

## 양구군 해안면에서의 토양수분 수치 모델링을 통한 2017년과 2018년 우기의 잠재 지하수 함양량 비교

김정직<sup>1,2</sup> · 김창성<sup>1,2</sup> · 이진용<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 지질학과

<sup>2</sup>강원대학교 크리티컬존선도연구실

### 요 약

이 연구는 강원도 양구군 해안분지 외곽에서 586일 동안 10분 간격으로 수집한 토양수분 및 기상관측 자료를 이용하여 잠재 지하수 함양량을 모의 분석하였다. 토양수분 함량은 일반적으로 깊이가 깊을수록, 경사가 완만할수록 높았으며 강우량에 비례했다. 현장에서 측정한 토양수분 함량과 모의분석한 토양수분 함량의 상관계수는 0.9-0.93으로 높은 상관성을 보였다. 잠재 지하수 함양량은 토양수분 변동 범위가 넓은 우기의 자료와 HYDRUS-1D를 이용하여 추정하였다. 잠재 지하수 함양량은 YHS2에서 2017년에 555 mm, 2018년에 332 mm, YHS3에서 2017년에 418 mm, 2018년에 408 mm로 2017년에 지하수가 더 많이 함양되었다.

**주요어:** 토양수분, 지하수 함양량, HYDRUS-1D

**Jeong Jik Kim, Chang-Seong Kim and Jin-Yong Lee, 2020, Comparison of potential groundwater recharge in the rainy season of 2017 and 2018 by modeling with soil moisture in the Haeon basin, Yanggu. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 1, p. 63-76**

**ABSTRACT:** In this study, we have simulated the potential groundwater recharge using soil moisture and meteorological data. The data have been collected every 10 minutes for 586 days in the Haeon basin of Yanggu, Gangwon. The soil moisture content was higher at deeper depths, lower slopes and many rainfalls. Soil moisture contents in the field and simulation are related to high correlation as 0.9 to 0.93. The potential groundwater recharge for rainy season data has been estimated using HYDRUS-1D. The potential groundwater recharge of YHS2 was 555 mm in 2017, 332 mm in 2018, and the YHS3 was 418 mm in 2017, 408 mm in 2018.

**Key words:** soil moisture, groundwater recharge, HYDRUS-1D

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

### 1. 서 론

최근 기후변화 및 이상기후로 인한 폭우 또는 강설량 감소와 같은 강수패턴 변화가 발생하고 있다. 이에 갈수기 기간의 농업용수 공급의 불안정, 하천 유량 감소 및 토양수분 부족으로 자연재해 피해의 발생빈도도 증가하고 있다(Ahn *et al.*, 2015; Hong, M.K. *et al.*, 2015). 폭우는 단위 시간 당 토양으로 침투할 수 있는 수분량 이상의 물을 토양에 공급하여 지표유출량을 증가시킬 수 있다(Yang, 2006; Jeong *et*

*al.*, 2016). 폭우시 지표유출로 인한 피해는 경작지로부터 유실된 토양이 주변 하천으로 흘러나가 탁수를 발생시키거나 경작지에 살포되었던 농약이 주변 지역으로 유출되어 인간 활동 및 식생에 유해한 영향을 끼친다(Yun *et al.*, 2015, 2017).

지표유출량이 많다는 것은 강우가 토양으로 원활하게 침투되지 않는다는 것을 의미할 수 있다(Bae, 2016). 이는 토양수분 감소로 가뭄, 침투량 저하로 인한 지하수 함양량 감소와 농업용수 공급 제한, 농업활동과 같이 인간활동에 악영향을 미칠 수 있다

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

(Park *et al.*, 2013; Ahn *et al.*, 2015). 따라서 강수나 지표수가 비포화대를 통해 지하수로 함양되는 수문학적 과정에 대한 연구는 중요하다. 토양층 내 수분함량 변화는 이러한 과정에 대한 중요한 정보를 제공한다(Choi *et al.*, 2010; Hong, E.M. *et al.*, 2015).

토양수분 또는 토양수란 토양층 중 비포화대 내의 공극에 존재하는 물로 크게 흡착수, 모세관수, 중력수 세 가지로 형태로 존재한다(Kim *et al.*, 2016; Fetter, 2018). 흡착수(hygroscopic water)는 토양의 입자 표면의 분자력에 의해 얇은 막을 이루는 물이다. 흡착수가 많아지면 막의 두께가 두꺼워지면서 대공극인 비모세관공극과 소공극인 모세관공극에 물이 채워지게 되며 표면장력으로 유지되는데 이를 모세관수(capillary fringe water)라 한다. 중력수(gravitational water)란 표면장력이나 분자력에 의해 정상상태로 유지되다가 잉여 토양수가 발생하거나 강우 등에 의해 공극이 포화되었을 때 중력의 작용이 더 커지며 하향이동이 가능해진 혹은 하향이동하는 물을 말한다(Korean Association of Geographic Information Studies, 2006; Kim *et al.*, 2013; Ha *et al.*, 2016). 토양수분 함량은 토지피복 유형, 기상, 지형 조건 등에 영향을 받으므로(Kim, 2019), 이러한 주요 요인들과 토양수분 측정 자료를 가지고 수치 모델링을 통해 지하수 함양량, 식물의 증발산량, 대기현상에 따른 강수의 침투량 등을 추정할 수 있다(Ha *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2018; Kim, 2019).

이와 관련하여 Ha *et al.* (2016)은 수막재배 지역의 비닐하우스 시설 근처에서 토양수분 및 침투율을 관측하였고 비닐하우스 내부 및 외부와 수막재배가 이루어지는 시기 및 그렇지 않은 시기에 대하여 강우가 토양으로 침투하는 과정과 토양수분 변동 특성의 차이점을 시계열 분석을 통해 평가하였다. Woo *et al.* (2011)은 토양수분, 강우량, 지하수위, 토양입경, 수온의 상호연관성을 분석하였으며 토양수분에 영향을 주는 요인은 상부에서는 강우량, 하부에서는 지하수위가 우세하다는 것을 제시하였다. 또한 Choi *et al.* (2010)과 Hong, E.M. *et al.* (2015)은 가뭄과 토양수분의 상호관계 연구하였으며 특히 토양수분, 강수량, 증발산량 등을 모의분석하여 가뭄을 예측하였다. Ries *et al.* (2015)은 HYDRUS-1D에서 수치 모델링의 매개변수를 토양층의 깊이, 강우량, 기온으로 설정하고 현장에서 측정한 토양수분 값을 이용하여 최적

의 지하수 함양량 조건을 추정하였다. Leterme *et al.* (2012)은 HYDRUS-1D에서 토양수분 및 기상관측 자료를 사용하여 연간 강수량에 따른 지하수 함양량의 변화를 추정하였고 미래의 기후변화가 지하수 함양에 미치는 영향을 각 온대 해양 기후, 아열대성 기후, 툰드라 기후 조건에 따라 예상하였다.

토양수분과 관련된 연구가 활발히 진행된 가운데 국내에서도 현장에서 측정한 토양수분 자료 및 기상관측 자료를 사용한 연구는 다양하지만 그 자료로 수치 모델링을 하여 지하수 함양량을 추정한 연구는 부족하다(Woo *et al.*, 2011; Hong, M.K. *et al.*, 2015; Ha *et al.*, 2016). 이를 보완하기 위해 Kim *et al.* (2018)은 양구군 해안면의 한 지점에서 1년간 수집한 토양수분 및 기상측정 자료를 통해 지하수 함양량을 추정하였지만 모니터링 기간이 짧았으며 추정한 값을 비교할 대상이 없었다. 이와 달리 본 연구에서는 연구지역 내 두 지점에서 2017년과 2018년도의 토양수분 및 기상자료를 가지고 각 연도의 지하수 함양량을 추정 및 비교하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 지형 및 지질

연구지역은 군사분계선과 인접한 강원도 양구군 해안면 북쪽에 위치하며 가파르고 완만한 경사가 함께 나타나는 산지에 위치한다(그림 1). 양구 해안면은 분지 지형을 가지며 높은 곳에서 보았을 때 화채(punch) 그릇(bowl)과 비슷한 형상을 하고 있어 편치불 또는 해안분지로도 불린다(Choi *et al.*, 2009). 분지 외곽 경계부는 가칠봉(1,250 m), 도솔산(1,150 m), 대우산(1,060 m), 달산령(807 m)과 같이 해발고도가 높고 경사(20-50°)가 가파른 산들로 둘러싸여 있으며 중심부의 평탄한 곳의 해발고도는 약 400 m이다(Yoo *et al.*, 2008; Lee, 2009)(그림 1b).

해안분지의 외륜은 선캄브리아기 변성암 복합체로 편마암, 규암을 포함한다. 분지 내륜은 쥐라기 대보 화강암으로 형성되어 외륜의 변성암 복합체를 관입한다(Won *et al.*, 1987). 관입된 화강암은 변성암 복합체보다 상대적으로 풍화·침식에 약하기 때문에 오랜 차별침식 작용으로 인해 분지가 형성된 것으로 밝혀지고 있다(Won *et al.*, 1987). 국내 침식분지들의 경우 대체로 소하천을 다수 포함하여 형성되며 해

안분지는 지질 및 지형적 특징에 따라 소하천들이 최상류부터 발달된 분지에 속한다(Chang, 1997).

해안분지의 2010년 토지이용률은 산림 58%, 고랭지밭 27%, 논 9%, 기타 5%로 구성되었으며 2017년에는 밭 42%, 인삼밭 30%, 논 9%, 비닐하우스 7%, 과수원 4%, 기타 8%로 과거보다 밭의 비율이 증가하였다(Yun *et al.*, 2017; Yoon *et al.*, 2018). 농촌진흥청(Rural Development Administration, RDA, 2018)의 토양환경지도에 따르면 해안분지 표토의 토성은 사양토 및 양토, 심토의 토성은 사양토, 식양토가 나타난다. 해안분지의 표토 면적은 6,117 ha로 사양토가 4,184 ha, 양토가 1,904 ha이며 각각 68.4%, 31.1%의 면적을 갖는다. 심토 면적은 6,114.4 ha로 사양토가 5,240 ha, 식양토가 821 ha이며 각각 85.7%, 13.4%의 면적을 차지하고 있다.

**2.2 토양수분 측정 및 기상 자료 분석**

해안분지 북쪽 인근 산지에 4개의 토양수분 모니터링(YHS1-4) 및 자동기상관측(Automatic weather station, AWS) 시스템을 구축하였다(그림 1, 2). 이번 연구에서는 토양수분 모니터링 장치 및 AWS

에서 2017년 3월부터 2018년 10월까지 10분 간격으로 측정된 자료를 수집하였다. 토양수분측정 센서(5TM, METER, USA)는 30, 60, 90 cm 깊이로 해발 고도 570-612 m 사이에 각각 설치하였다. 또한 최상부(YHS1)에서 최하부(YHS4) 지점까지의 경사도는 약 15%이며 경사각은 8.5°이다. 그 중 YHS1과 YHS2는 가파른 경사면에 위치하였으며 YHS3과 YHS4는 비교적 평탄한 지형에 위치한다. AWS는 강우량, 기온, 습도, 풍향, 풍속, 일사량, 이슬점을 측정하였으며 YHS3 인근에 설치하였다.

자동기상관측 기기로 측정한 연구지역의 여름철(6-8월) 강우량은 2017년에 945.8 mm, 2018년에 694.6 mm이며 강우횟수는 2017년에 47회, 2018년에 32회이다. 강우는 주로 7월과 8월에 있었으며, 2017년 6월에 126.0 mm (14회), 7월에 490.2 mm (18회), 8월에 329.6 mm (15회)의 강우가 있었고 2018년 6월에는 125.6 mm (8회), 7월에 226.0 mm (13회), 8월에 343.0 mm (11회)의 강우가 있었다. 이 중 20 mm/day 이상의 강우는 2017년 6월에 1회, 7월에 7회, 8월에 6회, 2018년 6월에 2회, 7월에 4회, 8월에 3회 있었다. 2017년 6월의 최대 강우량은 46.8 mm, 7월은

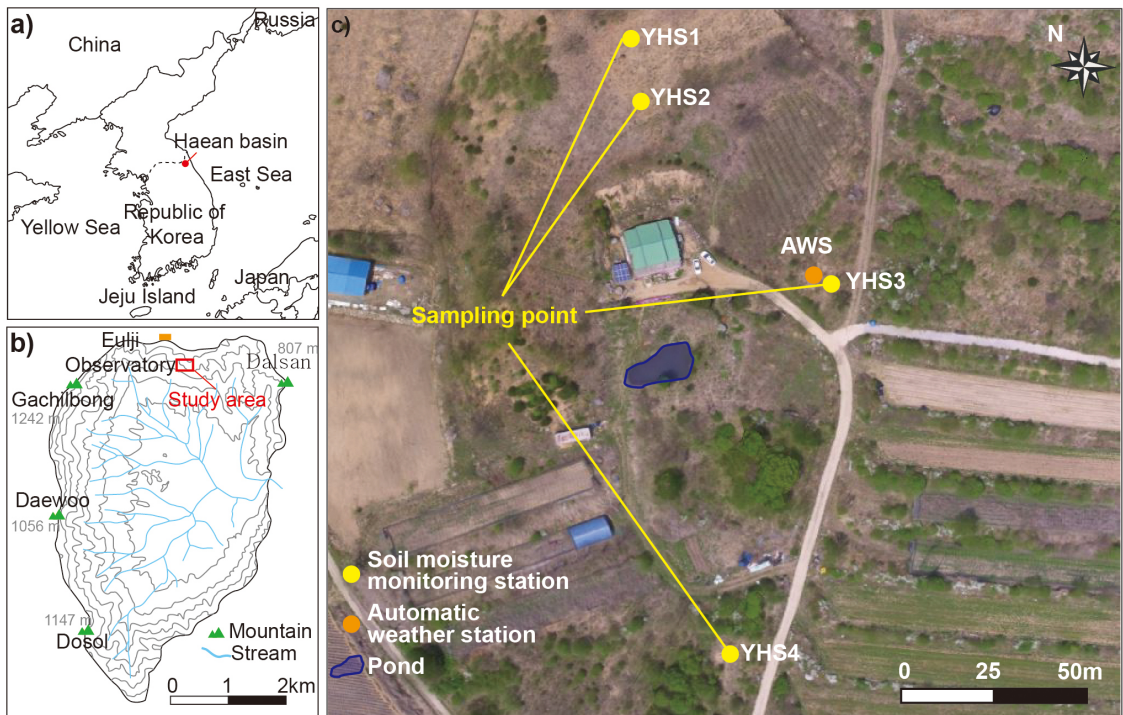


Fig. 1. Monitoring points of study area in the Hae-an basin, Yanggu.

95.6 mm, 8월은 73.5 mm, 2018년 6월은 76.2 mm, 7월은 64.2 mm, 8월은 240.2 mm이다.

### 2.3 잠재 지하수 함양량의 수치 모델링

HYDRUS-1D는 불포화 및 포화된 다공질 매체의 수분, 온도 및 용질의 수직과 수평 이동을 모의하여 분석하는 프로그램이다(Simůnek *et al.*, 2008). 입력 변수는 토양수분함량, 토양온도, 강수량, 증발산량, 토양 수리학적 매개변수( $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $K_s$ ,  $\alpha$ ,  $n$ ,  $l$ ) 등이 필요하다. 본 연구에선 1차원 Richards 방정식을 통해 불포화대 토양수분의 수직 흐름과 그에 따른 토양수분 변화를 계산하고 잠재 지하수 함양량을 추정하였다.

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

식 (1)에서  $h$ 는 토양수분 압력수두(L),  $\theta$ 는 체적 토양수분함량( $m^3/m^3$ ),  $t$ 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  $\theta$ 에 의존하기 때문에 매우 비선형적이며  $K(h)$ ,  $h$ ,  $\theta$ 와 토양 수리학적 매개변수들의 관계는 아래와 같이 van Genuchten-Mualem (1980) 모델에 의해 설명된다.

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

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

식 (3)에서  $K_s$ 는 포화 수리전도도,  $Se$ 는 유효 포화도,  $\theta_r$ 과  $\theta_s$ 는 잔여 및 포화수분함량( $m^3/m^3$ ),  $\alpha$  (cm/day)와  $n$ 은 토양수분 특성 곡선의 실험적 계수,  $l$ 은 공극의 연결성을 나타내는 매개변수이다(Shin *et al.*, 2017). 체적토양수분함량과 모관 흡수력을 토대로 van Genuchten-Mualem (1980) 모델의 흡수수특성 곡선을 아래의 식으로 산정할 수 있다.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right]^m \quad (4)$$

식 (4)에서  $\alpha$ 는 공기유입값 관련 계수,  $n$ 은 변곡점의 경사에 관계된 계수,  $m$ 은 잔류함수비에 관계된 계수이다.

토양수분 시뮬레이션 기간은 2017-2018년 우기(6-8월)로 선정하여 수행하였다또한 시뮬레이션 지점은 자료의 결측이 없는 YHS2와 비교적 평탄한 지형에 있는 YHS3 지점으로 선택하였다. 모니터링된 AWS로부터 FAO56 Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998)으로 잠재증발산량을 산정하였다.

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma (900 / (T_{mean} + 273)) u_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (4)$$

식 (4)에서  $ET_0$ 는 잠재증발산량(mm/day),  $R_n$ 은 순복사량( $MB/m^2/day$ ),  $G$ 는 토양 열 유속 밀도( $MJ/m^2/day$ ),  $T_{mean}$ 은 2 m 높이에서의 일평균 기온( $^{\circ}C$ ),  $u_2$ 은 2 m 높이에서 풍속(m/s),  $e_a - e_d$ 는 증기압(kPa) 결손량,  $\Delta$ 는 증기압 곡선의 기울기( $kPa/^{\circ}C$ ),

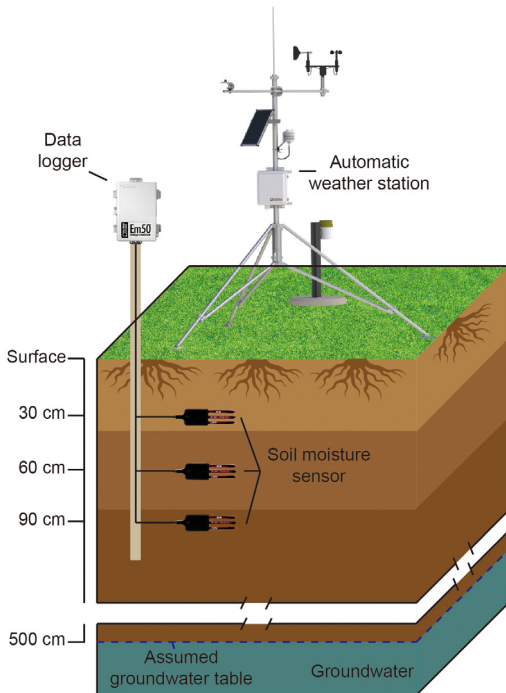


Fig. 2. The mimetic diagram of soil moisture sensors, data logger and automatic weather station (AWS) in a monitoring point.

$\gamma$ 는 건습계 상수(kPa/°C), 0.408은 에너지 단위인 MJ/m<sup>2</sup>/day를 mm/day로 바꾸기 위한 단위환산 계수이다. 잠재증발산량 산정 시 필요한 잔디 높이는 0.12 m로 지정하였으며 식생 유형 및 작물 유형별 잠재증발산량과 뿌리에 흡수되는 수분함량(root water uptake)은 고려하지 않았다.

지하수면의 깊이는 지표 아래 500 cm 지점으로 가정하여 잠재 지하수 함양량을 추정하였으며 토양 단면의 깊이는 500 cm로 설정하였다. 지표 조건으로는 지표유출이 발생할 수 있는 상황을 선택하였으며 하부 경계 조건은 정확한 지하수면 깊이를 알 수 없기 때문에 자유배수를 선택하였다. 토양 수리학적 매개변수 값들은 입도분석 결과를 토대로 ROSETTA 매개변수 추정 프로그램에서 추정하였다. 또한 초기 추정된 매개변수들은 역해석법을 통해 보정하여 시뮬레이션의 신뢰성을 향상시켰다. 잠재 지하수 함양량은 토양수분이 지하수면에 도달하는 에너지 값인 bottom flux 값을 합산하여 산정하였다.

**2.4 토양시료 및 분석**

토양수분은 토양을 이루는 토성에 따라 변할 수 있기 때문에 이를 확인하기 위해 지표, 30, 60 및 90 cm 깊이에서 각 지점마다 500 g 씩 채취하여 총 16 개의 토양시료를 채취하였다(Chung *et al.*, 2015). 채취한 시료는 탄산염 및 유기물 제거를 위해 염산 및 과산화수로 전처리 후 확산제를 첨가하여 0.063

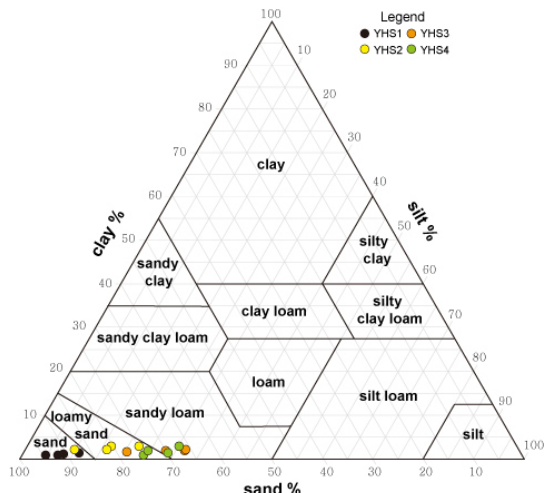
mm 체에 습식 체분석을 실시하였다. 이를 다시 건조 후 4-0.063 mm 까지 체에 체분석을 실시하였다. 체분석 후 0.063 mm 이하 시료는 레이저 입도분석기(Mastersizer 3000, Malvern, U.K.)을 통해 0.001 mm까지 분석하였다. 이후 미국농무성(United States Department of Agriculture, USDA)의 입자크기 분류에 따라 모래, 미사, 점토를 분류하고 토성을 결정하였다. 또한 누적 입도 분포 곡선을 통해 통과율 10, 30 및 60%의 입경의 이용과 통일분류법에 따라 균등계수(Uniformity coefficient, C<sub>u</sub>) 및 곡률계수(Coefficient of curvature, C<sub>z</sub>)를 산정하여 입자 크기 분포의 양호함을 판단하였다.

**3. 결과 및 토의**

**3.1 토성 및 입도 분포 특성**

연구지역의 토양은 대부분 모래로 약 66-92% 범위로 나타났다. 미사는 약 6-32%, 점토는 약 0.4-2%로 점토 함량이 매우 낮게 나타났다. USDA의 토성 분류에 따라 분류된 토양을 삼각 도표에 도시한 결과 사토(sand), 양질사토(loamy sand), 사양토(sandy loam)으로 분류되었다(그림 3). YHS1에서 YHS4로 고도가 낮아질수록 모래의 함량이 점차 줄어들며 미사의 함량이 증가하는 경향을 보인다. 모니터링 지점들의 깊이별 시료의 입도분석을 통해 분류된 입자 크기를 누적 입도 분포 곡선에 나타냈으며 모든 지점에서 깊이별로 완만한 곡선을 보였다(그림 4). YHS1보다 YHS2-4에서 더 완만한 곡선을 보이며 이는 조립 및 세립질의 다양한 크기의 입자 크기들이 최상부보다 하부 지점들에 분포하고 있는 것을 의미한다(Lee and Kim, 2009).

누적 입도 분포 곡선을 통해 각 지점 및 깊이에서 균등계수와 곡률계수를 계산하였다. 균등계수는 YHS1에서 7.0-13.5, YHS2에서 10.7-41.3, YHS3에서 33.7-44.1, YHS4에서 12.1-36.4의 범위를 보였고 곡률계수는 YHS1에서 1.1-1.7, YHS2에서 1.5-2.7, YHS3에서 1.4-2.5, YHS4에서 1.0-2.8의 범위를 보였다(표 1). 양호한 입도를 보이는 균등계수의 범위는 6이상, 곡률계수는 1-3이다(Lee and Kim, 2009). 연구지역의 토양시료에서 산정된 값들은 모두 위의 범위 내에 속하기 때문에 입자크기 조성이 양호한 토양이라고 판단하였다.



**Fig. 3.** Soil texture at surface, 30, 60, 90 cm depths of monitoring points.

### 3.2 토양수분 변동 특성

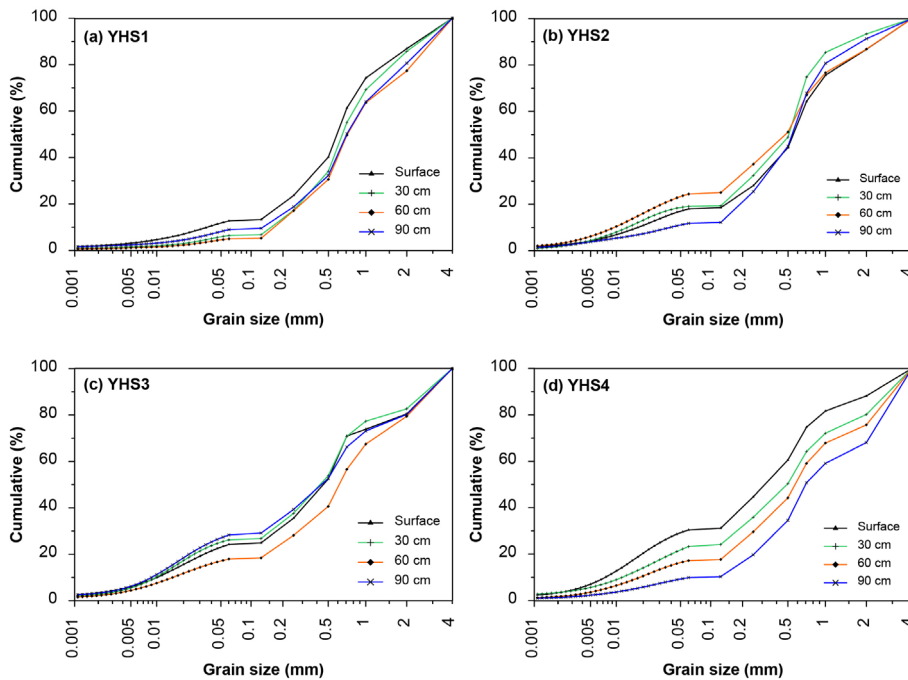
표 2는 2017년 3월 25일부터 2018년 10월 31일까지(586일) 측정된 연구지역의 토양수분 측정값에 대한 기초 통계 결과이다. 각 지점 측정값의 최솟값, 최댓값, 평균값은 YHS1의 경우는 깊이가 깊어질수록 대부분 감소하였고 YHS2, YHS3, YHS4의 경우 깊이가 깊어질수록 대부분 증가하였다. 다른 지점들과는 달리 YHS1만 깊어질수록 수분 함량이 감소하기 때문에 이 지점에서는 수분이 지하로 하향이동보다 경사면 방향을 따라 수평이동이 더 잘 이루어지고

있는 것으로 보인다. YHS1-3의 30, 60, 90 cm 깊이의 토양수분 평균값은 YHS3 방향으로 갈수록 높아지며 토양수분이 경사도에 따른 영향을 받는 상기내용과 일치한다.

모든 지점에서 토양수분 함량의 변동계수 평균값은 2017년은 9.9%, 2018년은 14.2%로 2018년의 값이 더 크다. 변동계수의 값이 크다는 것은 그만큼 자료 값의 분포가 평균 주변으로 모여 있지 않다는 것을 의미하며 이는 2017년 때보다 2018년에 강우가 간헐적으로 내렸기 때문이다. 2017년과 2018년의

**Table 1.** Uniformity coefficient( $C_u$ ) and coefficient of curvature( $C_z$ ) of soil samples.

Site	Coefficient	Depth (cm)			
		Surface	30	60	90
YHS1	$C_u$	13.5	7.0	7.4	9.8
	$C_z$	1.7	1.0	1.0	1.2
YHS2	$C_u$	25.7	26.9	41.3	10.7
	$C_z$	2.5	2.7	2.1	1.5
YHS3	$C_u$	33.7	34.9	37.4	44.1
	$C_z$	2.5	2.0	2.4	1.4
YHS4	$C_u$	32.9	36.4	28.4	12.1
	$C_z$	1.9	2.8	1.7	1.0



**Fig. 4.** Distribution of grain size for soil samples.

**Table 2.** Basic statistics of soil moisture content in monitoring period.

Site	Soil depth (cm)	Monitoring period		Soil moisture content (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )			
		Start date (mm/dd/yy)	End date (mm/dd/yy)	Min	Max	Mean	CV (%)
YHS1	30			0.189	0.333	0.246	11.0
	60	03/25/17	12/31/17	0.161	0.275	0.186	10.8
	90			0.125	0.260	0.138	10.1
	30			0.167	0.323	0.242	16.5
	60	01/01/18	10/31/18	0.136	0.260	0.192	14.6
	90			0.118	0.267	0.150	16.0
YHS2	30			0.223	0.329	0.281	7.5
	60	03/25/17	12/31/17	0.264	0.375	0.299	6.7
	90			0.285	0.389	0.325	8.6
	30			0.191	0.389	0.269	10.4
	60	01/01/18	10/31/18	0.245	0.359	0.300	8.0
	90			0.264	0.413	0.330	9.7
YHS3	30			0.266	0.420	0.309	6.8
	60	03/25/17	12/31/17	0.288	0.412	0.334	6.9
	90			0.305	0.391	0.339	16.2
	30			0.161	0.433	0.290	20.0
	60	01/01/18	10/31/18	0.207	0.432	0.320	13.1
	90			0.202	0.403	0.325	11.4
YHS4	30			0.182	0.376	0.241	22.8
	60	03/25/17	12/31/17	0.263	0.359	0.321	8.7
	90			0.319	0.359	0.340	2.1
	30			0.101	0.353	0.204	27.0
	60	01/01/18	10/31/18	0.170	0.353	0.289	17.3
	90			0.294	0.370	0.344	6.1

토양수분 평균값을 비교했을 때 30 cm 깊이에서는 모든 지점에서 2017년의 값이 더 크다(표 2; 그림 5).

그림 5는 연구기간 동안의 연구지역 토양수분 변화에 대한 시계열 자료이다. 표 2의 토양수분 함량의 평균값과 마찬가지로 YHS1만 깊이가 깊어질수록 수분 함량이 적고 YHS2-4는 깊어질수록 수분 함량이 많다. AWS에서 측정한 연구지역의 강수량 값과 모든 관측 지점의 토양수분 함량은 관련성이 큰데 특히 여름철 일 강우량이 많았을 때는 토양수분이 급격하게 증가한 것을 볼 수 있다. YHS1보다 낮은 고도에 위치한 YHS3으로 갈수록 토양수분 함량이 높은 것을 볼 수 있다. YHS1, 2보다 YHS3 지점이 높은 선행 토양수분을 보유하고 있어 강우에 의한 증

가와 감소가 상부보다 안정적인 조건인 것과 강우 이후 상부로부터 지속적으로 수분 공급을 받는 환경이기 때문에 사료된다. YHS4는 상부 지점들과 같이 강우에 민감하지만 다른 특성을 보인다. 30 cm 깊이는 상부 지점들보다 낮은 수분 함량을 보이나 강우 이후 증가 및 감소 폭이 큰 것으로 나타났다. 60 cm과 90 cm 깊이는 수분 함량이 상부 지점들보다 완만한 감소를 보이며 유지되는 경향을 보인다(그림 5d). 수분이 유지되는 경향을 보이는 것은 원활한 수분 및 강우의 연직 침투로 인한 수분 증가와 상부로부터 많은 수분 함량의 기여를 함께 받아 지하로 침투하는 반응시간이 길어지기 때문으로 판단된다 (Lee *et al.*, 2005).

YHS1과 YHS4는 30, 60, 90 cm에서 각 깊이별 토양수분의 격차는 5%정도 나며 YHS2, YHS3의 깊이별 차이는 크지않다. 또한 강수 시 YHS1과 4는 깊이가 깊을수록 토양수분이 강수에 대한 영향에 민감하지 않으며 YHS2와 3은 깊이에 따른 강수 영향의 차이가 거의 없다. 이로써 YHS2-3의 경우 토양으로의 수분 침투가 1과 4보다는 빠르게 일어난다는 것을, YHS1과 4의 경우 깊은 곳까지 수분이 침투하는데 걸리는 시간이 2와 3보다 많이 소요된다는 것을 알 수 있다.

표 3은 입도 분석을 통해 얻은 YHS2와 YHS3의 90 cm 깊이 토양 시료의 모래, 미사, 점토 함량에 해당하는 값을 ROSETTA 프로그램에 입력 후 van Genuchten-Mualem model로 토양 수리학적 매개변수( $\theta_r, \theta_s, K_s, n, l$ )를 추정한 결과(initial parameters)이다. 이들 값을 HYDRUS-1D의 역해석법으로 보정을 하여 모의분석의 신뢰성을 높였다. 특히  $\alpha, n, K_s$  는 토양수분 유동을 모의할 때 민감하기 때문에 2017, 2018년 중 우기에 해당하는 토양수분 값에 대하여 최적화된 매개변수로 나누어 보정하였다

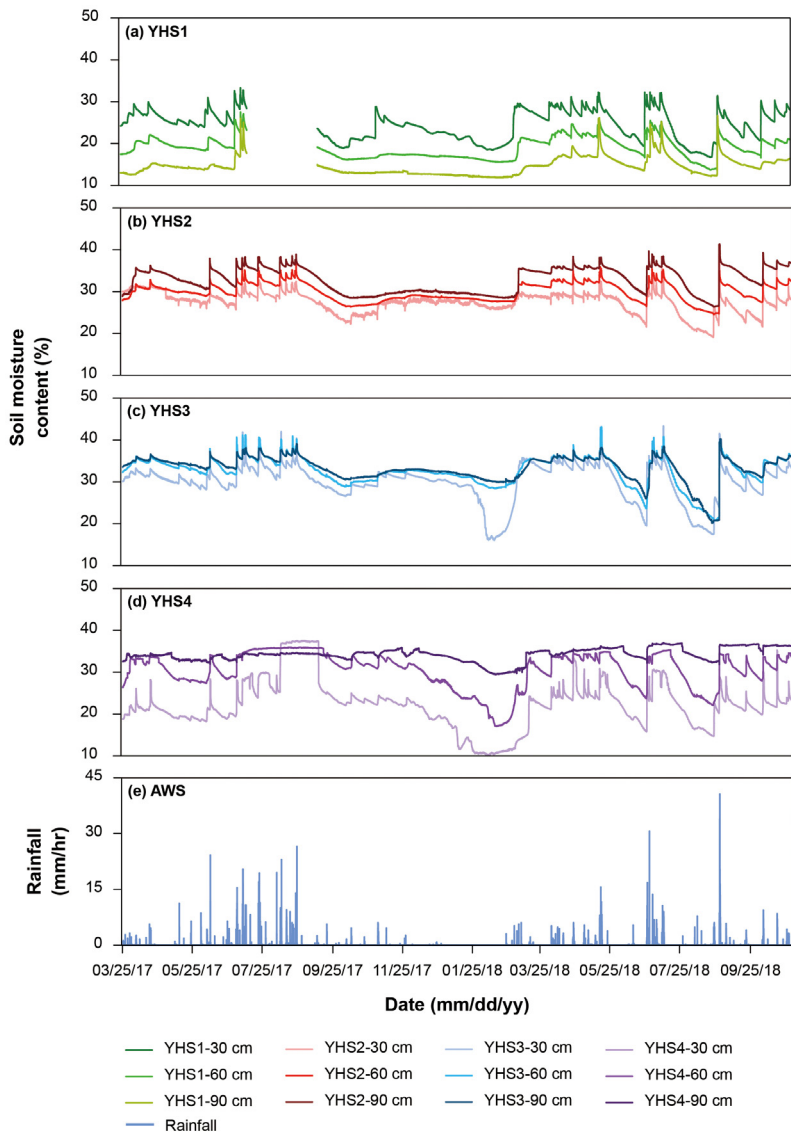


Fig. 5. Monitoring results of soil moisture content and rainfall.



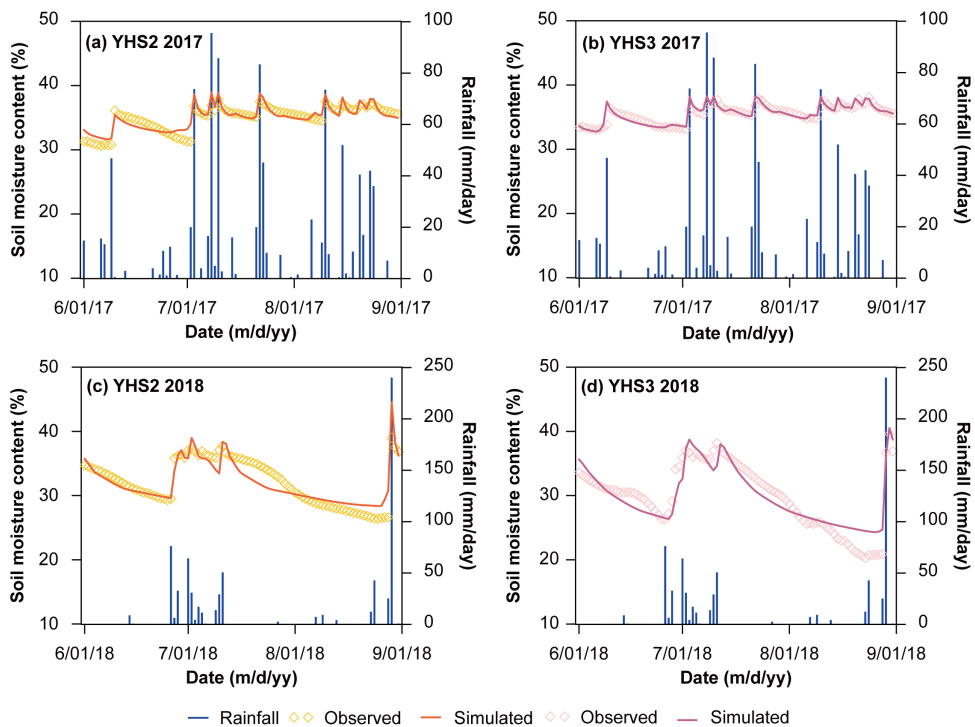
(Wu *et al.*, 2016; Noh *et al.*, 2018). 그림 6은 2017년과 2018년도 우기 때 YHS2, YHS3의 90 cm 깊이에서 관측한 토양수분 함량 및 강수량과 보정된 매개변수를 가지고 모의분석한 결과를 비교한 것이다.

모의 및 현장 토양수분 함량을 비교했을 때 그래프의 형태가 대부분 일치하며 2017년에 현장에서 측정한 토양수분 함량과 모의분석 결과가 2018년도의 것보다 더 일치한다. 강우에 따른 토양수분 함량 변화의 경우 약 20 mm/day 미만의 강우 시에는 수분

함량의 변화가 거의 없었지만 20 mm/day 이상의 강우 시에는 수분 함량의 변화가 있었다. 이러한 토양수분 함량의 변동에 대한 결과는 모의분석한 것과 현장 측정된 것이 유사하였다. YHS2, YHS3 90 cm 깊이의 토양수분 함량은 대체로 2017년도에는 30-40%, 2018년도에는 25-40%였다. 이는 해당 년도의 서로 다른 강우량과 잘 부합한다. 강우 시 증가한 토양수분 함량이 시간이 지나면서 감소한 이유는 증발산 되었거나 지하수로 함양된 것으로 판단된다. 이때

**Table 3.** Parameters estimated with van Genuchten-Mualem model and calibrated with HYDRUS-1D.

Site	Year		$\theta_r$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	$\theta_s$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	$\alpha$	$n$	$K_s$ (cm/day)	$l$
YHS2	2017	Initial estimated	0.041	0.387	0.042	2.430	273.27	0.5
		Calibrated	0.100	0.410	0.038	1.157	168	2.556
		Calibrated	0.070	0.423	0.088	1.427	250	8.272
YHS3	2017	Initial estimated	0.027	0.405	0.037	1.429	80.61	0.5
		Calibrated	0.027	0.389	0.051	1.069	24.61	0.397
		Calibrated	0.027	0.451	0.020	1.652	12	0.2359



**Fig. 6.** Comparison of observed and simulated soil moisture content.

수분 함량 증가 및 감소는 비선형적이다.

### 3.3 현장 토양수분과 수치 모델링한 토양수분의 상관성

그림 7은 매개변수로 모의분석한 토양수분 함량과 현장에서 측정된 토양수분 함량과의 상관관계를 분석한 결과이다. 이는 그림 6에서의 모의분석이 잘 이루어졌는지 정량적으로 검토한 것이다. 2017년도 90 cm 깊이의 YHS2의 결정계수( $r^2$ )는 0.82, 상관계수( $r$ )는 0.91, 평균제곱근오차(RMSE)는 0.009, YHS3의 결정계수는 0.98, 상관계수는 0.99, 평균제곱근오차는 0.007, 2018년도 90 cm 깊이의 YHS2의 결정계수는 0.79, 상관계수는 0.89, 평균제곱근오차는 0.016, YHS3의 결정계수는 0.79, 상관계수는 0.89, 평균제곱근오차는 0.019이다. 상기 값들의 평균은 결정계수의 경우 0.85, 상관계수는 0.92, RMSE는 0.013이다. HYDRUS-1D를 사용한 토양수분 유동과 관련된 모의분석값과 현장 관측값을 비교한 연구들에서 0.84-0.93의 상관계수 범위로 볼 때 본 연구의 상관계수도 높은 상관성을 갖는 것을 알 수 있다(Assefa

and Woodbury, 2013; Chen *et al.*, 2014; Shin *et al.*, 2016). 하지만 이 연구는 지하수위 및 식생의 증발산량, 뿌리에 흡수되는 수분 함량, 외부 요인에 의한 토양구조 및 공극의 변화 등 3차원의 현상이 아닌 1차원적 측면만 반영되었다. 이는 높은 상관성 및 낮은 RMSE에도 불구하고 모델링 결과가 완전하게 매치 되지 않은 원인으로 생각된다.

### 3.4 우기의 잠재 지하수 함양량 및 침투량 비교

그림 8은 2017년과 2018년도 우기 때의 YHS2, YHS3 지점에 대한 90 cm 깊이의 침투량(mm)과 500 cm 깊이의 잠재 지하수 함양량(mm)을 추정 및 비교한 것이다. 2017년도의 경우 YHS2 90 cm 깊이에서의 토양으로 침투한 물의 양은 849 mm, 500 cm 깊이에서의 잠재적인 지하수 함양량은 555 mm로 산정되었다. 이는 연구지역에 2017년 우기 때 내린 강우량이 945.8 mm라는 것을 고려했을 때 강우량의 89.8%가 토양으로 침투, 58.7%가 지하수로 함양된 것이다. 지하수 함양이 강우에 의해 토양으로 침투한 수분량으로만 된다고 가정했을 때 침투한 수분

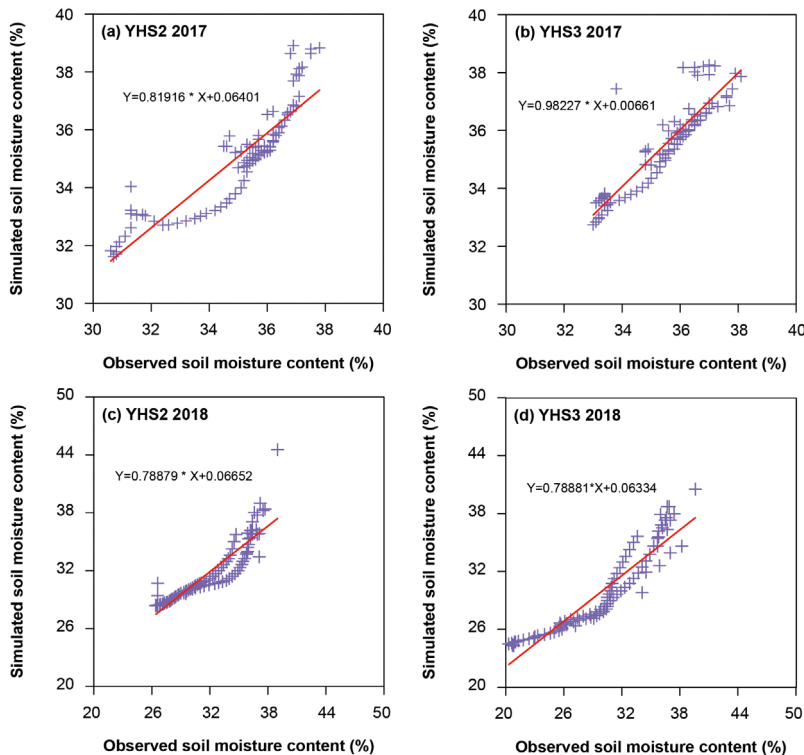


Fig. 7. Correlation of observed and simulated soil moisture content.

의 65.4%가 지하수로 함양되었다. YHS3 90 cm 깊이에서의 침투량은 763 mm, 함양량은 총 418 mm이며 연강수량의 44.2%가 지하수로 함양되었다. 2018년도의 경우는 YHS2 90 cm 깊이에서의 침투량은 614 mm, 함양량은 332 mm이며 2018년도 우기 때의 강우량인 694.6 mm의 47.8%가 지하수로 함양되었다. YHS3 90 cm 깊이에서의 침투량은 453 mm, 함양량은 408 mm이며 강우량의 58.7%가 지하수로 함양되었다.

지하수 함양은 보통 7월과 8월에 이루어졌으며 2017년 6월 YHS2에서 1 mm, 7월 YHS2에서 250 mm, YHS3에서 174 mm, 8월 YHS2에서 304 mm, YHS3에서 244 mm, 2018년 6월 YHS2에서 27 mm, YHS3에서 94 mm, 7월 YHS2에서 197 mm, YHS3에서 128 mm, 8월 YHS2에서 108 mm, YHS3에서 186 mm 함양되었다. 이러한 결과는 YHS2가 YHS3보다 지하수 함양이 더 잘되는 환경임을 의미한다. 같은 지점에서 2018년도보다 2017년도에 지하수 함양이 더 잘 이루어진 이유는 2017년과 2018년의 우기(6-8월) 때의 강우량을 비교했을 때, 각 945.8 mm, 694.6 mm으로 2017년 우기의 강우량이 2018년의

우기 때보다 더 많고 강우횟수가 더 많으며 20 mm/day 이상의 강우횟수도 2017년이 14회로 9회인 2018년도보다 더 많기 때문이다.

2017년 6월의 경우 연구지역에 수차례 강우가 있었지만 지하수 함양이 거의 발생하지 않았다. 그림 6과 8에서 보듯이 연구지역에서는 적어도 20 mm/day 이상의 강우가 내려야 지하수 함양이 이루어지는데 이때(2017년 6월)의 강우량은 1.4-12.4 mm/day(최대 강우량인 46.8 mm/day 제외)이기 때문에 함양이 잘 이루어지지 않았다.

#### 4. 결론

토양수분 함량은 경사가 급한 곳에 위치한 YHS1을 제외하고 깊이가 깊어질수록 증가하였고 경사도가 완만할수록 높은 편이었다. 토양수분 함량을 연강수량과 비교했을 때 여름철이 겨울철보다 높았고 2017년이 2018년보다 더 높았다. 연도별로 지하수 함양량이 차이는 것은 강우량, 강우횟수, 20 mm/day 이상인 강우횟수, 선행 토양수분함량, 선행 강우량의 차이로 인한 것으로 판단된다. 연구지역에서의

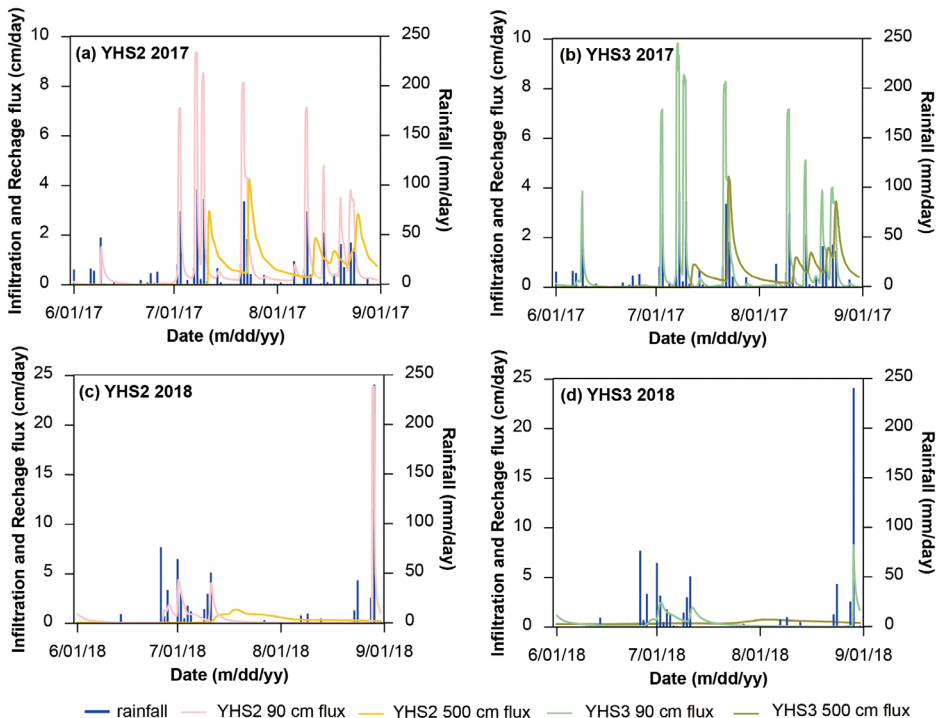


Fig. 8. Simulation results of infiltration at 90 cm depth and potential groundwater recharge at 500 cm depth.

지하수 함양은 강우량이 20 mm/day 이상일 때 발생하며, 이로 인해 7, 8월 이외에도 강우가 있었지만 강우량이 20 mm/day 미만이었기 때문에 우기가 아닌 때에는 지하수 함양이 거의 발생하지 않은 것으로 여겨진다.

추정된 지하수 함양량은 2018년보다 2017년에 더 많은 것으로 산정되었다. 이는 우기의 강우량이 2017년에 945.8 mm, 2018년에 694.6 mm로 251.2 mm 더 많고, 강우 횟수는 2017년에 47회, 2018년에 32회로 2017년도 때 5회 더 많으며, 20 mm/day 이상의 강우횟수는 2017년에 13회, 2018년에 9회로 2017년도 때 4회 더 많았기 때문이다. 시계열 자료에서 연구지역의 토양수분 변동 특성이 YHS1-3에서는 비슷하게 나타났지만 가장 낮은 고도에 위치한 YHS4는 그 특성이 상이하였다. 이는 높은 선행 토양수분 함량, 평탄한 지형으로 인한 수분의 원활한 연직 침투, 식생조건이 YHS1-3보다 YHS4가 수분이 침투하기 좋은 조건이었기 때문일 것으로 사료된다.

본 연구에서는 실제 식생의 증발산량, 뿌리에 흡수되는 수분 함량, 지하수위, 지연시간 등 토양수분 함량 및 지하수 함양에 영향을 미치는 3차원적 요인을 전부 고려하지는 못했다. 이에, 연구 결과가 현장을 완벽하게 재현하지는 못하였으나 제시된 연구 방법 및 결과를 통해 불포화대 토양수분 유동 모델링 기반의 지하수 함양 추정 및 토양수분 모니터링 연구에 유의미한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 성과는 2019년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. NRF-2015R1A4A1041105). 이 논문은 제 1저자의 석사 학위논문을 수정 및 발전시켜 게재함을 밝힙니다. 논문을 심사해주신 함세영 교수님과 과익명의 심사위원님께 감사의 말씀을 드립니다.

## REFERENCES

- Ahn, S.R., Jang, C.H., Lee, J.W. and Kim, S.J., 2015, Assessment of climate and land use change impacts on watershed hydrology for an urbanizing watershed. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 35, 567-577 (in Korean with English abstract).
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Rase, D. and Smith, M., 1998, Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper 56*. FAO, Rome, Italy.
- Assefa, K.A. and Woodbury, A.D., 2013, Transient, spatially varied groundwater recharge modeling. *Water Resources Research*, 49, 4593-4606.
- Bae, S.K., 2016, Groundwater hydrological study of silla well in Gyeongju. *Journal of Environmental Science International*, 25, 99-105 (in Korean with English abstract).
- Chang, C.H., 1997, A study on shapes and genetic process of erosion basins. *Journal of Photo Geography*, 6, 1-16 (in Korean with English abstract).
- Chen, M., Willgoose, G.R. and Saco, P.M., 2014, Spatial prediction of temporal soil moisture dynamics using HYDRUS-1D. *Hydrological processes*, 28, 171-185.
- Choi, D.G., Ahn, J.H., Jo, D.J. and Kim, S.D., 2010, Estimating climate change impact on drought occurrence based on the soil moisture PDF. *Journal of Korea Water Resources Association*, 43, 709-720 (in Korean with English abstract).
- Choi, H.J., Jo, N.G., Yoo, K.O., Choi, B. and Kim, S., 2009, Weed survey at environment-friendly agriculture farmlands of Haean-Myon, Yanggu. *Korean Journal of Weed Science*, 29, 32-38 (in Korean with English abstract).
- Chung, I.M., Kim, J.T., Lee, J.W. and Chang, S.W., 2015, Status of exploitable groundwater estimations in Korea. *The Journal of Engineering Geology*, 25, 403-412 (in Korean with English abstract).
- Fetter, C.W., 2018, *Applied hydrogeology*. Waveland Press, Illinois, 598 p.
- 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, 221-236 (in Korean with English abstract).
- Hong, E.M., Nam, W.H. and Choi, J.Y., 2015, Climate change impacts on agricultural drought for major upland crops using soil moisture model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 57, 65-76 (in Korean with English abstract).
- Hong, M.K., Lee, S.H., Choi, J.Y., Lee, S.H. and Lee, S.J., 2015, Estimation of soil moisture and irrigation requirement of upland using soil moisture model applied WRF meteorological data. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 57, 173-183 (in Korean with English abstract).
- Jeong, H.S., Jalmasco, M., Ahn, J.H. and Shin, H.S., 2016, Constant head test of permeable pavement-soil systems

- considering clogging. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 16, 363-368 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.L., Sunwoo, W.Y., Kim, S.K. and Choi, M.H., 2016, Construction and estimation of soil moisture site with FDR and COSMIC-ray (SM-FC) sensors for calibration/validation of satellite-based and COSMIC-ray soil moisture products in Sungkyunkwan university, South Korea. *Journal of Korea Water Resources Association*, 49, 133-144 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.H., Oh, D.K. and Yoon, Y.H., 2013, Effects of super absorbent polymer on the growth of vine plants. *Journal of Environmental Science International*, 22, 801-810 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.J., 2019, Estimation of groundwater recharge using soil moisture measurement and numerical modeling in Haeon-Myeon, Yanggu. M.S. thesis, Kangwon National University, Chuncheon, 42 p (in Korean with English abstract).
- Kim, J.J., Jeon, W.H. and Lee, J.Y., 2018, Estimation of deep percolation using field moisture observations and HYDRUS-1D modeling in Haeon basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 54, 545-556 (in Korean with English abstract).
- Korean Association of Geographic Information Studies, 2006, Dictionary of natural geography. Hanul Publishing Group, Paju, 856 p (in Korean).
- Lee, G.Y., Kim, k.H., Oh, K.J. and Kim, S.H., 2005, Spatial-temporal distribution of soil moisture at Bumreunsa hillslope of Sulmachun watershed through an intensive monitoring. *Journal of Korea Water Resources Association*, 38(5), 345-354 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., 2009, Importance of hydrogeological and hydrologic studies for Haeon basin in Yanggu. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 405-414 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y. and Koo, M.H., 2007, A review of effects of land development and urbanization on groundwater environment. *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 517-528 (in Korean with English abstract).
- Lee, M.S. and Kim, K.S., 2009, Estimation model of shear strength of soil layer using linear regression analysis. *International Symposium on Urban Geotechnics*, Incheon, September 25-26, 1065-1078 p (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, 2485-2497.
- Noh, D.N., Park, H.J., Cheong, J.Y. and Hamm, S.Y., 2018, Groundwater recharge analysis and comparison using hybrid water-table fluctuation method and groundwater modeling: a case of Gangcheon basin in Yeosu city. *Journal of the Geological Society of Korea*, 54, 169-181 (in Korean with English abstract).
- Park, S.D., Shin, S.S., Kim, S.J. and Choi, B.K., 2013, Effects of surface compaction treatment on soil loss from disturbed bare slopes under simulated rainfalls. *Journal of the Korean Water Resources Association*, 46, 559-568 (in Korean with English abstract).
- Ries, F., Lange, J., Schmidt, S., Puhmann, H. and Sauter, M., 2015, Recharge estimation and soil moisture dynamics in a Mediterranean, semi-arid karst region. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 1439-1456.
- Rural Development Administration (RDA), 2018, <http://soil.rda.go.kr/soil/soilmap/characteristic.jsp> (July 30, 2019).
- 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, 60-69 (in Korean with English abstract).
- Shin, Y.C., Lee, T.H., Kim, S.W., Lee, H.W., Choi, K.S., Kim, J.G. and Lee, G.H., 2017, Development of agricultural drought assessment approach using SMAP soil moisture footprints. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 59, 57-70 (in Korean with English abstract).
- Šimůnek, J., Šjma, M. and van Genuchten, M.Th., 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.
- van Genuchten, M.Th., 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- Won, J.K., Lee, M.W. and Woo, J.K., 1987, Geologic and geographic characteristics of Haeon basin. *Memorial Book of 40th Anniversary of Kangwon National University*, Kangwon National University Publishing, Chuncheon, 45-47 (in Korean).
- Woo, H.S., Chung, S.J. and Cho, H.G., 2011, A field survey and analysis of ground water level and soil moisture in a riparian vegetation zone. *Journal of Korea Water Resources Association*, 44, 797-807 (in Korean with English abstract).
- Wu, Q., Wang, G., Zhang, W., Cui, H. and Zhang, W., 2016, Estimation of groundwater recharge using tracers and numerical modeling in the north China plain. *Water*, 8, 353, 1-19.
- Yang, H.K., 2006, Runoff characteristics of non-point

- source pollutants in storm event. *Journal of the Korean Geographical Society*, 41, 418-434 (in Korean with English abstract).
- 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 Haeon myeon watershed. *Journal of Korean Society on Water Quality*, 24, 569-580 (in Korean with English abstract).
- Yoon, S.C., Park, C.H., Jo, I.H., Lee, J.H., Park, J.W., Hong, J.R., Lee, H.G., Jeon, W.H., Yun, S.W. and Lee, J.Y., 2018, Evaluation of characteristic for groundwater, stream and land use in Haeon basin, Yanggu conuntry. *Journal of the Geological Society of Korea*, 54, 193-203 (in Korean with English abstract).
- Yun, S.W., Lee, J.Y. and Lee, H.G., 2015, Variation of stream water quality and baseflow contribution from groundwater during rainfall event in the Haeon basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 611-621 (in Korean with English abstract).
- Yun, S.W., Jeon, W.H. and Lee, J.Y., 2017, Evaluation of hydrochemical characteristics of groundwater and stream water in a heavy agricultural region of the Haeon basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 727-742 (in Korean with English abstract).
- 

Received : November 12, 2019

Revised : January 18, 2020

Accepted : January 20, 2020