 내에 내리는 강우로부터 하천 지점까지의 직접적인 유출반응을 분석하는 데에는 강우 유출을 강우량으로 나누어 산정한 유출계수(runoff coefficient,  $\Phi$ )가 사용되었다(Eq. (3)).

$$\Phi = \frac{Q_s}{P} \quad (3)$$

또한 본 연구에서 선행토양수분(antecedent soil moisture, ASM)은 강우 사상이 발생하였을 때의 최대 토양수분량으로 설정하였으며, 토양의 저류량의 변화( $\Delta S$ )는 토양수분 측정 개수( $n_i$ ) 깊이별로 초기 토양수분( $\bar{\theta}_{i,1}$ )과 종료 토양수분( $\bar{\theta}_{i,l}$ )의 차이 및 층의 두께( $m_i$ )를 활용하여 Eq. (4)와 같이 산정하였다. 토양수분 탐침의 측정 반경은 대략 반경 10~20 cm으로, 토심이 10 cm일 때  $m_i$ 를 20 cm로, 토심이 30 cm일 때  $m_i$ 를 20 cm로, 토심이 60 cm일 때  $m_i$ 를 40 cm로 적용하여 토양 저류량의 변화를 계산하였다(Lee *et al.*, 2015).

$$\Delta S = \sum_{i=1}^{n_i} \frac{1}{100} (\bar{\theta}_{f,i} - \bar{\theta}_{i,1}) \cdot m_i \quad (4)$$

## 4. 결과

### 4.1 토양수분상태에 따른 유출 거동 분석

#### 4.1.1 선행토양수분-유출계수 분석

유출계수는 유역의 특성(지형의 경사, 토양의 포화도, 다공성, 식생, 저장성 등)에 영향을 받는다(Liu *et al.*, 2006). 침투성이 낮고 유속이 높은 지역에서는 유출계수가 크고, 침투성이 높고 식생이 많은 지역에서는 유출계수가 작은 특성을 보인다. 본 연구에서는 2년(2016년, 2017년) 간 설마천 유역에서 발생한 40개의 강우 사상을 추출하여 유출계수를 산정하였으며, 유출계수 평균은 0.16으로 계산되었다. 토지이용(land usage)별 유출계수에 관한 연구가 지금까지 다양하게 진행되

어 왔는데, 삼림 유형의 적절한 유출계수는 0.05~0.20으로 제시되고 있다(Mutreja, 1990; Subramanya, 2013). 삼림 유형인 설마천 유역의 유출계수 평균은 0.16으로 산정되었는데, 이는 적절한 수치라고 판단된다.

Fig. 4는 각각의 강우사상에 대한 유출계수와 선행토양수분을 산포도로 표현한 것이다. 전체 강우사상에 대한 선행토양수분의 최솟값은 9.8%, 최댓값은 29.8%로 나타났으며, 그 분포는 지수함수 곡선의 형태를 보였다.

선행토양수분에 따라 유출계수가 지수곡선의 형태로 증가하는 특성은 Song and Wang (2019)의 선행토양수분-유출계수 실내 실험에서도 비슷한 결과를 보였는데, 이는 연구에서는 모든 토양층은 토양수분 임계점을 기준으로 유출계수가 급격하게 증가하는 지수함수의 특성을 보였다.

James and Roulet (2007)와 Penna *et al.* (2011)은 급격하게 증가가 시작되는 부분에서 선행토양수분 임계값을 기준으로 하여 유출계수를 건조 상태와 습윤 상태로 나누어 특성을 분석하는데 사용하였으며, 본 연구에서도 유출계수가 급격하게 증가하기 시작할 때의 선행토양수분(약 20%)을 임계값으로 설정하였다.

선행토양수분이 임계값을 초과하였을 때 유출계수가 급격하게 증가하는 이유는 두 가지 측면과 관련이 있는 것으로 판단된다. 첫 번째는 토양이 공극 내에 함유할 수 있는 최대 수분량을 의미 하는 포장용수량(field capacity)에 대한 영향이다. 포장용수량의 크기는 토양특성에 크게 좌우되는데, 토양특성별 포장용수량은 Kaufman and Cleveland (2008) 관계곡선을 통해 확인할 수 있다(Fig. 5). 제시된 관계곡선에 따르면, 사토(loamy sand)와 사양토(sandy loam)의 포장용수량은 약 20% 정도로써, 이는 본 연구를 통해 분석한 설마천 유역의 토양수분 임계값과 유사함을 나타냈다.

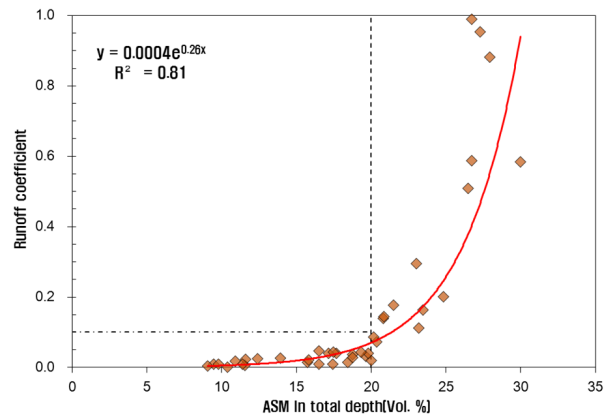


Fig. 4. Relationship between the runoff coefficient and ASM in total depth

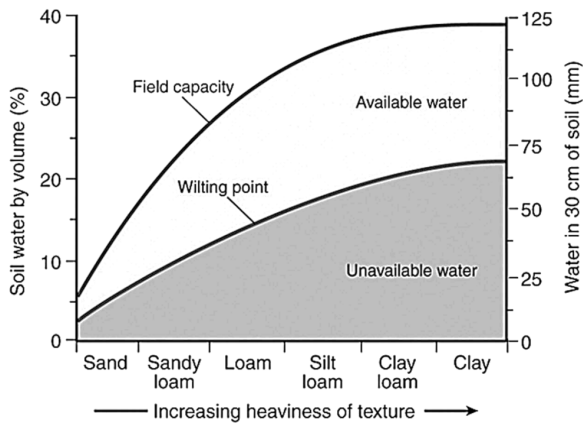


Fig. 5. Soil texture and soil water (Kaufmann and Cleveland, 2008)

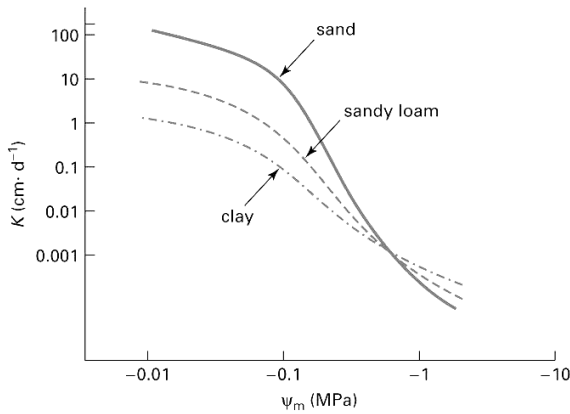


Fig. 6. General shape of the unsaturated hydraulic conductivity (Musy and Soutter, 1991)

두 번째는 매트릭 퍼텐셜(matric potential,  $\psi_m$ )과 수리전도도(hydraulic conductivity,  $K$ )이다. 매트릭 퍼텐셜은 흙 입자와 수분 사이의 흡착력, 모세관력, 입자간의 장력 등과 같은 힘이며, 토양수분이 포화상태에 가까워질수록 매트릭 퍼텐

셜은 0에 가까워지며 물의 이동에 영향을 끼치지 못한다. 또한, Musy and Soutter (1991)에 따르면 매트릭 퍼텐셜과 수리전도도는 반비례 관계에 있으며, 그 증감은 Fig. 6과 같이 나타난다고 제시하고 있다. Darcy의 법칙(Eq. (5))에서 동수경사( $I$ )가 같을 때 수리전도도는 토양수분의 이동속도( $V$ ) 및 투과유량( $Q_z$ )과 비례하기 때문에 매트릭 퍼텐셜의 감소는 토양수분 유출량의 증가로 이어진다고 할 수 있다.

$$Q_z = AV = A \cdot K \cdot I = A \cdot K \cdot \frac{dh}{dl} \quad (5)$$

위의 두 가지 측면을 바탕으로 분석해 보면, 사토와 사양토의 표장용수량은 약 20%이기 때문에 설마친 유역은 토양수분이 약 20% 일 때 토양이 포화상태에 도달하며, 매트릭 퍼텐셜이 매우 작아지고 수리전도도가 높아진다는 것을 알 수 있다. 그리고 수리전도도가 증가했기 때문에 Darcy의 법칙에 의해 토양 내 수분의 이동속도와 유출량 역시 커진다는 것을 알 수 있으며, 유출계수의 정의에 의해 유출계수도 유출량과 함께 증가한다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 다룬 설마친 유역의 강우 사상에 대한 선행토양수분-유출계수의 분포는 표장용수량, 매트릭 퍼텐셜의 영향으로 Fig. 4와 같은 지수 함수 곡선 형태를 설명할 수 있다.

#### 4.1.2 토양수분 임계값 평가

위의 분석에서 산정하였던 유출계수와 선행토양수분사이의 임계값을 직접적으로 평가하기 위해 실제 유역 입구의 유출값과 지하수면과의 관계를 토양수분과 비교하였다(Fig. 7). 임계값을 산정한 20%의 토양수분을 기준으로 보았을 때 표면유출 또한 약 20%이상에서 큰 증가폭을 나타내었으며, 지하수면은 더 낮은 약 15%에서 증가하기 시작하여 약 20%에서 변곡점을 나타낸 뒤 지하수면까지의 깊이 290 mm 근처에서

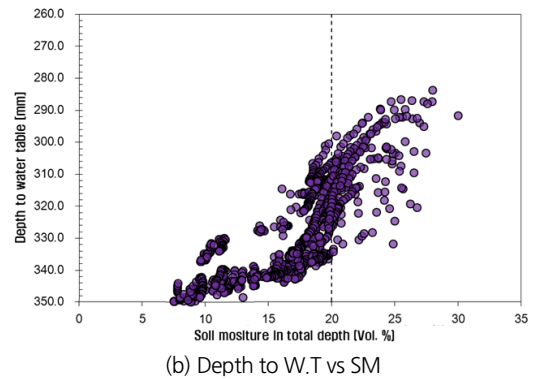
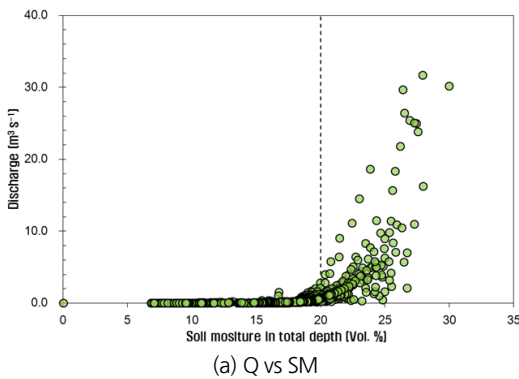


Fig. 7. The behavior in the relationship between (a) discharge and (b) depth of water table to the soil moisture in total depth

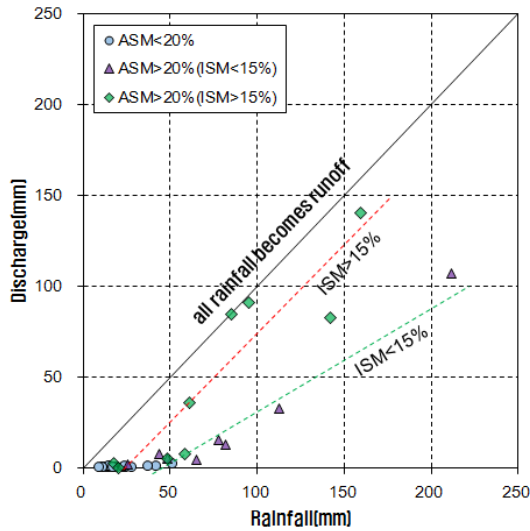


Fig. 8. The relationship between total discharge and total rainfall for all rainfall events

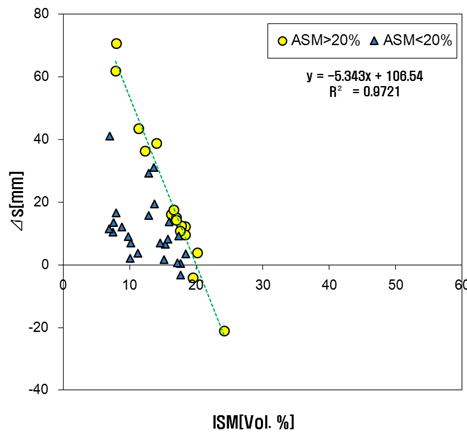
포화하기 시작하였다. 토양수분이 20% 미만인 범위에서는 강우량이 지하수면의 흐름에 우선적으로 기여하며, 지하수면의 상승 기울기가 급증하면서 표면 유출도 동시에 발생하는 것으로 파악되었다.

Fig. 8은 사상별 강우량과 유출량을 분석한 그림으로서 ASM이 20%를 기준으로 나누어 나타내었으며, ASM이 20% 이상일 때는 지하수면의 변동이 시작되는 15%를 기준으로 초기토양수분(ISM)을 나누어 나타내었다. 50 mm 미만의 강우사상을 살펴보면 대부분의 ASM이 20%이하의 값을 보였으며, 이는 50 mm 미만의 강우는 유출을 발생시키지 못하고 대부분이 토양에 저류했기 때문으로 보인다.

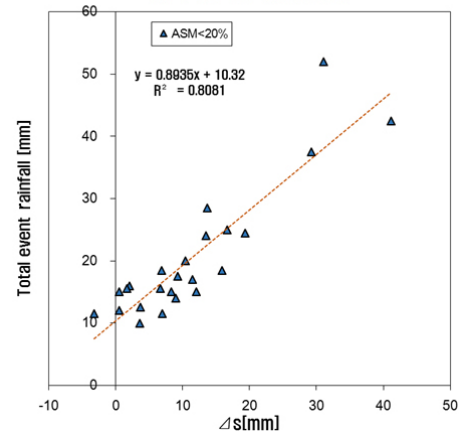
ASM 20% 이상은 강우량에 상관없이 유출이 나타났으며, ISM은 15%이상에서는 ISM은 15%이하에서보다 강우가 유출로 발생(유출계수)할 확률이 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 지하수면이 낮은 상태에서 수두차가 커 지하수면의 보충이 선행되고 난 뒤에 유출이 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 초기토양수분은 지하수면과 밀접하게 연계되어 있으며 이는 유출의 특성에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4.1.3 토양저류량 분석

위의 절에서 강우량과 토양수분의 초기 값(ISM)이 유출의 영향을 미친다는 결과를 통해 적은 강우에서는 토양의 저류 거동으로 판단하였다. 토양 내 저류량의 거동은 토양상태에 따라 큰 상관관계를 내포하고 있다는 판단 하에 토양내의 저류량 간의 관계를 분석하였다. Fig. 9(a)는 ASM이 20%일 때를 기준으로 ISM과 토양 내 저류량 간의 관계를 산점도로 나타낸 그림으로 ASM이 20%이상일 때는  $R^2=0.97$ 로 큰 음의 상관관계를 보였다. ASM가 20% 이상에서는 ISM이 증가할 수록 토양내 저류할 수 있는 양이 줄어들음을 의미한다. 또한 배수가 크게 일어나는 시점인 20%상태에서는 토양내 저류량보다 배수량이 더 크게 바뀔을 확인할 수 있다. 반면에 ASM이 20%미만인 상태에서는 ISM과 토양내 저류량이 큰 상관성을 보이지는 않지만 토양이 포화상태를 이루기 이전 상태이기 때문에 토양의 저류량은 사상내 총 강우량과 비례함을 그림과 같이 확인할 수 있다(Fig. 9(b)). 따라서 강우량과 ASM과 ISM의 조건에 따라 토양의 저류량의 거동은 달라지며 이러한 변수들이 유출특성에 기여하는 것으로 판단된다.



(a)  $\Delta S$  vs ISM



(b)  $\Delta S$  vs Total event rainfall

Fig. 9. Pearson's correlation graph (a) The correlation between ISM and  $\Delta S$  for ISM>20% and ISM<20% (b) The correlation between total event rainfall and  $\Delta S$  for ASM<20%



### 4.2 반응시간 분석

본 절에서는 유역 내에서 강우가 지표면 아래의 토양수분, 유출량, 지하수면의 거동시간에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하기 위해 강우가 발생하여 지표면에 도달하는 시간과 흐름이 정점에 도달하기까지의 시간을 분석하였다.

Fig. 10에서는 토심별 토양수분, 유출, 지하수면의 반응 시간에 대한 분포를 건조 및 습윤 상태 구분하여 상자도표(boxplot)로 나타내었다. 우선 강우에 대한 반응시간을 살펴 보면 전반적으로 건조 상태와 습윤 상태에서 모두 비슷한 반응시간을 보였으며, 토양수분은 10 cm, 30 cm, 60 cm 순으로 반응시간을 보였다. 토양수분과 지하수면의 흐름 반응은 일반적으로 하천 흐름보다 빠르게 발생하지만 본 유역에서는 일부분 하천의 흐름이 우선적으로 발생되었다. 이는 설마천 유역의 산지특성으로 인해 강우량이 유역에 균일하게 분포되지 않았거나 관측센서가 우선 흐름 경로에 의해 우회되었다는

것을 의미할 수 있다(Blume *et al.*, 2009).

Fig. 11은 토양수분, 유출, 지하수면이 정점에 도달하는데 걸리는 시간을 건조 상태와 습윤 상태일 때로 나누어 반응시간을 비교한 자료이다. 토양수분은 건조 상태일 때와 습윤 상태일 때 모두 토심이 얕을수록 빠르게 반응하는 것을 확인할 수 있었는데, 건조 상태에서의 반응시간(10.72시간)이 습윤 상태일 때의 반응시간(5.25시간)보다 약 5시간 더 긴 것을 확인할 수 있다. 유량은 건조 상태일 때의 반응시간(10.72시간)이 습윤 상태일 때의 반응시간(7.25시간)보다 약 3시간 더 길게 나타났으며, 지하수면은 건조 상태일 때의 반응시간(9.67시간)이 습윤 상태일 때의 반응시간(8.88시간)보다 약 1시간 정도 긴 것을 확인할 수 있다. 토양수분, 유량, 지하수면 모두 건조 상태일 때보다 습윤 상태일 때 더 빠르게 정점에 도달하는 것이 확인되었는데, 이는 토양 내부에 저장되어 있는 수분으로 인해 빠르게 정점에 도달하게 되는 것으로 판단된다.

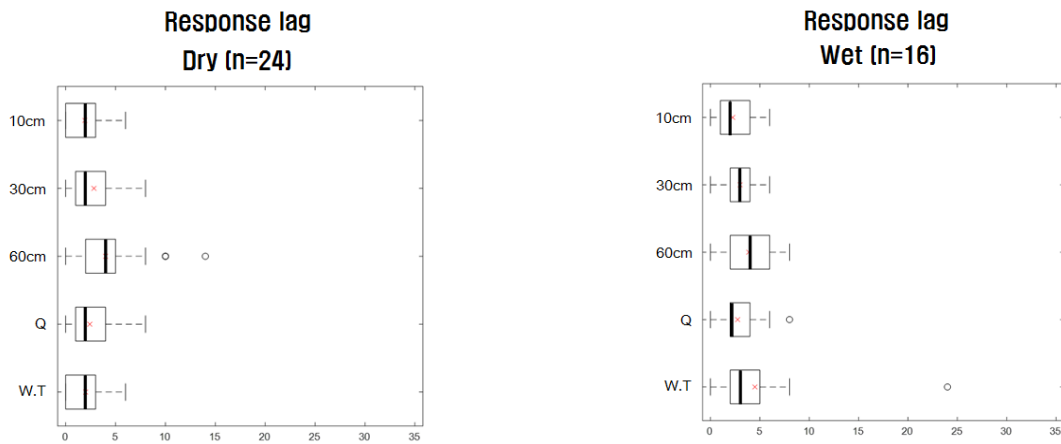


Fig. 10. Lag times of response in soil moisture (10, 30, 60 cm), discharge, and Depth of water table for 40 events

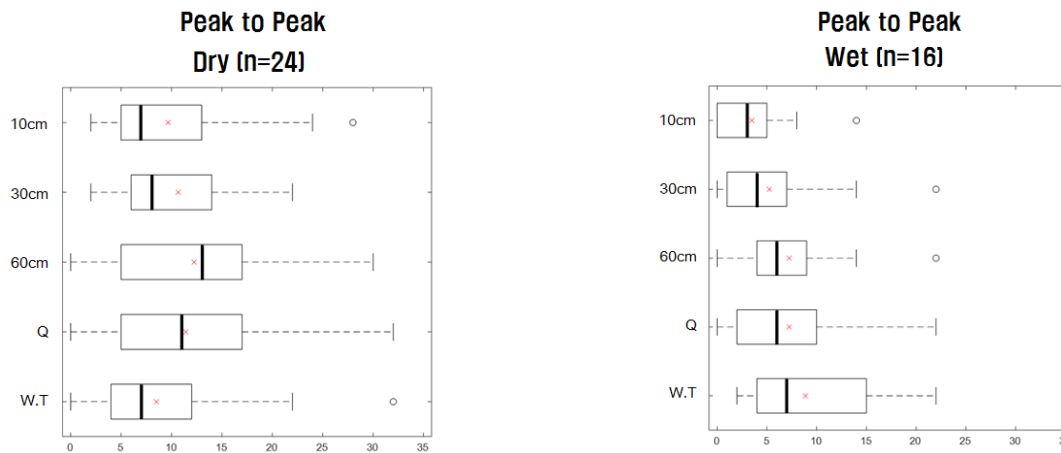


Fig. 11. Lag times of peak in soil moisture (10, 30, 60 cm), discharge, and Depth of water table for 40 events

Fig. 12은 건조 상태인 사상(Event 2)과 습윤 상태인 사상(Event 11)에서의 반응시간을 시계열 그래프로 나타내고, 각 요소들의 반응시작 시간과 정점도달 시간을 분석한 자료이다. 본 유역에서 건조 상태(ASM<20%)일 때 발생한 사상은 대부분 토양수분이 정점에 도달한 후에 지하수면과 유출량 순으로 흐름이 정점에 도달하였다. 그와 반대로, 습윤 상태(ASM>20%)일 때 발생한 사상은 대부분 지하수면, 유출량, 토양수분 순으로 흐름이 정점에 도달하는 것으로 나타났다.

또한, 유출량과 토양수분 반응의 차이뿐만 아니라 유출량과 토양수분의 거동관계를 이력곡선(hysteresis curve)을 통해 확인할 수 있는데, 건조 상태일 때 토양수분이 우선적으로 증가하고 유출량이 뒤따라 증가하기 때문에 반시계 방향의 거동상태를 나타내었으며(Fig. 13(a)), 반면에 습윤 상태에서의 거동은 시계방향의 흐름을 나타내었다(Fig. 13(b)). 이러한 결과는 McGuire and McDonnell (2010) 연구와 상이한 결과를 나타내었으며, Song and Wang (2019)과 유사한 결과로

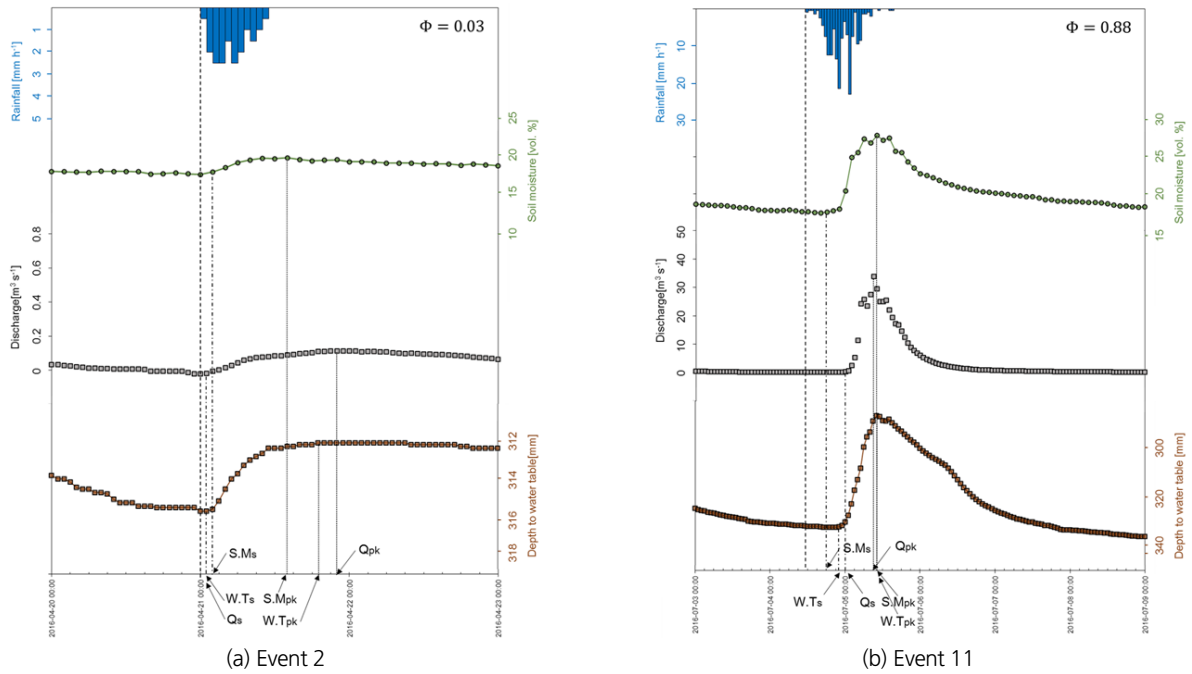


Fig. 12. Time series of rainfall, soil moisture, discharge, and depth to water table (a) dry conditions (20 April 2016), (b) wet conditions (03 July 2016)

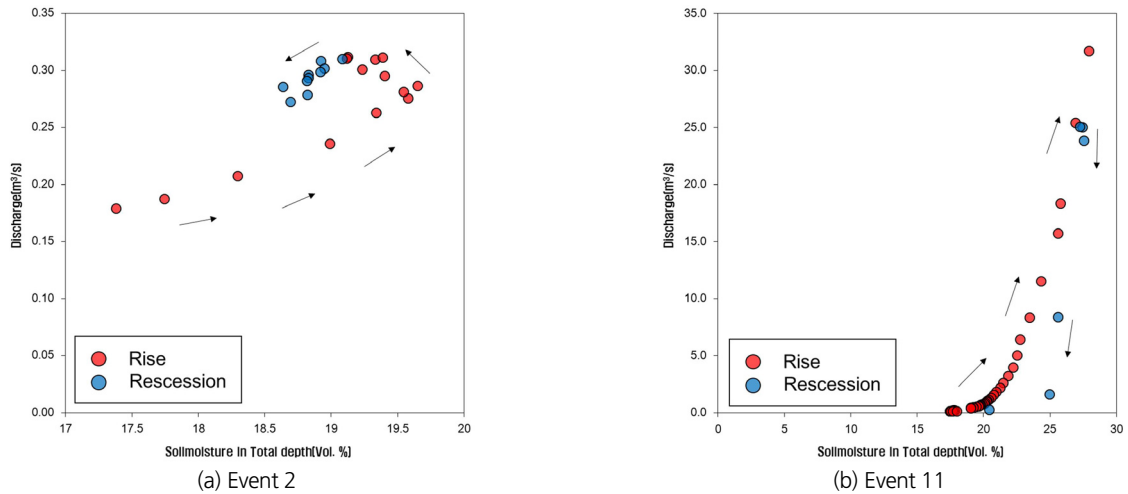


Fig. 13. Hysteretic behaviour in the relationship between soil moisture in total depth and discharge (a) dry conditions (20 April 2016), (b) wet conditions (03 July 2016)

나타났다. 이는 연구지역의 지형적 특성이 반영되어 상이한 결과를 나타낸 것으로 보이며, 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

토양에 저류량이 적은 건조 상태에서는 토양의 매트릭 퍼텐셜이 강해지기 때문에 토양의 수분 저장성이 강해져 유출이 토양수분보다 느리게 발생하였다. 습윤 상태에서는 반대로 매트릭 퍼텐셜이 약해져 수리전도도가 높아지고, 저장결손이 감소해 유출이 토양수분보다 먼저 발생하였다. 다만, 본 유역을 구성하는 토양은 대공극이 발달했기 때문에 침투와 배수가 비교적 빠르게 이루어져 토양수분과 유출량의 변화가 뚜렷하게 관찰되지는 않았다.

## 5. 결론

본 연구에서는 설마천 유역에서 측정된 토양수분, 강우, 유출량자료를 바탕으로 토양수분과 유출간의 특성을 분석하였다. 이를 위해 강우사상 선정, 직접유출 분리, 유출계수 산정, ASM과 ISM의 임계값 결정 등이 이루어 졌으며, 아래와 같은 결과를 얻었다.

- 1) Constant-K 방법을 이용해 각각의 강우사상별로 수문곡선 분리를 수행하여 유출을 기저유출과 직접유출로 나누었으며, 직접유출과 강우자료를 이용해 유출계수를 산정하였다. 설마천 유역의 40개의 강우사상에 대해 산정한 유출계수의 평균은 0.16이었으며, 이는 삼림유형의 적절한 유출계수의 범위(0.05~0.20)에 부합하는 적절한 수치라고 판단하였다.
- 2) 각각의 강우사상을 ASM에 따른 유출계수로 나타내본 결과 유출계수는 ASM이 20%를 초과하는 시점을 기준으로 급격하게 증가하였다. 이에 따라 본 연구에서는 ASM 20%를 유출계수가 급격하게 증가하기 시작하는 임계값으로 결정하였다. 이를 토양특성별 포장용수량 관계 곡선과 비교해본 결과 토양수분 임계값이 설마천 유역의 대부분을 구성하는 loamy sand/sandy loam의 포장용수량과 유사함을 보였다.
- 3) 임계값을 평가하기 위해 유역입구에서의 실제 유출량-토양수분 관계, 지하수면-토양수분 관계를 분석해보았을 때, 실제 유출은 토양수분이 20%를 기준으로 증가하였다. 또한, 토양수분이 15%를 초과하면 지하수면이 급격하게 증가하다가 20%부터 그 변화가 적어지는 것을 확인할 수 있었다.
- 4) Fig. 8을 통해 50 mm 미만인 강우사상의 경우에는 유출이 거의 발생하지 않고 대부분의 강우가 토양에 저류되는 특성을 보였다. 이는 대부분 ASM이 20%에 도달하지 못했기 때문이다. ASM>20%인 경우는 ISM이 15%를 초과한 경우와 그렇지 않은 경우로 나누어 분석을 수행하였는데, 강우량이 비슷해도 ISM>15%인 경우가 ISM<15%인 경우보다 많은 양의 유출이 일어났다. 이는 ISM<15%인 유출이 일어나기까지 더 많은 양의 지하수면 보충이 이뤄져야하기 때문인 것으로 판단하였다.
- 5) 강우사상을 ASM이 20%를 초과하는 경우와 그렇지 않은 경우로 나누어 ISM과 토양내 저류량간의 상관관계를 분석해본 결과, ASM>20%인 강우사상에서는  $R^2=0.97$ 로 큰 음의 상관관계가 관찰되었으며, 지하수면의 상승이 작아지는 ISM>20% 에서는 배수가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 반면, ASM<20%인 강우사상에서는 ISM과 토양내 저류량 간에 큰 상관관계가 관찰되지 않았지만 토양의 저류량과 총 강우량이 비례하는 것은 확인할 수 있었다.
- 6) 토심별 토양수분, 유출, 지하수면과 강우에 대한 반응시간의 분포를 건조 및 습윤 상태로 구분하여 분석해본 결과 강우에 대한 반응시간은 건조 상태와 습윤 상태에서 모두 비슷한 반응시간을 보였으며, 토양수분은 토심 10 cm, 30 cm, 60 cm순으로 빠르게 반응하였다. 전반적으로 토양수분이 하천 흐름보다 빠르게 반응하였지만, 일부 지역에서는 하천 흐름이 토양 수분보다 빠르게 반응하였다.
- 7) 토심별 토양수분과 유출, 지하수면이 정점에 도달하는데 걸리는 시간을 건조 상태와 습윤 상태로 나누어 비교해본 결과, 토양수분은 건조 상태일 때와 습윤 상태일 때 모두 토심이 얕을수록 정점에 빠르게 도달하였다. 토양수분은 건조 상태에서는 10.72시간, 습윤 상태에서는 5.25시간이 걸렸다. 유출은 건조 상태에서 10.72시간, 습윤 상태에서 7.25시간, 지하수면은 건조 상태에서는 9.67시간, 습윤 상태에서 8.88시간에 정점에 도달하는 특성을 보였다.
- 8) 건조/습윤 상태에 따른 토양수분, 유출, 지하수면의 정점 도달 소요시간을 분석해본 결과, 건조 상태(ASM<20%)에서는 토양수분, 지하수면, 유출 순으로 빨랐고, 습윤 상태(ASM>20%)에서는 지하수면, 유출, 토양수분 순을 보였다.

본 연구는 소규모 유역에서의 토양수분과 유출간의 특성을 분석한 결과로서, 향후 다양한 유역과 조건들을 연구하여 적용성을 검토한다면 하천의 흐름에 이해를 높이고 홍수와 가뭄에 대한 예방책을 강구할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(18CTAP-C143685-01)에 의해 수행되었습니다. 또한, 설마천 유역의 수문자료를 제공해주신 한국건설기술연구원 김동필 박사님께 감사드립니다.

## References

- Arya, L. M., and Paris, J. F. (1981). "A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data 1." *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 45, No. 6, pp. 1023-1030.
- Blume, T., Zehe, E., and Bronstert, A. (2007). "Rainfall-runoff response, event-based runoff coefficients and hydrograph separation." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 52, No. 5, pp. 843-862.
- Blume, T., Zehe, E., and Bronstert, A. (2009). "Use of soil moisture dynamics and patterns at different spatio-temporal scales for the investigation of subsurface flow processes." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 13, No. 7, pp. 1215-1233.
- Dorigo, W. A., Wagner, W., Hohensinn, R., Hahn, S., Paulik, C., Xaver, A., Gruber, A., Drusch, M., Mecklenburg, S., van Oevelen, P., Robock, A., and Jackson, T. (2011). "The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15, No. 3, pp. 1675-1698.
- James, A. L., and Roulet, N. T. (2007). "Investigating hydrologic connectivity and its association with threshold change in runoff response in a temperate forested watershed." *Hydrological Processes: An International Journal*, Vol. 21, No. 25, pp. 3391-3408.
- Jeong, J., Cho, S., Baik, J., and Choi, M. (2018). "A study on the establishment of a Korean soil moisture network (2): Measurement of intermediate-scale soil moisture using a cosmic-ray sensor." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 7, pp. 83-91.
- Kaufmann, R. K., and Cleveland, C. J. (2008). *Environmental science*. McGraw-Hill College, New York, N.Y.
- Kim, K., Jeong, S., and Lee, Y. (2019). "A Study for establishment of soil moisture station in mountain terrain (1): the representative analysis of soil moisture for construction of Cosmic-ray verification system." *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 52, No. 1, pp. 51-60.
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) (2013). *Hydrological survey for flood forecasting of the mountainous river basin*. pp. 7-12.
- Kwon, J. H., Park, M. J., and Kim, J. H. (2004). "Rainfall analysis to estimate the amount of non-point source pollution." *Journal of Korea Water Resources Association 2004 Conference*, pp. 666-670.
- Lee, Y., Lee, J., Choi, M., and Jung, S. (2015). "Evaluation of MODIS-derived evapotranspiration according to the water budget analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No.10, pp. 831-843.
- Liu, Y. B., Gebremeskel, S., De Smedt, F., Hoffmann, L., and Pfister, L. (2006). "Predicting storm runoff from different land-use classes using a geographical information system-based distributed model." *Hydrological Processes: An International Journal*, Vol. 20, No. 3, pp. 533-548.
- L'vovich, M. I. (1979). *World water resources and their future*. American Geophysical Union, Washington, D.C.
- McGuire, K. J., and McDonnell, J. J. (2010). "Hydrological connectivity of hillslopes and streams: Characteristic time scales and non-linearities." *Water Resources Research*, Vol. 46, No. 10.
- Musy, A., and Soutter, M. (1991). *Physique du sol*. Vol. 6. PPUR presses polytechniques. Lausanne, Switzerland.
- Mutreja, K. N. (1990). *Applied hydrology*. Tata McGraw-Hill, New York, N.Y.
- Penna, D., Tromp-van Meerveld, H. J., Gobbi, A., Borga, M., and Dalla Fontana, G. (2011). "The influence of soil moisture on threshold runoff generation processes in an alpine headwater catchment." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15, No. 3, pp. 689-702.
- Reichle, R. H., and Koster, R. D. (2005). "Global assimilation of satellite surface soil moisture retrievals into the NASA Catchment land surface model." *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, No. 2.
- Reynolds, S. G. (1970). "The gravimetric method of soil moisture determination Part IA study of equipment, and methodological problems." *Journal of Hydrology*, Vol. 11 No. 3, pp. 258-273.
- Song, S., and Wang, W. (2019). "Impacts of antecedent soil moisture on the rainfall-runoff transformation process based on high-resolution observations in soil tank experiments." *Water*, Vol. 11, No. 2, pp. 296.
- Subramanya, K. (2013). *Engineering hydrology, 4e*. Tata McGraw-Hill Education, New York, N.Y.
- Topp, G. C. (1971). "Soil water hysteresis in silt loam and clay loam soils." *Water Resources Research*, Vol. 7, No. 4, pp. 914-920.
- Walker, J. P., Willgoose, G. R., and Kalma, J. D. (2004). "In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques." *Journal of Hydrology*, Vol. 293, No. 1-4, pp. 85-99.
- Zehe, E., Becker, R., Bárdossy, A., and Plate, E. (2005). "Uncertainty of simulated catchment runoff response in the presence of threshold processes: Role of initial soil moisture and precipitation." *Journal of hydrology*, Vol. 315, No. 1-4, pp. 183-202.