



해안분지의 현장 토양수분 관측과 HYDRUS-1D 모델링을 이용한 지하수 함양 추정

김정직^{1,2} · 전우현^{1,2} · 이진용^{1,2,*}

¹강원대학교 지질학과

²강원대학교 크리티컬존선도연구실

요 약

본 연구에서는 강원도 양구군 해안면에서 토양수분 관측과 수치 모델링을 이용하여 강우에 따른 잠재 지하수 함양량을 정량적으로 추정하였다. 토양수분 모니터링을 위해 깊이별(30, 60, 90 cm)로 토양수분 센서를 4지점(YHS1-4)에 설치하였으며 YHS3 주변에 자동기상관측 장비도 설치하였다. 토양수분 모니터링 기간은 2017년 3월 25일부터 2018년 3월 25일까지이며 기상관측 기간은 2016년 5월 6일부터 2018년 5월 6일까지이다. HYDRUS 1D 프로그램을 이용하여 우기인 2017년 6월부터 8월까지 수치해석을 수행하였다. 토양수분 모니터링 기간 동안 평균 토양수분함량은 YHS3에서 0.300-0.334 m³/m³로 전반적으로 높았으며 YHS1에서 0.129-0.265 m³/m³의 가장 낮은 수분 함량 범위를 보였다. 토양수분 이동 모델링 결과 현장 관측 값과 모델링 값은 유사하였으나 피크 값들이 모델링 결과가 큰 것으로 나타났다. 관측 및 모델링 자료의 상관분석 결과 r, r², RMSE는 각각 0.88, 0.77, 0.0096으로 높은 상관성 및 낮은 오차율을 나타냈다. 모델링 설정기간 동안 500 cm 깊이에서의 총 잠재 지하수 함양량은 744.2 mm로 나타났다. 이는 2017년 강수량(1,214 mm)의 61.3%가 함양된 것으로 나타났다. 연구지역의 잠재 지하수 함양량은 높은 것으로 나타났으며 불포화대를 통한 지하수 함양 추정연구에 유의미한 결과 값을 제공할 수 있을 것으로 여겨진다.

주요어: 토양수분, 기상관측, 잠재 지하수 함양량, HYDRUS-1D, 상관분석

Jeong Jik Kim, Woo-Hyun Jeon and Jin-Yong Lee, 2018, Estimation of deep percolation using field moisture observations and HYDRUS-1D modeling in Haean basin. Journal of the Geological Society of Korea. v. 54, no. 5, p. 545-556

ABSTRACT: This study was conducted to estimate the deep percolation using numerical modeling and field observation data based on rainfall in Haean basin. Soil moisture sensors were installed to monitoring at 30, 60 and 90 cm depths in four sites (YHS1-4) and automatic weather station was installed to around YHS3. Soil moisture and meteorological data was observed from March 25, 2017 to March 25, 2018 and May 06, 2016 to May 06, 2018, respectively. Numerical analysis was performed from June to August, 2017 using the HYDRUS-1D. Average soil moisture contents were high to generally in YHS3 for 0.300 to 0.334 m³/m³ and lowest in YHS1 for 0.129 to 0.265 m³/m³ during the soil moisture monitoring period. The results of soil moisture flow modeling showed that field observations and modeling values were similar but the peak values were larger in the modeling result. Correlation analysis between observation and modeling data showed that r, r² and RMSE were 0.88, 0.77, and 0.0096, respectively. This show high correlation and low error rate. The total deep percolation was 744.2 mm during the period of modelling at 500 cm depth. This showed that 61.3% of the precipitation amount (1,214 mm) was recharged in 2017. Deep percolation amount was high in the study area. This study is expected to provide basic data for the estimation of groundwater recharge through unsaturated zone.

Key words: soil moisture, weather observation, deep percolation, HYDRUS-1D, correlation analysis

(Jeong Jik Kim, Woo-Hyun Jeon and Jin-Yong Lee, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea; Critical Zone Frontier Research Laboratory, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-33-250-8551, E-mail: hydrolee@kangwon.ac.kr

1. 서론

지하수는 농업용수, 공업용수 및 생활용수와 같이 인간 활동에 중요하게 사용되고 있는 중요한 수자원이다. 지하수는 주로 강수에 의해 불포화대 토양으로 침투하여 공급되며 지표수를 통해서도 함양된다. 전 세계적으로 기후변화로 인한 가뭄 및 홍수와 같은 자연재해가 증가하고 있으며 이는 여름철 폭우 또는 강설 비율의 감소 등과 같은 강우패턴의 변화를 야기한다(Lee, K.M. *et al.*, 2011, Baek *et al.*, 2017; Batalha *et al.*, 2018). 이러한 강우패턴의 변화는 토양의 포화능력 이상으로 단시간에 수분이 공급되면서 지표유출을 발생시키고 침투량 및 함양량 감소를 유발한다. 특히 토양수분의 변화는 식생 종류 및 토지 피복 유형에 따라 크게 달라지며 숲보다 초지에서 강우 침투가 크고 선행 강우와 선행 토양수분에 많은 영향을 받는다(Wang *et al.*, 2013; Lozano-Parra *et al.*, 2015; Lai *et al.*, 2016).

토양수분은 대기현상, 식물의 증발산, 강수의 침투 및 지하수 함양 등 지구의 수문 순환 현상을 이해함에 있어 중요한 구성 요소이며 기상, 식생, 토양 특성, 선행토양수분, 토지이용 및 지형조건 등에 따라 다양한 변화를 보인다(Hong *et al.*, 2012). 최근에는 원격탐사 기술의 향상으로 세계 각지에서 Soil Moisture Active Passive (SMAP), Soil Moisture Ocean Salinity (SMOS), Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth observing (AMSR-E) 등의 인공위성 이미지 자료를 이용한 지표 토양수분을 분석하고 있다(Feng and Liu, 2015; Kim *et al.*, 2017). 하지만 우리나라와 같이 대부분이 숲과 산악지형으로 형성된 지역에서는 결과의 불확실성이 증가할 수 있는 한계점이 있다(Shin *et al.*, 2016).

이 밖에 Penna *et al.* (2008)은 경사가 가파른 알프스산지에서 세 분류의 토양 깊이에 따라 토양수분의 시공간 특성을 평가하였으며 토양수분 유동 모델링

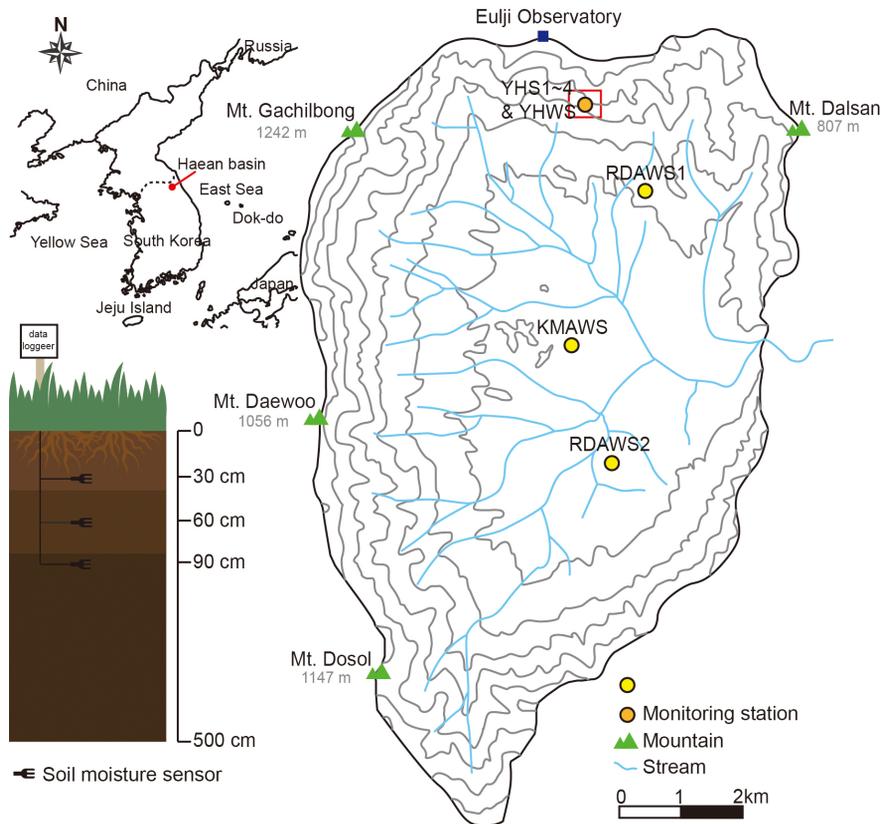


Fig. 1. Location of the Haeen basin and monitoring station.

을 통해 지형특징과 토양수분이 유의미한 상관성을 밝혔다. Leterme *et al.* (2012)과 Batalha *et al.* (2018)은 토양수분 및 기상관측 자료에 따른 지하수 함양량을 HYDRUS-1D 수치모델을 통해 추정 및 평가하였다. 또한 Bah *et al.* (2009)은 불포화대 수치 모델링 프로그램인 HYDRUS-1D와 Water Mod3을 이용하여 강우시 식생성장기와 뿌리깊이에 따라 배수량을 예측하였다. 이처럼 토양수분 연구와 관련하여 인공위성 및 수치모델링 방법 등 다양한 방법을 노력들이 시도되고 있으나 실측된 토양수분 자료를 기반으로 불포화대의 지하수 함양 추정 연구는 미비한 실정이다.

이에 따라 불포화대 토양수분의 모니터링과 실측 자료를 기반으로 한 모델링을 통해 강수에 의해 침투되는 토양수분함량을 정량적으로 평가함으로써 수자원 확보·관리 및 재해 예측에 도움이 될 수 있다. 본 연구에서는 강원도 양구군 해안분지에서 토양수분 및 기상자료를 이용하여 강우에 따른 깊이별 토양수분함량 변화특성과 불포화대 토양수분 이동 모의 프로그램인 HYDRUS-1D를 이용하여 잠재 지하수 함양량을 추정하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구지역

연구지역은 강원도 양구군 해안면 일대의 군사분계선에 인접해 있는 산지로 북위 38°18'51", 동경 128°07'59"에 위치한다. 해안면 주변은 달산령(807 m), 대우산(1,056 m), 도솔산(1,147 m) 및 가칠봉(1,242 m)과 같이 해발고도가 높은 산들로 둘러싸여 있고 내부는 평탄한 분지(약 400 m) 지형이다(그림 1). 분지의 외곽으로 갈수록 경사(약 20-50°)가 급해지며 저지대를 제외하고 대체로 급한 경사를 갖는다(Yoo *et al.*, 2008; Lee, 2009). 이처럼 지형적 조건으로 분지 하부에는 논농사가 주로 이루어지고 중상부에는 고랭지 채소밭으로 이용되고 있다(Lee *et al.*, 2011).

해안 분지 외륜 및 능선부의 지질은 선캄브리아기 변성암 복합체로 규암, 편암 및 편마암을 포함하며 해발고도 400-600 m의 분지 내륜은 주라기 대보 화강암으로 구성되어 변성암 복합체를 관입한다(Won *et al.*, 1987). 농촌진흥청(Rural Development Administration, RDA)에서 제공하는 토양환경지도에 따르면 해안분지의 토성은 표토는 사양토(Sandy loam)에서 양토(Loam), 심토는 사양질(Sandy loam-Loamy sand)로 나타난다. 표토와 양토의 면적은 6,117 ha로 표토에서 사양토는 4,184 ha, 양토는 1,904 ha로 각각 68.4%와 31.1%의 토지면적을 갖는다. 심토에서는 사양질이 85.7%, 식양질이 13.4%를 차지하고 있다(RDA, 2018).

2.2 토양수분 및 기상관측

해안 분지 북쪽에 위치한 산지에 토양수분 모니터링 시스템을 구축하였다(그림 2a). 항공사진 기반의 DEM을 통해 연구지역 및 모니터링 장비의 정확한 고도를 수치화하였다. 토양수분측정 장비는 해발고도 570-612 m에 설치되었으며 상부에 위치한 YHS1과 YHS2 사이의 경사도는 14.5%, 경사각은 약 8.3°로 매우 가파른 경사에 설치되었고 YHS3과 YHS4는 상대적으로 평평한 곳에 설치되었다.

토양수분측정 센서(5TM, METER, USA)는 4개의 모니터링 지점(YHS1-4)에 지표 아래로 각각 30, 60 및 90 cm 깊이로 토양 단면에 설치하였으며 데이터 로거(EM50, METER, USA)에서 10분 간격으로 측정하도록 설정하였다(그림 2b, 2c). 또한 토양의 특

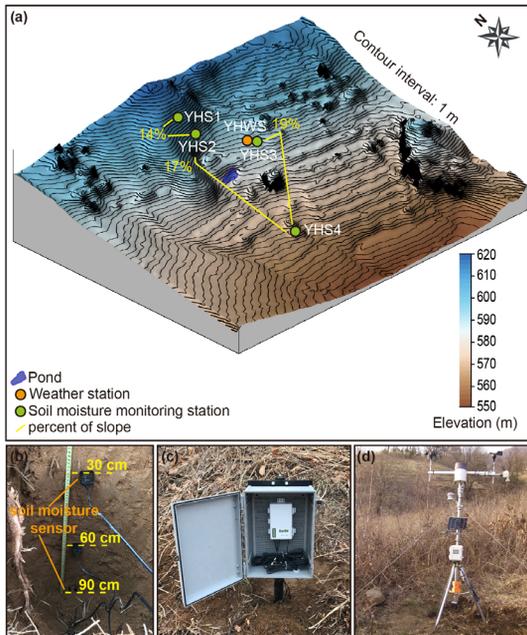


Fig. 2. (a) DEM data of monitoring sites, (b) soil moisture sensors, (c) data logger, (d) automatic weather station.

성을 파악하기 위해 각 지점의 센서가 설치된 지점의 토양 시료를 채취하였다. 채취된 시료는 체분석과 레이저 입도분석(mastersizer 3000, Malvern, U.K)을 통해 모래, 미사, 점토를 분리 후 미국농무성(United States Department of Agriculture, USDA)의 분류에 따라 토양 특성(Soil texture)을 결정하였다.

해안 분지에 설치되어 있는 4 지점의 기상관측소(YHWS, KMAWS, RDAWS1-2)에서 기상자료를 수집하였다(그림 1). YHWS는 본 연구를 위해 2016년 5월 4일에 설치되었으며 일사량, 강우량, 이슬점, 기온, 습도, 풍향 및 풍속을 각각 10분 간격으로 측정하고 있다(그림 2d). 추가적으로 해안면에 위치한 3개의 기상관측소에서 2016년 5월부터 2018년 5월까지 강수량 및 기온 자료를 수집하였으며 KMAWS는 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA), RDAWS는 농촌진흥청(RDA)에서 운영하고 있다.

2.3 HYDRUS-1D 모델링

HYDRUS-1D는 불포화 및 포화된 다공질 매체에서 수직 및 수평으로 온도, 수분, 용질 흐름을 모의 및 분석하는 프로그램이며 이를 통해 잠재 지하수 함양량을 추정하였다(Šimůnek *et al.*, 2008). HYDRUS-1D는 입력 자료로 강수, 토양수분 및 토양온도, 증발산량과 같은 현장 자료 및 토양 수리학적 파라미터(θ_r , θ_s , K_s , α , n , l)를 활용하여 모델들을 통한 수치 해석을 수행하며 지역의 수리지질학적 특성을 분석할 수 있다. 불포화대에서 수분의 수직 및 수평 흐름에 대해 1차원 Richards 방정식이 이용되며 일별 토양수분을 모의할 수 있다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right)] - S \quad (1)$$

여기서 h 는 토양수분 압력수두(L), θ 는 체적토양수분함량(L^3/L^3), t 는 시간(T), z 는 연직 하향 깊이, $K(h)$ 는 불포화 수리전도도(cm/day), S 는 뿌리에 의해 흡수되는 수분량(cm/day)이다. Richards 방정식은 불포화 수리전도도 $K(h)$, 압력수두 h 및 토양수분함량 θ 에 의존하기 때문에 매우 비선형적이다. 이와 같은 토양 수리학적 파라미터들의 변화 관계는 van Genuchten-Mualem (1980) 모델에 의해 설명된다.

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m}, & h < 0 \\ \theta_s, & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (3)$$

여기서 K_s 는 포화 수리전도도, S_e 는 유효 포화도, θ_r 과 θ_s 는 잔여 및 포화수분함량(L^3/L^3), α (cm/day)와 n 은 토양수분 특성 곡선의 실험적 계수, l 은 공극의 연결성을 나타내는 매개변수이다.

모델링 기간은 우기인 2017년 6월 1일부터 8월 31일이며 토양수분의 자료가 결측 없이 측정된 YHWS2가 모델링 지점으로 선택되었다. 관측된 기상자료로부터 Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998)의 방정식을 이용하여 일 잠재 증발산이 계산되었으며 모델링 기간의 입력 값으로 이용하였다. 이 연구에서 식생 유형별 또는 작물별 잠재증발산량 및 뿌리에 의해 흡수되는 수분량은 고려되지 않았다.

토양 단면의 깊이를 지표 아래 지하수면이 500 cm 깊이에 있다고 가정하여 지정하였다(그림 1). 상부 경계 조건(Upper boundary condition)은 지표층에 지표유출을 갖는 대기 경계(Atmospheric boundary)로 선택하였다. 하부 경계 조건(Bottom boundary condition)은 지하수면의 정확한 위치를 모르기 때문에 자유배수(Free drainage)가 선택되었다. 초기 조건(Initial condition)은 2017년 6월 1일 토양수분 센서에서 측정된 토양수분함량을 사용하였다.

토양 수리학적 매개변수들은 HYDRUS-1D에서 제공하는 ROSETTA 매개변수 추정 프로그램에 입도분석 결과 값을 입력하여 초기 매개변수를 추정하였다. 이후 초기 추정된 매개변수들은 Inverse solution을 통해 보정 및 검증 되었다. 잠재 지하수 함양량은 토양 단면 가장 하부에서 계산된 Bottom flux 값을 합산하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 강우에 따른 토양수분 반응

그림 3은 2016년 5월부터 2018년 5월 까지 관측된 3개의 기상관측소들의 월 강수량 및 월 평균 기온을 보여준다. YHWS에서 2017년 2월과 8월에 일부 자료가 결측 되었기 때문에 가장 인접한 곳에 위치한 RDAWS1에서 이를 보완하였다. 2016년 5월부터 2018

년 5월까지 YHWS, KMAWS 및 RDAWS2의 1년 단위 강수량은 각각 1,178 mm와 1,508 mm, 1,143 mm와 1,514 mm, 1,233 mm와 1,411 mm를 보이며 7월에 대부분의 강우가 집중적으로 발생하였다. 기상관측소들에서 관측된 2016년과 2017년 7월 평균 강수량은 각각 487.2 mm (41.3%), 487.7 mm (42.6%),

628 mm (50.9%)로 총 강수량에 40% 이상의 많은 강우가 발생하였다. 관측 기간 동안 평균 기온은 9.0 -9.3°C로 관측되었다.

토양수분함량은 토성에 따라 다를 수 있기 때문에 각 지점의 깊이별로 채취된 토양 시료로부터 입도분석을 통해 토성을 분석하였다 (표 1). 연구지역

Table 1. Distribution of soil composition at each site.

Site	Depth (cm)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil texture
YHS1	surface	87.35	11.65	1	Sand
	30	93.97	5.58	0.45	Sand
	60	91.87	7.74	0.39	Sand
	90	90.75	8.63	0.62	Sand
YHS2	surface	81.29	17.19	1.52	Loamy sand
	30	80.65	17.49	1.86	Loamy sand
	60	74.24	23.57	2.19	Loamy sand
	90	88.09	10.33	1.58	Sand
YHS3	surface	69.64	28.26	2.1	Sandy loam
	30	66.16	32.05	1.79	Sandy loam
	60	77.86	20.69	1.45	Loamy sand
	90	66.01	32.16	1.83	Sandy loam
YHS4	surface	67.06	30.66	2.28	Sandy loam
	30	69.81	28.62	1.57	Sandy loam
	60	73.76	25.09	1.15	Loamy sand
	90	74.79	24.49	0.72	Loamy sand

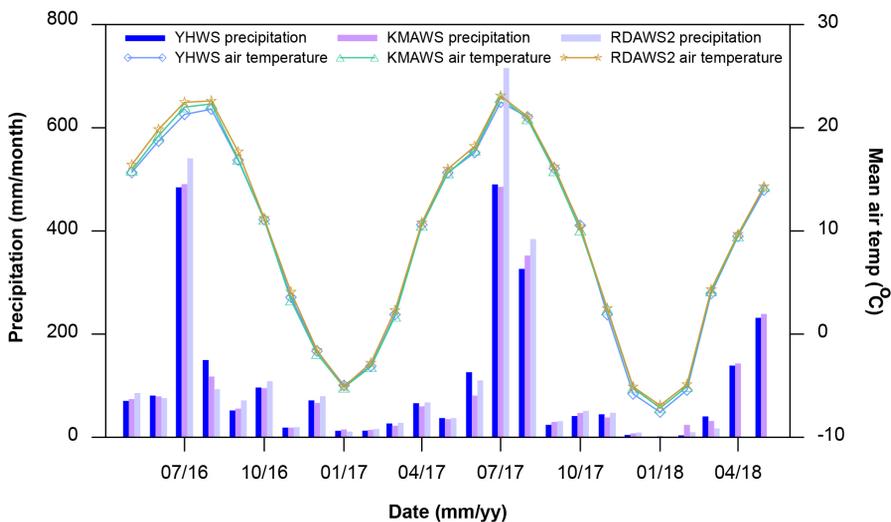


Fig. 3. Comparison of monthly precipitation and monthly mean air temperature in Haean basin at different stations.

Table 2. Basic statistics of soil water content during the monitoring period.

Site	Soil		Measurement period		Soil water content (m^3/m^3)			
	Depth (cm)		Start date (mm/dd/yy)	End date (mm/dd/yy)	Min	Max	Mean	Std
YHS1	30				0.239	0.333	0.265	0.019
					0.185	0.296	0.226	0.029
	60		03/25/17 - 07/13/17 09/13/17 - 03/25/18		0.174	0.275	0.200	0.019
					0.156	0.214	0.172	0.014
	90				0.126	0.260	0.145	0.017
					0.118	0.150	0.129	0.007
YHS2	30				0.223	0.329	0.279	0.020
	60		03/25/17	03/25/18	0.264	0.375	0.297	0.020
	90				0.285	0.389	0.320	0.028
YHS3	30				0.161	0.420	0.300	0.040
	60		03/25/17	03/25/18	0.284	0.412	0.329	0.025
	90				0.299	0.391	0.334	0.020
YHS4	30				0.101	0.376	0.218	0.067
	60		03/25/17	03/25/18	0.170	0.359	0.302	0.047
	90				0.294	0.359	0.335	0.014

의 토성은 모래(Sand)에서 사양토(Sandy loam)로 모래 함량이 주를 이루고 미사가 다수 포함된다. 또한 높은 고도인 YHS1에서 낮은 고도인 YHS4로 갈수록 모래의 함량이 줄어들고 미사의 함량이 증가하는 경향을 보였다.

강우에 따른 토양수분함량 변화 및 반응을 분석하기 위해 2017년 3월 25일부터 2018년 3월 25일까지 토양수분 센서 및 YHWS에서 관측된 자료를 이용하였다. 표 2는 모니터링 기간 동안 각 지점 및 깊이별 토양수분함량의 최대, 최소, 평균 및 표준편차 값을 나타낸 기초 통계표이다. 가장 상부에 위치한 YHS1에서 자연재해로 인해 2017년 7월 14일부터 9월 12일 까지 토양수분 자료의 결측이 발생하였으며 통계 값을 나누어 산정하였다.

각 지점들에서 최대·최소값을 포함한 토양수분함량의 변화를 보았을 때 YHS1에서는 2017년 7월 까지 $0.126-0.333 m^3/m^3$, 9월부터 2018년 3월까지 $0.118-0.296 m^3/m^3$ 의 변동 범위를 보였다. YHS2에서는 $0.223-0.389 m^3/m^3$, YHS3 $0.161-0.420 m^3/m^3$, YHS4 $0.101-0.376 m^3/m^3$ 로 나타났다(표 2). 전체 기간 중 깊이별 평균 토양수분함량은 YHS1에서 가장 낮은 수분 함량 변화들을 보였으며 YHS3에서 전반적으로 높았다. 이

는 YHS1보다 YHS3이 30-90 cm 깊이에서 모래 함량이 10%이상 높아 보수력이 더 낮고 높은 고도 및 경사면에 위치했기 때문일 것으로 판단된다. YHS4에서는 가장 넓은 변동범위를 보였다. YHS1과 YHS4의 30 cm 깊이를 제외하면 $0.270 m^3/m^3$ 이상으로 연평균 토양수분함량이 높은 것으로 나타났다.

그림 4는 모니터링 기간 동안 토양수분과 토양온도가 강우 및 대기 온도에 따라 보이는 반응을 나타내는 시계열 자료이다. 그림 4(a)는 가장 최상부의 YHS1로 토양 깊이가 깊어짐에 따라 토양수분함량이 감소하는 것을 볼 수 있다. 강우 시 30 cm 깊이의 토양수분 변화는 지표에서 가깝기 때문에 대부분 민감하게 반응하며 급격하게 증가한다. 30 및 60 cm 깊이에서는 비교적 적은 양의 강우가 수 시간 지속 되거나 약 3-5 mm/hr 이상 강우 시에 수분 함량이 증가한다. 60 cm 깊이에서는 서서히 증가하다가 선행 강우 이후 강우가 발생 시 급하게 증가하는 경향을 보이고 있다. 90 cm 깊이에서는 강우 시에 다른 깊이보다 수분 함량의 증가량도 적고 증가속도 또한 느린 것으로 나타났다. 60-90 cm 깊이에서는 매우 적은양의 강우(0-1 mm/hr)가 발생 하거나 선행 강우가 없었을 때 5-7 mm/hr 강우에도 토양수분이

증가하지 않을 때가 있다. 하지만 지속적으로 강우가 내린 7월 1일부터 모든 깊이에서 토양수분의 급격한 증가 및 감소현상을 보이고 있다.

그림 4(b)의 YHS2는 YHS1 아래쪽 경사면에 위치하며 30 cm 깊이에서 강우에 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 또한 선행 강우가 없거나 선행 토양수분의 증가가 없을 시 60과 90 cm 깊이에서 토양

수분 증가가 발생하지 않는 경우도 다수 나타났다. YHS2는 토양 깊이가 깊어질수록 토양수분의 함량이 증가하며 수분 함량도 YHS1보다 높은 것으로 나타났다(그림 4b). 이는 YHS1에서 매우 가파른 경사면을 갖고 있기 때문에 강우 시 수직 침투가 제대로 이루어지지 않고 경사면을 따라 수분이 이동하면서 중간유출 또는 지표유출이 발생하며 침투되었기 때

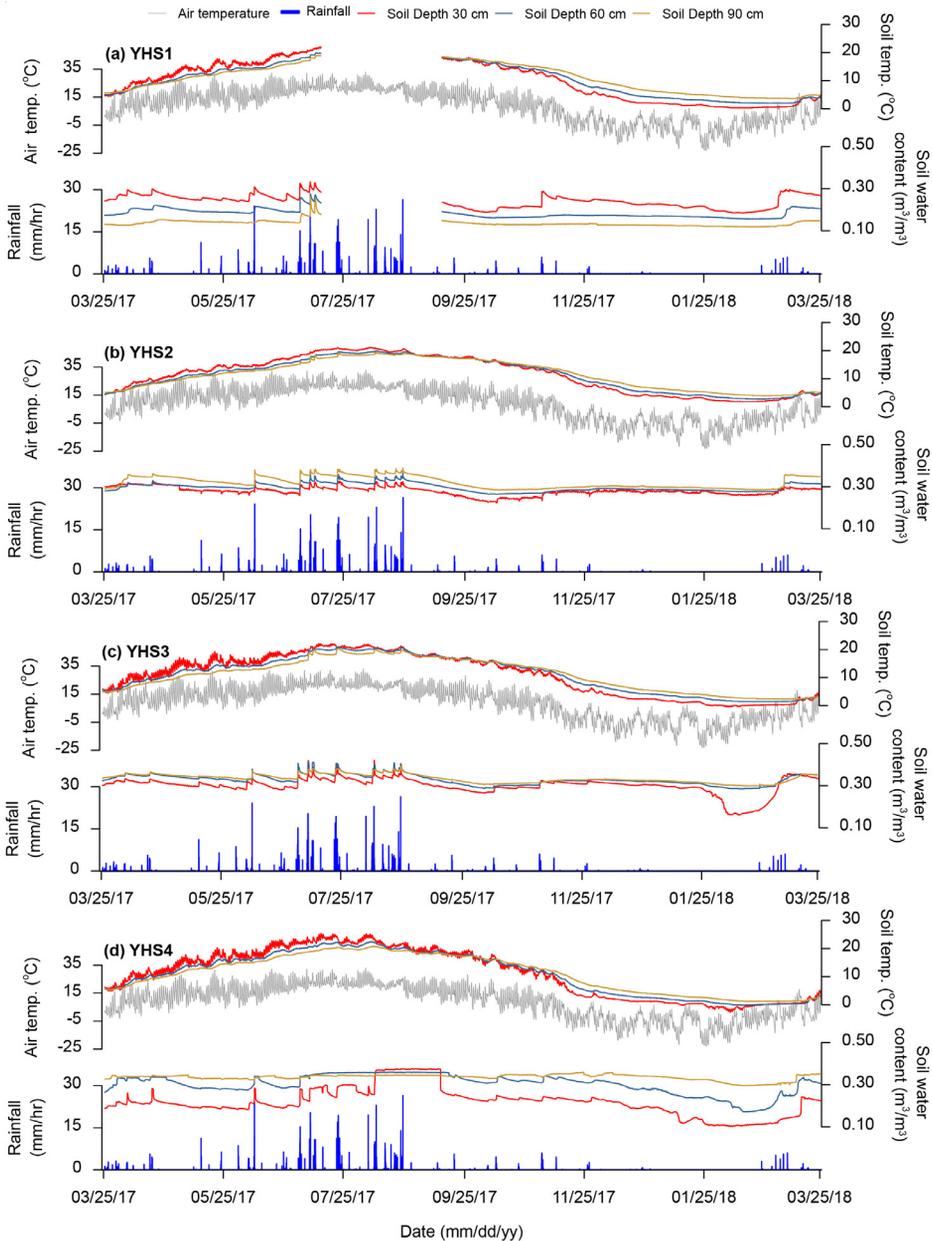


Fig. 4. Time series data of soil moisture and soil temperature response at four sites (a-d) for rainfall and air temperature.

Table 3. Initial estimated and calibrated soil hydraulic parameters.

	θ_r (m^3/m^3)	θ_s (m^3/m^3)	α (cm/l)	n	K_s (cm/day)	l
Initial estimated	0.041	0.386	0.35	2.4	173	0.5
Calibrated	0.1	0.41	0.038	1.16	168	2.5

문일 것으로 판단된다.

YHS3은 앞의 두 지점보다 30 cm 깊이에서 강우에 더 민감하게 반응하였으며 가장 높은 수분함량 ($0.420 m^3/m^3$)까지 증가했던 것으로 나타났다. 2018년 1월 25일 이후 급격하게 토양수분이 감소한 것은 당시 차후 연구를 위해 바로 옆에 굴착된 40 cm 깊이 토양 단면의 영향일 것으로 판단된다. 기온이 영하 $16-21^\circ C$ 까지 수 일 동안 떨어졌기 때문에 지표의 눈 및 토양단면이 동결되면서 토양 내 수분의 이동이 거의 발생하지 않았기 때문으로 사료된다(Hong *et al.*, 2012). YHS3은 토양 깊이가 깊어질수록 토양수분이 증가하며 60과 90 cm 깊이에서 수분 함량의 차이는 작다(그림 4c). 하지만 60과 90 cm 깊이도 다른 지점들에 비해 더 높은 수분함량을 보유할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 앞의 두 지점보다 평탄한 지형에 위치해 있고 상부 경사면으로부터 토양수분의 지속적인 유입과 강우의 수직 침투가 원활했기 때문일 것으로 사료된다(Oh *et al.*, 2006).

YHS4도 비교적 평탄한 지형을 가지며 깊어질수록 토양수분의 함량은 증가한다. 30 cm 깊이는 다른 지점들 보다 전반적으로 낮은 토양 수분 함량을 보이지만 같은 기간 강우 발생 시 가장 높은 변화율을 갖고 급격하게 증가 및 감소하는 경향을 보인다(그림 4d). 또한 지속적인 강우 시 토양수분이 유지되는 현상이 나타났다. 60 cm 깊이는 상부 깊이와 유사한 토양수분 변화 패턴을 보이고 있다. 하지만 강우 이후 토양수분이 유지되는 시간이 더 길어진 것으로 나타났다. 90 cm 깊이는 미량의 토양수분 변화는 있으나 연중 토양수분함량이 다른 지점 및 깊이들에 비해서 거의 변하지 않았으며 약 $0.330 m^3/m^3$ 의 비슷한 수분함량을 유지하고 있다. YHS4의 토양수분 유지 현상은 상부의 작은 호수 및 경사면, YHS4 옆 작은 계곡 및 배수로로부터 하부토양층까지 지속적으로 수분이 공급되어 상부 토양층까지 점차 포화시켰기 때문일 것으로 사료된다(Ha *et al.*, 2016).

그림 4의 YHS1-4 모두 2017년 겨울(12-2월)철 일부 감소 및 유지되던 토양수분이 2018년 봄(3-5월)에 들어서면서 적은양의 강우에도 많은 양이 급증하는 시기가 있다. 이 현상은 겨울철 동결된 토양 및 지표위의 눈이 기온이 상승하며 서서히 녹고 적은 양의 강우가 내렸기 때문에 지표유출이 일어나지 않고 천천히 수직 침투가 잘 이루어졌기 때문으로 판단된다. 그림 4의 YHS1-4의 봄에서 여름까지 기온이 상승함에 따라 토양온도도 점차 상승하며 지표에 가까운 30 cm부터 순차적으로 토양 온도는 증가했다. 가을에 접어들면서 깊이별 토양온도들은 비슷한 온도를 나타냈으며 겨울철에 들어서면서 90 cm에서 가장 높아지고 30 cm가 가장 낮아지는 토양온도의 역전 현상이 일어났다. 이는 연구지역의 토양온도에 계절별 기온변화 양상이 잘 반영되는 것을 알 수 있다.

3.2 토양수분 이동 모의

YHS2 90 cm 깊이 시료의 모래, 미사, 점토 함량을 ROSETTA 프로그램에 입력하여 토양의 수리학적 매개변수(θ_r , θ_s , α , n , K_s , l)의 초기 값을 추정하였다. 초기 추정된 θ_r , θ_s , α , n , K_s 및 l 의 값은 각각 0.041, 0.386, 0.35, 2.4, 173, 0.5로 추정되었다(표 3). 매개변수들 중 α , n , K_s 는 토양수분용 모의하는데 특히 민감하다(Wu *et al.*, 2016). HYDRUS-1D 프로그램의 역추정 기법(Inverse solution)을 통해 매개변수들의 보정을 거쳐 정확성을 높였으며 관측된 토양수분함량에 대해 최적화된 매개변수들을 결정하였다. 보정된 θ_r , θ_s , α , n , K_s 및 l 의 값은 각각 0.1, 0.41, 0.038, 1.6, 168, 2.5로 나타났다(표 3).

그림 5는 보정된 매개변수 및 현장 관측 자료들을 토대로 YHS2 90 cm 깊이의 우기(6~8월)때 모의된 토양수분함량 및 현장 자료의 비교를 나타낸 것이다. 모의 및 관측된 토양수분함량은 100%의 1:1 매칭이 이루어지지 않았으나 모의된 토양수분함량은 현장에서 관측된 토양수분을 비교적 잘 재현해낸 것

으로 나타났다. 강우 시 토양수분은 관측된 수분함량보다 모델링 결과에서 더 높은 수분함량을 보유할 수 있는 것으로 나타났다. 일일 토양수분의 변화로 보았을 때 20 mm/day 이하의 강우에서는 수분함량이 증가하지 않는 반면 관측 및 모델링 결과 모두 20-30 mm/day 이상에서는 수분함량이 증가하였다. 하지만 강우량에 비례하게 토양수분함량이 증가하는 것은 아닌 것으로 나타났다. 또한 전반적으로 수분함량이 증가 후 감소하는 속도도 모델링 결과가 더 빠른 것으로 나타났다.

모의 및 관측된 결과의 비교가 신뢰성이 있는지 확인하기 위해 선형관계를 확인하였다(그림 6). 그

결과 결정계수(r^2)은 0.77, 상관계수(r)은 0.88로 높은 상관성을 나타냈으며 평균제곱근오차(RMSE)는 0.0096으로 낮은 불확실성을 보여 모의된 값들이 실측 값을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 최근 HYDRUS-1D의 수리학적 매개변수의 추정을 통한 토양수분 유동 모델링 및 현장 관측 자료와 비교 결과에서 Assefa and Woodbury (2013), Chen *et al.* (2014), Shin *et al.* (2016)은 각각 최대 0.84, 0.93, 0.87의 상관계수로 높은 상관성을 갖는 것으로 해석하였다. 때문에 이 연구에서 얻어진 상관계수의 값도 높은 상관성을 갖는다고 판단할 수 있다. 하지만 높은 상관성과 낮은 RMSE 값에도 불구하고 모의된 토양수분함량은 관

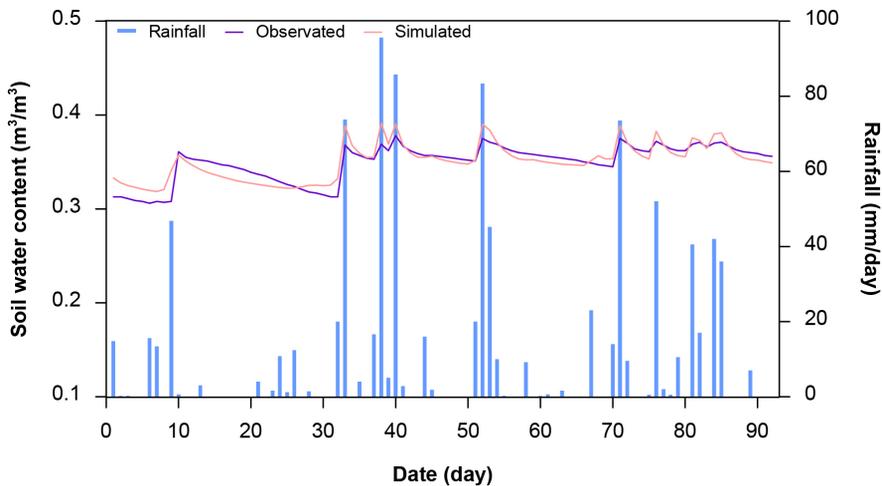


Fig. 5. Comparison of observed and simulated soil water content at 90 cm depth in YHS2.

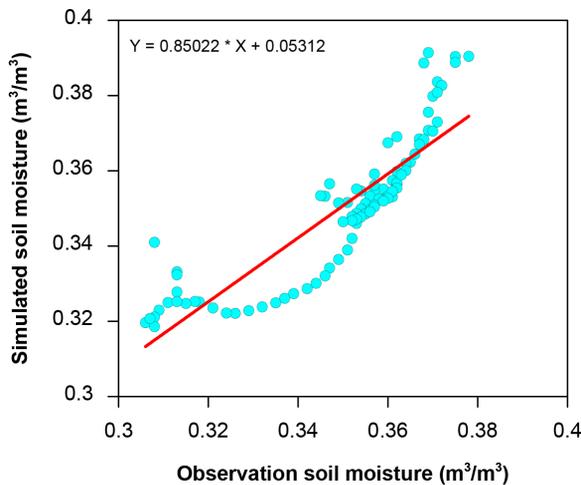


Fig. 6. Linear relationship of simulation results and observed data.

측된 것과 비교하여 완전하게 매치되지 않았다. 이는 모의된 토양 수리학적 매개변수들 및 다른 변수와 일부 가정된 경계조건 값이 실제 현장을 완전하게 재현하지 못했으며 1차원 적으로만 반영되었기 때문으로 생각된다. 또한 실제 토양은 마를 때와 습윤해질 때가 다른 이력현상을 가지며 대기조건에서 지중까지 다양한 환경적 요인이 포함된 수분함량을 측정하기 때문일 것으로 사료된다. 추후 추가적인 현장 매개변수 수집 및 3차원적 모델링을 통해 매개변수 및 모의된 토양수분함량에 대한 정확성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 잠재 지하수 함양 추정

국내에서 대부분 지하수위는 연 강수량의 60-70%가 집중되는 여름철에 높게 나타난다. 하지만 해안면은 여름철 활발한 논·밭과 같은 농업 활동으로 많은 양의 지하수를 양수하기 때문에 지하수위가 오히려 더 낮거나 떨어지는 것으로 연구되었다(Lee, 2009). 따라서 농업활동이 활발하고 강우가 많은 6-8월에 현장 관측자료 기반의 토양수분 유동 모의를 통해 90 cm 깊이까지 침투량 및 500 cm 깊이에서 잠재 지하수 함양량을 추정하였다(그림 7).

이 기간 동안 90 cm 깊이에서 총 누적 침투량은 927 mm, 500 cm 깊이의 총 누적 잠재 함양량은 744.2 mm로 추정되었다. 이는 2017년 강수량인 1,214 mm에 각각 76.3%, 61.3%에 해당하는 수치이다. 500 cm 깊이에 도달하는 토양수분의 잠재 함양량은 6월 0.3 cm, 7월 40.8 cm, 8월 33.3 cm로 6월에 낮고 7월에

가장 높았다. 6월에 수차례 10-15 mm/day 이상의 강우에도 잠재 지하수 함양은 거의 이루어지지 않았으며 90 cm 깊이를 통과하는 침투량도 적은 것으로 나타났다(그림 7). 또한 40 mm/day가 넘는 많은 강우로 인해 상부에서 지표 및 중간유출의 영향으로 90 cm 깊이에서만 일부 증가했을 것으로 판단된다. 이와 같이 6월에 낮은 잠재 함양량을 보이는 것은 시간당 또는 지속적인 강우량이 7월과 8월에 비해서 대부분 1-5 mm/hr로 매우 적기 때문에 토양수분이 깊은 깊이까지 침투하지 못한 것이 크다고 판단된다.

7월과 8월의 높은 잠재 함양량은 대부분 해당 시기 많은 양과 잦은 강수의 영향이 큰 것으로 판단되며 대부분 모래로 이루어진 토성으로 수리전도도 및 투수성이 높기 때문에 강수의 침투가 수월했을 것으로 여겨진다. 모래 토성의 경우 연 강수량의 57.2-78.7% 범위까지 함양될 수 있다는 연구 결과가 있다(Koo and Kim, 2003). 또한 선행 수분함량과 선행 강수의 영향도 이 시기의 잠재 함양량에 영향을 미쳤을 것으로 생각된다. 6월의 토양수분함량은 7월보다 상대적으로 건조하다(그림 4b). 7월이 되면서 6월보다 지속적으로 수분이 공급되어 점차 습해지고 잠재 함양량을 높였을 것으로 판단된다. 8월에는 강우 이벤트 이전 선행 토양수분함량이 이미 증가한 상태이며 강우강도 또한 7월과 비슷하여 7월보다는 감소한 잠재 함양량을 기록했을 것으로 판단된다.

강수에 의한 토양수분이 90 cm 깊이에 도달하는 것은 당일 이동할 수 있으나 500 cm 깊이까지 도달하는 것은 지연시간이 있는 것으로 나타났다. 지연

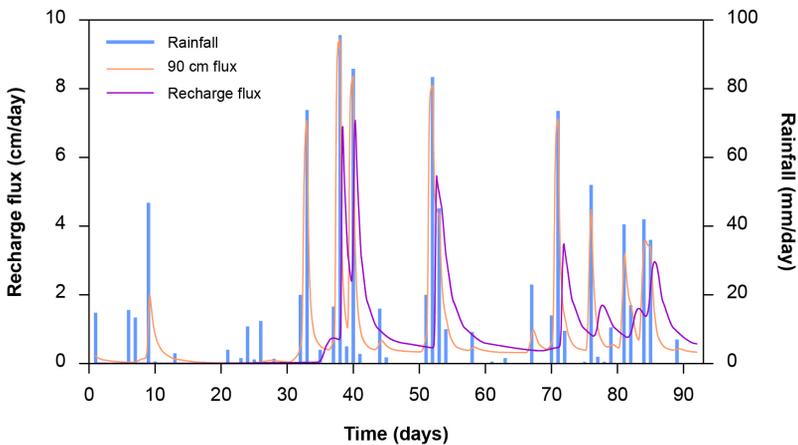


Fig. 7. Estimated groundwater recharge at the YHS2 in June to August, 2017.

시간은 일정한 시간을 갖지 않으며 선행 강수량 및 선행 토양수분함량에 따라 달라질 수 있는 것으로 판단된다. 토양수분이 90 cm 및 지하수면까지 함양되기 까지 정확한 지연시간에 대한 것은 추후 연구가 더 필요할 것으로 여겨진다.

4. 결론

본 연구는 강원도 양구군 해안면에서 강우에 따른 토양수분 변화 양상을 깊이별(30, 60, 90 cm)로 관측하고 HYDRUS-1D 모델링을 이용하여 2017년 우기의 잠재 지하수 함양량을 추정하였다. 강우에 따른 토양수분 모니터링 결과, YHS3의 모든 깊이에서 $0.300 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 이상의 연중 높은 수분함량을 보였으며 그 중 30 cm 깊이에서 최대 $0.420 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 로 타 지점 및 깊이에 비해 높은 수분함량을 보유할 수 있는 것으로 나타났다.

깊이별 토양수분 관측에서 YHS1만 토양 깊이가 깊어질수록 토양수분함량이 감소하였으며 YHS2-4는 증가하는 경향을 보였다. YHS1은 매우 가파른 경사면에 위치하기 때문에 많은 강우 시 지표유출 및 중간유출로 수직 침투가 원활히 이루어지지 않고 YHS2로 침투되었을 것으로 판단된다. YHS1과 YHS4의 30 cm 깊이를 제외하면 연 평균 $0.270 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 의 높은 수분 함량을 보인다. YHS3-4는 상부로부터 지속적으로 토양수분을 공급받아 수분함량이 증가 및 유지되는 것으로 사료된다.

HYDRUS-1D의 역추정 기법을 사용하여 초기 추정된 매개변수들을 보정하였으며 이를 통해 모의된 수분함량과 현장 관측 자료를 비교하였다. 2017년 우기의 토양수분 유동을 모의 및 비교한 결과 r 은 0.88, RMSE는 0.0096으로 높은 상관성을 나타냈다. 같은 기간 모의된 자료를 통해 HYDRUS-1D에서 잠재 지하수 함양량을 추정한 결과, 지하수면으로 가정된 500 cm 토양 깊이에서 총 누적된 잠재 지하수 함양량은 744.2 mm로 추정되었다. 이는 2017년 1,214 mm의 강수량에 61.3%로 높은 함양량을 보였다. 본 연구에서 강수가 지하수로 함양되기까지 수 시간에서 일 단위의 지연시간이 나타났다. 이는 추후에 지연시간에 대한 연구를 통해 특정 강수량 범위 내에서 지연시간을 통해 함양되는 강수량을 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서 기상관측 자료를 통해 증발산량을 계산하여 입력하였으나 현장의 식생 및 다양한 환경을 반영한 실제 증발산량을 적용하진 못하였다. 또한 식생의 뿌리대로부터 흡수되는 수분의 양이 고려되지 않았기 때문에 본 연구 결과에서 얻어진 함양량은 실제 현장의 함양량과 다소 차이가 있을 수 있다. 하지만 이 연구를 통해 제시된 모델링 결과 값들은 불포화대 토양수분 이동을 통한 지하수 함양 추정 연구에서 유의미한 결과 값을 제공할 수 있고 기초 자료로써 제공할 수 있을 것으로 여겨진다.

감사의 글

이 성과는 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2018R1D1A1B07047200). 이 논문은 제1저자의 석사학위 논문의 일부로 사용될 것임을 밝힙니다. 논문을 심사해주신 지오그린21 전성천 박사님과 익명의 심사위원님께 감사의 말씀을 드립니다.

REFERENCES

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998, Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.
- Assefa, K.A. and Woodbury, A.D., 2013, Transient, spatially varied groundwater recharge modelling. *Water Resource Research*, 49(8), 4593-4606.
- Baek, H.J., Ahn, K.D., Joo, S.W. and Kim, Y.J., 2017, Long-term changes in wintertime precipitation and snowfall over Gangwon province. *Journal of Climate Change Research*, 8(2), 109-123 (in Korean with English abstract)
- Bah, A.R., Kravchuk, O. and Kirchhof, G., 2009, Sensitivity of drainage to rainfall, vegetation and soil characteristics. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68(1), 1-8.
- Batalha, M.S., Barbosa, M.C., Faybishenko, B. and van Genuchten, M.Th., 2018, Effect of temporal averaging of meteorological data on predictions of groundwater recharge. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66(2), 143-152.
- Chen, M., Willgoose G.R. and Saco, P.M., 2014, Spatial prediction of temporal soil moisture dynamics using HYDRUS-1D. *Hydrological Processes*, 28(2), 171-185.

- Feng, H.H. and Liu, Y.B., 2015, Combined effects of precipitation and air temperature on soil moisture in different land covers in a humid basin. *Journal of Hydrology*, 531(3), 1129-1140.
- Ha, K.C., Kim, Y.C. and Kim, S.Y., 2016, Monitoring of soil water content and infiltration rate by rainfall in a water curtain cultivation area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52(3), 221-236 (in Korean with English abstract).
- Hong, E.M., Choi, J.Y., Yoo, S.H. and Nam, W.H., 2012, Analysis of soil moisture characteristics in nut pine forest about seasons and soil layers. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 54(4), 105-114 (in Korean with English abstract).
- RDA, 2018, <http://soil.rda.go.kr/soil/soilmap/characteristic.jsp> (October 4, 2018).
- Kim, S.W., Shin, Y.C., Lee, T.H., Lee, S.H., Choi, K.S., Park, Y.S., Lim, K.J. and Kim, J.G., 2017, Characteristics of soil moisture distributions at the spatio-temporal scales based on the land surface features using MODIS images. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 59(6), 29-37 (in Korean with English abstract).
- Koo, M.H. and Kim, Y.J., 2003, Use of an infiltration model for analyzing temporal variation of precipitation recharge in the climatological environment of Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 39(2), 249-261 (in Korean with English abstract).
- Lai, X.M., Liao, K.H., Feng, H.H. and Zhu, Q., 2016, Responses of soil water percolation to dynamic interactions among rainfall, antecedent moisture and season in a forest site. *Journal of Hydrology*, 540, 565-573.
- Lee, J., Eom, J.S., Kim, B., Jang, W.S., Ryu, J.C., Kang, H., Kim, K.S. and Lim, K.J., 2011, Water quality prediction at Mandae watershed using SWAT and water quality improvement with vegetated filter strip. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 45(1), 37-45 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., 2009, Importance of hydrogeological and hydrologic studies for HaeAn basin in Yanggu. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45(4), 405-414 (in Korean with English abstract).
- Lee, K.M., Baek, H.J., Cho, C.H. and Kwon, W.T., 2011, The recent (2001-2010) changes on temperature and precipitation related to normals (1971-2000) in Korea. *The Geographical Journal of Korea*, 45(2), 237-248 (in Korean with English abstract).
- Leterme, B., Mallants, D. and Jacques, D., 2012, Sensitivity of groundwater recharge using climatic analogues and HYDRUS-1D. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8), 2485-2497.
- Lozano-Parra, J., Schnabel, S. and Ceballos-Barbancho, A., 2015, The role of vegetation covers on soil wetting processes at rainfall event scale in scattered tree woodland of mediterranean climate. *Journal of Hydrology*, 529(3), 951-961.
- Oh, K.J., Lee, H.S., Kim, D.H., Kim, S.H. and Kim, N.W., 2006, Soil moisture monitoring at a hillslope scale considering spatial-temporal characteristics. *Journal of Korea Water Resources Association*, 39(7), 605-615 (in Korean with English abstract).
- Penna, D., Borga, M., Norbiato, D. and Dalla Fontana, G., 2008, Hillslope scale soil moisture variability in a steep alpine terrain. *Journal of Hydrology*, 364, 311-327.
- Šimůnek, J., Šejna, M. and van Genuchten, M.T., 2008, The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. version 4.0, University of California, California, USA, 315.
- Shin, Y.C., Choi, K.S., Jung, Y.H., Yang, J.E. and Lim, K.J., 2016, Soil moisture estimation and drought assessment at the spatio-temporal scales using remotely sensed data: (I) Soil moisture. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 32(1), 60-69 (in Korean with English abstract).
- van Genuchten, M.T., 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America Journal*, 44, 892-898.
- Wang, S.A., Fu, B.J., Gao, G.Y., Liu, Y. and Zhou, J., 2013, Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China. *Catena*, 101, 122-128.
- Won, J.K., Lee, M.W., Woo, J.K., 1987, Geologic and geographic characteristics of HaeAn basin. *Memorial Book of 40th Anniversary of Kangwon Nation University*. Kangwon National University Publishing, Chuncheon, 45-57 (in Korean).
- Wu, Q.H., Wang, G.L., Zhang, W., Cui, H.D. and Zhang, W., 2016, Estimation of groundwater recharge using tracers and numerical modeling in the north china plain. *Water*, 8(8), 353.
- Yoo, D.S., Kim, K.S., Jang, W.S., Jun, M.S., Yang, J.E., Kim, S.C., Ahn, J.H. and Lim, J.K., 2008, Evaluation of sediment yield using area-weighted measured slope and slope length at HeaAn myeon watershed. *Journal of Korean Society on Water Quality*, 24(5), 569-580 (in Korean with English abstract).

Received : August 31, 2018

Revised : October 4, 2018

Accepted : October 5, 2018