

## 강원도 해안분지에서의 토지이용에 따른 토양수분 변동 특성

이성빈 · 이민욱 · 이진용<sup>‡</sup>  
강원대학교 지질학과

### Characteristics of soil moisture variation with land-use in the Haean basin of Gangwon province

Sungbeen Lee · Minwook Lee · Jin-Yong Lee<sup>‡</sup>

Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

#### 요 약

본 연구에서는 강원도 양구군 해안면에서 토지이용 및 고도에 따른 토양수분 변화양상을 관찰하였고, 연구 지역에서 급속도로 재배면적을 넓혀가고 있는 사과와 인삼을 대상으로는 그 변동 특성을 더욱 자세히 알기 위해 깊이별로 자동모니터링하여 토양수분 변동 특성을 분석하였다. 토양수분 자동모니터링을 위해 깊이별(10, 20, 40, 70, 100 cm)로 토양수분 센서를 2지점(RTA, RTG)에 설치하였으며 2021년 10월 19일부터 2021년 12월 20일까지의 자료를 시계열분석에 활용하였다. 또한, 고도 및 토지이용별 토양수분함량 측정을 위해 20곳(EDN1~10, EDS1~10)의 측정지점을 추가로 선정하여 2022년 2월 16일부터 2022년 4월 12일까지 2주마다 10 cm 깊이에서 토양수분함량을 측정하였다. 토양수분 함량은 고도별로 비교하였을 때 큰 차이를 알 수 없었으나 토지이용 별로 비교하였을 때 감자밭의 중앙값이  $0.316 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 로 대부분의 토지이용에 비해 월등히 높은 값을 보였고 무밭의 중앙값은  $0.139 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 로 다섯 유형의 토지이용 중 가장 낮은 중앙값을 가졌다. RTA와 RTG의 자기상관분석결과 두 토지이용 모두 깊이 10, 40, 20, 100, 70 cm 구간 순서대로 짧은 기억 효과를 보였다. 교차상관분석결과 RTA에서는 입력값이 기온일 때 0.39의 가장 큰 교차상관계수를 보였으며 RTG의 경우 입력값이 강수량일 때 0.48의 가장 큰 교차상관계수를 보였다. 본 연구에서 제공하는 자료는 기후변화에 따른 토지이용의 급격한 변화들과 지하수의 지속적인 관리 및 사용을 위해 유의미하게 쓰일 수 있을 것으로 여겨진다.

**주요어:** 토양수분, 토지이용, 시계열분석, 기후변화, 지하수

**ABSTRACT:** In this study, we observed the soil moisture with altitude and land use in Haean-myeon, Yanggu-gun, Gangwon-province. For understanding the variation of characteristics in more details, we installed the automatic monitoring system with depth at apple orchard and ginseng field, which are rapidly expanding in the research area. For automatic soil moisture monitoring and time-series analysis, we installed the soil moisture sensors with depth (10, 20, 40, 70, 100 cm) at two sites (RTA, RTG) and extracted the data from October 19, 2021 to December 20, 2021. In addition, twenty measurement sites (EDN1~10, EDS1~10) were selected to measure soil moisture content with 10 cm in depth with altitude and land use and we conducted the field works every two weeks from February 16, 2022 to April 12, 2022. There was no significant difference in soil moisture content when compared by altitude. However, in the result of comparing soil moisture contents by land use, the median soil moisture contents in potato field was  $0.316 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , which was significantly higher than other land uses. The median of soil moisture content in radish field was  $0.139 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , which was the lowest among the five types of land use. As a result of autocorrelation analysis on soil moisture content in RTA and RTG, both land uses responded rapidly to external influences in the order of depths (10, 40, 20, 100, and 70 cm). As a result of crosscorrelation analysis, the RTA showed the maximum crosscorrelation coefficient of 0.39 when the input factor was temperature, and the RTG showed the maximum crosscorrelation coefficient of 0.48 when the input factor was precipitation. The result of this study is useful to understand the hydrological process that rainfall recharge groundwater through unsaturated zone.

**Key words:** soil moisture, land use, time-series analysis, climate change, groundwater

<sup>‡</sup>Corresponding author: +82-33-250-8551, E-mail: [hydrolec@kangwon.ac.kr](mailto:hydrolec@kangwon.ac.kr)

## 1. 서론

최근 전 세계적인 기후변화는 단순히 기온 상승 뿐만 아니라 극심한 가뭄 및 집중폭우, 강수패턴의 변화와 같은 빈번한 자연재해 발생을 야기하고 있다 (Goderniaux *et al.*, 2009; Baek *et al.*, 2017; Batalha *et al.*, 2018). 이에 많은 나라에서는 지속적인 수자원의 이용과 안정적인 확보를 위해 노력하고 있다. 그중 지하수는 농업용수, 공업용수 그리고 생활용수 등 인간 활동에 다양하게 사용되고 있는 중요한 수자원으로 주로 강수에 의해 불포화대 토양으로 침투해 공급되거나 지표수를 통해 함양된다.

불포화대 내의 공극에 있는 물을 뜻하는 토양수분은 식물의 증발산, 강수의 침투 및 지하수함양 등 수문학적인 과정을 이해하는 데 중요한 요소로 크게 흡착수(hygroscopic water), 모세관수(capillary fringe water), 중력수(gravitational water)의 세 가지 형태로 존재한다(Kim *et al.*, 2016). 흡착수는 토양 입자 표면에 분자력에 의해 얽힌 물을 이루는 물이다. 이 흡착수가 많아져 공극에 채워진 물이 표면장력으로 유지되면 모세관수라고 하며 중력수는 잉여 토양수가 발생하거나 강우 등에 의해 공극이 포화되었을 때 중력에 의해 하향 이동하는 물을 말한다(Kim *et al.*, 2013; Ha *et al.*, 2016).

토양수분함량은 토양 물성, 식생, 기상조건, 토지 이용 및 토지 피복에 따라 다양한 변화를 보이는데 (Hong *et al.*, 2012), 그중에서도 식생의 종류와 토지 피복 유형에 가장 큰 영향을 받는다(Fu *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2013; Lozano-Parra *et al.*, 2015). 이와 관련하여 Choi *et al.* (2010)은 토양수분과 가뭄의 상호관계를 연구하여 특히 토양수분, 강수량, 증발산량 등을 모의분석해 가뭄을 예측하였다. Woo *et al.* (2011)은 토양의 입경, 강수량, 지하수위 그리고 토양수분의 상호연관성을 연구하여 토양수분에 영향을 주는 요인을 토양의 상부에서는 강우량, 토양의 하부에서는 지하수위가 우세하다고 분석하였다. Fang *et al.* (2016)은 토양수분은 일반적으로 강수 침투에 영향을 받으나 대부분의 연구가 0-30 cm의 토양깊이에만 초점이 맞춰져 있으며 더 깊은 토양층은 간과되고 있다고 하였다.

본 연구지역은 농업 밀집지역으로 일찍이 세계최대의 담수 저수지인 논의 인공함양에 의한 자연저장

능력에 관심을 갖고 대수층의 수리전도도 및 지하수 함양률을 추정해 논의 증발산량과 비교하여 연구지역 논의 수리지질학적 특성이 평가된 바 있다(Yun *et al.*, 2018). Lee *et al.* (2019)은 해안분지의 토지 이용 및 토지피복 변화에 주목하고 농업활동과 하천 탁수발생의 인과관계에 대해 분석하여 작물 중 무가토양침식의 가장 큰 영향을 끼친다고 밝힌 바 있다. 한편 Kim *et al.* (2018)은 해안분지에서 깊이별(30, 60, 90 cm)로 토양수분을 관측하고 기상자료와 연계해 불포화대 수치 모델링 프로그램인 HYDRUS-1D을 이용해 잠재 지하수 함양량을 추정하였다.

이렇듯 토양수분과 토지이용의 관계에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는 가운데 토지이용 별 깊이 에 따른 토양수분 함량의 변화를 보고한 연구는 미미하다(Chia *et al.*, 2022). 본 연구에서는 토지의 대부분이 농지로 이용되는 농촌지역을 대상으로 각기 다른 토지이용에 따른 토양수분의 시계열적 변화를 분석하고 토양수분의 영향을 미칠 수 있는 요인을 평가하는 것을 목표로 한다.

## 2. 연구지역 및 방법

### 2.1 연구지역

연구지역은 행정구역상 강원도 양구군 해안면으로 소양강 상류 유역에 해당되며, 지리적 방위는 북위 38.239°-38.329°, 동경 128.083°-128.173°에 위치한다. 해안면 주변은 가칠봉(1,242 m), 도솔산(1,147 m), 대우산(1,056 m), 달산령(807 m)과 같이 해발고도가 높은 산들로 둘러싸여 있고, 중심(해발 410 m)이 평탄한 분지 지형이다(그림 1). 분지의 중앙에서 외곽으로 갈수록 경사(약 20~50°)가 급해지며 저지대를 제외하면 대체로 급한 경사를 갖는다(Yoo *et al.*, 2008). 해안분지는 남북으로 장축이 10.5 km, 동서로 단축이 6.7 km의 타원형이며 그 모양이 마치 화채그릇처럼 생겼다고 하여 일명 펀치볼(Punch Bowl)이라고도 한다(Lee, 2009). 해안분지의 생성 원인은 운석충돌설과 차별침식설로 크게 두 가지가 있었으나 운석충돌설은 과학적 근거가 미약해 많은 지질학자들에게 받아들여지지 않았고 현재 가장 인정되는 생성원인은 차별침식에 의한 분지형성설이다. 분지 중앙에 분포하는 화강암류가 외곽의 결정질 편마암보다 상대적으로 풍화침식에 약하여 움푹

한 모양을 형성하게 되었다는 해석이다(Won *et al.*, 2006). 해안분지의 외륜은 선캄브리아기 변성암 복합체로 편마암, 편암, 규암으로 구성되며, 이를 주라기 대보화강암인 내륜이 관입한다. 이 주라기 화강암은 복운모 화강암을 수반하는 흑운모 화강암으로 나타나며(Won *et al.*, 1987), 그 상부에는 제 4기 충적층이 부정합으로 분포한다. 국내 침식분지들의 경우 대체로 소하천을 다수 포함하여 형성되는데 해안분지 또한 지질 및 지형적 특성에 따라 소하천들이 높은 고도의 최상류로부터 발원하는 분지에 속한다(Chang, 1997).

기상청에서 운영하는 해안면사무소의 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS)의 2021년 기상자료에 따르면 연구지역의 연간 최고기온 32.7°C, 최저기온 -21.8°C이며 연간 일평균 기온 9.3°C로 연중 기온차가 매우 크다. 농촌진흥청(Rural Development Administration, RDA)에서 제공하는 토양환경지도 휴프람에 따르면 해안분지의 표토 토성은 사양토(Sandy loam) 4,185 ha, 양토(Loam) 1,904 ha, 미사질식양토

(Silty clay loam) 21 ha의 면적으로 분포하며 심토 토성은 사양질(Coarse loamy) 5,241 ha, 식양질(Silty) 820 ha, 사질(Sandy) 33 ha로 나타난다(RDA, 2021).

본래 연구지역에서는 지하수 함양 기능이 매우 큰 논을 대상으로 수리지질학적 특성이 연구된 바 있다(Yun *et al.*, 2018). 그런데 연평균기온 상승에 따라 해안분지가 인삼 재배의 최적지로 평가받으며 해안분지의 인삼 농지면적은 2015년 184 ha에서 2019년 316 ha로 증가했고, 논 면적은 2015년 304 ha에서 2019년 136 ha로 감소하였다. 한편, 사과 재배 농지면적은 2015년 55 ha에서 2019년 110 ha로 증가했으며 무밭의 농지면적은 5년간 큰 변화를 보이지 않았다(그림 2; Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs (MAFRA, 2021)).

2.2 연구방법

2.2.1 토양수분 및 기상자료 수집

연구지역의 지형적 특성을 고려하여 고도 별, 토지이용 별 토양수분함량을 측정하기 위해 총 5가지

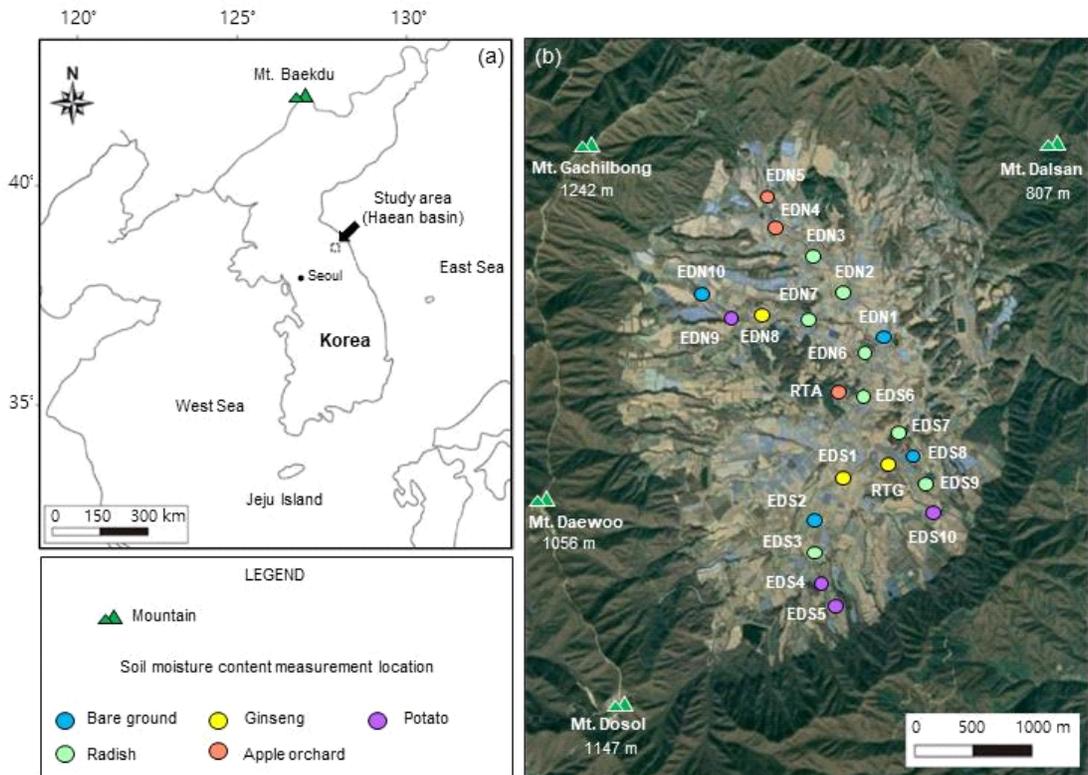


Fig. 1. Study area and soil moisture content measurement location map.

유형의 토지이용(노지, 인삼밭, 사과밭, 무밭, 감자밭)을 대상으로 해발고도 420 m부터 500 m까지 토양수분 측정지점을 20지점(EDN1~10, EDS1~10) 선정하였고 2022년 2월 16일부터 2022년 4월 12일까지 2주마다 토양수분 함량을 측정하였다. 또한, 해안면의 대표적인 작물인사과밭(RTA)과 인삼밭(RTG)을 대상으로는 두 지점을 더 선정하여 매시 정각마다

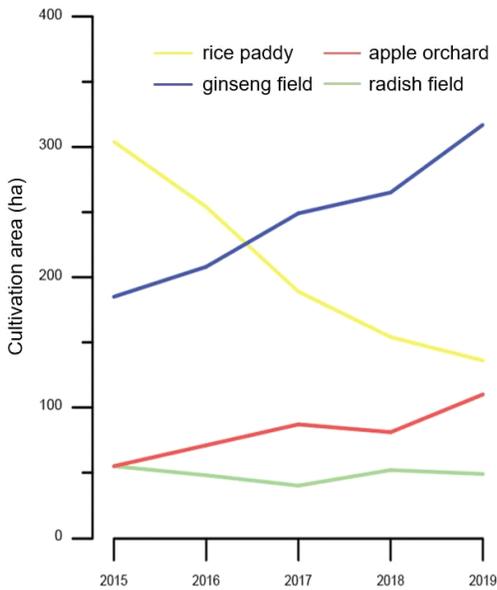


Fig. 2. The cultivation area of rice paddy, ginseng fields, apple orchard and radish fields in the Haean basin from 2015 to 2019 (MAFRA, 2021).

깊이별(10, 20, 40, 70, 100 cm) 토양수분 함량을 자동으로 측정하는 시스템을 구축해(그림 3) 2021년 10월 21일부터 2021년 12월 20일까지의 시계열 자료를 획득하였다. 기상자료의 경우 기상청의 기상자료개방포털을 통해 얻을 수 있는 해안면의 AWS에 저장되고 있는 기온, 풍향, 풍속, 강수량, 습도, 기압자료를 내려받아 분석에 활용하였다.

토양수분함량 측정을 위하여 EDN, EDS의 경우 토양수분함량 및 토양온도를 측정하는 TEROS11 (Meter Group, USA)센서를 사용하였고 RTG, RTA는 토양수분함량을 측정하는 10HS(Meter Group, USA)센서를 사용하였다. 이 두 센서는 모두 FDR (frequency domain reflectometry)방식으로 토양수분을 측정하며 측정값을 표기 및 저장하는 데이터로거ZL6 (Meter Group, USA)를 필요로 한다(그림 4). 이 로거는 EDN 및 EDS 지점에서는 현장 측정 시 연결된 센서의 측정값 표기의 목적으로 사용되며, 실시간 모니터링 지점(RTG 및 RTA)에서는 현장에 설치되어 온라인 통신을 통해 실내 원격 데이터 수신 목적으로 사용되었다.

2.2.2 토양시료 분석

토양수분함량 값의 영향을 미칠 수 있는 요인 중 하나인 토성을 확인하기 위해 RTG, RTA지점의 토양을 대상으로 지표 10, 20, 40, 70, 100 cm 깊이마다 총 10개의 토양시료를 각각 500 g씩 채취하여 비닐 지퍼백에 보관 및 운반하였다. 채취한 시료는 염



Fig. 3. (a) Ginseng field and (b) apple orchard with automatic soil moisture content monitoring system.

산 및 과산화수소를 이용해 시료의 탄산염 및 유기물성분을 제거 후 건조하여 전처리하였다. 전처리된 시료는 4.0, 2.0, 1.0, 0.71, 0.5, 0.25, 0.125, 0.063 mm 체에 체분석 후 0.063 mm 이하 시료는 입도분포측정기(Mastersizer 3000, Malvern, U.K.)를 통해 0.001 mm 크기의 입자까지 분석하였다. 이렇게 얻은 입도 분포 자료들을 미 농무부(United States Department of Agriculture, USDA)의 토양물성분류 삼각 다이어그램에 도시하여 채취한 토양시료의 토성을 파악하였다.

### 2.2.3 시계열분석

측정된 토양수분 시계열 자료의 연속적인 변동 특성과 외부 요인에 대한 반응정도를 알기 위해 자기상관분석을 하였다. 자기상관함수는 시계열 자료의 시간에 따른 상관 정도를 나타내기 위해 사용하는 통계량으로 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \gamma_k &= Cov(x_t x_{t+k}) \\ &= \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} [(x_t - \mu) - (x_{t+k} - \mu)] \end{aligned} \quad (1)$$

$$\rho_k = \frac{Cov(x_t x_{t+k})}{Cov(x_t x_t)} = \frac{\gamma_k}{\gamma_0} \quad (2)$$

여기서  $\rho_k$ =자기상관함수,  $\gamma_k$ =자기분산함수,  $x_t$ =시계열자료,  $\mu$ =시계열자료의 평균,  $n$ =시계열자료의 평균,  $k$ =지연시간(lag time)이다. 1부터 시작하

는 자기상관함수값이 0에 이르기까지의 지연시간을 보고 자기상관성을 판단하였다(Jeon *et al.*, 2016; Yun *et al.*, 2018). 자기상관함수가 느리게 감소할수록 강한 자기상관성을 가지며 긴 기억효과를 가지고, 자기상관함수가 빠르게 감소할수록 자기상관성이 약하고 짧은 기억효과를 가진다고 해석하였다(Lee and Lee, 2002a). 교차상관함수는 두 시계열 자료의 상호의존성을 나타내는 시계열 특성함수로 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \gamma_{xy}(k) &= Cov(x_t y_{t+k}) \\ &= \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} [(x_t - \mu_x) - (y_{t+k} - \mu_y)] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\rho_{xy}(k) = \frac{\gamma_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (4)$$

여기서  $\mu_x$ =시계열자료  $x_t$ 의 평균,  $\mu_y$ =시계열자료  $y_t$ 의 평균,  $\sigma_x$ = $x_t$ 의 표준편차이며  $\sigma_y$ = $y_t$ 의 표준편차이다. 교차상관함수가 가장 높아질 때의 지연시간을 이용하여 상호의존성이 높아지는 시간과 반응속도를 정량적으로 계산할 수 있다(Larocau *et al.*, 1998). 본 연구에서는 토양수분에 영향을 미치는 인자는 강수량, 기온, 상대습도로 설정했으며(Ruostenoja *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2020) 가장 큰 교차상관함수값을 보이는 지연시간이 짧을수록 영향을 빠르게 미치며, 함수값이 클수록 그 영향의 정도가 크다고 해석하였다(Lee and Lee, 2002b; Choi *et al.*, 2011).

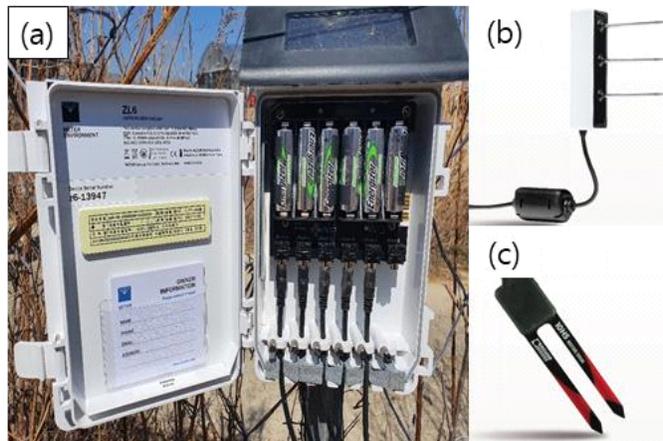


Fig. 4. (a) ZL6 data logger, (b) TEROS11 soil moisture-temperature sensor and (c) 10HS soil moisture sensor.

### 2.2.4 Kruskal-Wallis 검정

EDN1~10과 EDS1~10 지점에서 측정된 토양수분함량 자료에 차이가 있는지 알아보기 위해 통계분석프로그램인 PAST를 이용하여 Kruskal-Wallis 검정을 수행하였다. Kruskal-Wallis 검정은 분산분석(ANOVA)에서 정규성 가정이 만족되지 않을 때 사용하는 비모수 통계검정법으로, 두 개 이상의 독립 샘플을 비교하는 데 사용된다(Gaur and Mohanty, 2013).

고도별 지점을 비교할 때는 다음과 같은 가설( $H_0$ : 서로 다른 고도별 관측 지점들간의 토양수분함량 중앙(median) 차이는 없다,  $H_1$ : 서로 다른 고도별 관측 지점들간의 토양수분함량 중앙에 의미있는 차이가 있다)을 세웠으며 토지이용 별 지점을 비교할 때는 다음과 같은 가설 2( $H_0$ : 서로 다른 토지이용별 관측 지점들간의 토양수분함량 중앙 차이는 없다,  $H_1$ : 서로 다른 토지이용별 관측 지점들간의 토양수분함량 중앙에 의미있는 차이가 있다)을 세워 산출되는 p (통계적 유의수준)값이 0.05 미만이면 가설  $H_0$ 를 기각하는 것으로 해석하였다(Schaufler *et al.*, 2010).

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 토양수분함량 변동 특성

EDN1~10과 EDS1~10 지점에서 측정한 토양수분함량 자료를 고도별(해발고도 420, 440, 460, 480, 500 m), 토지이용별(사과밭, 인삼밭, 무밭, 노지, 감자밭)로 비교 분석하였다. 고도별 비교 결과 평균은 420 m 깊이부터 500 m 깊이까지 0.198, 0.165, 0.163, 0.175, 0.194 ( $m^3/m^3$ )로 큰 차이를 보이지 않았다. 중앙값(median)의 경우 420 m 지점이  $0.209 m^3/m^3$ 로 가장 높았고 440 m 지점이  $0.147 m^3/m^3$ 로 가장 낮은 토양수분함량을 보였다. 고도별 토양수분 함량은 전체적으로 지점 간 큰 차이를 보이지 않았으나,

500 m 지점의 자료 분포가  $0.055 m^3/m^3 \sim 0.355 m^3/m^3$ 로 가장 넓은 범위의 측정값을 보였다(그림 5; 표 1). 그에 반해 토지이용 별 비교결과 감자밭의 토양수분함량은 중앙값  $0.316 m^3/m^3$ , 최대  $0.355 m^3/m^3$ , 최소  $0.231 m^3/m^3$ 로 대부분의 토지이용에 비해 월등히 높은 값을 보였고 무밭의 최솟값이  $0.095 m^3/m^3$ , 최댓값이  $0.334 m^3/m^3$ 로 가장 넓은 범위의 토양수분함량을 보였으나 중앙값은  $0.139 m^3/m^3$ 로 다섯 유형의 토지이용 중 가장 낮았다(그림 6; 표 2).

RTA와 RTG에서 깊이별로 토양수분함량을 관측한 결과 RTA와 RTG 모두 10 cm 깊이의 토양수분함량이 강우 시 즉각적으로 증가하고, 서서히 감소하는 양상을 보였다. RTA는 관측기간동안 40 cm 깊이의 토양수분함량이 계속해서 다른 깊이보다 높았으며, 100 cm 깊이의 토양수분함량은 항상 가장 낮은 값을 보였다. 시간당 3.4 mm의 강수량이 발생

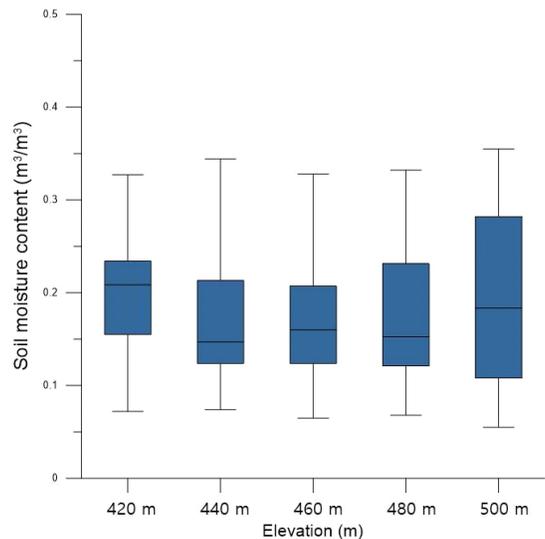


Fig. 5. Soil moisture content variation at specific elevation (420-500 m).

Table 1. Statistical analysis of soil moisture content data by elevation.

Elevation (m)	Mean ( $m^3/m^3$ )	Median ( $m^3/m^3$ )	Maximum ( $m^3/m^3$ )	Minimum ( $m^3/m^3$ )
420	0.198	0.209	0.327	0.072
440	0.165	0.147	0.344	0.074
460	0.163	0.160	0.328	0.065
480	0.175	0.153	0.332	0.068
500	0.194	0.184	0.355	0.055

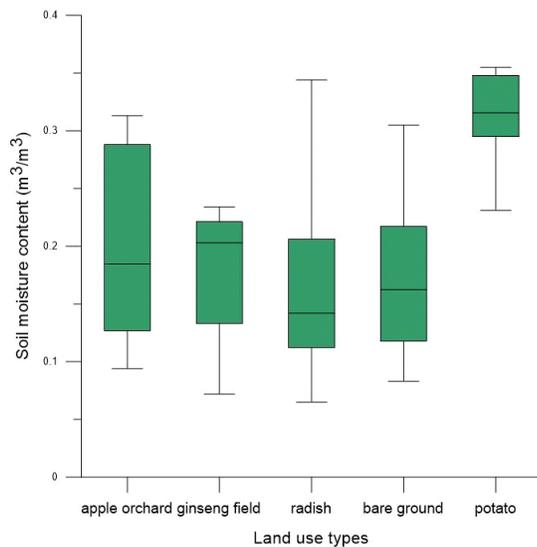
했을 때는 10, 20 cm 깊이의 토양수분함량만 증가하였으나 시간 당 5.5 mm의 강수량이 발생했을 때는 40, 70 cm 깊이의 토양수분함량까지 단계적으로 상승하였다. RTG의 토양수분함량은 RTA보다 강수량에 더 민감하게 반응했다. 10 cm에서 100 cm까지의 모든 깊이에서 측정 기간동안 발생한 모든 강우 이벤트에 대해 상승하였다가 서서히 감소하는 양상을 보였다(그림 7).

### 3.2 토성 및 입도분포 특성

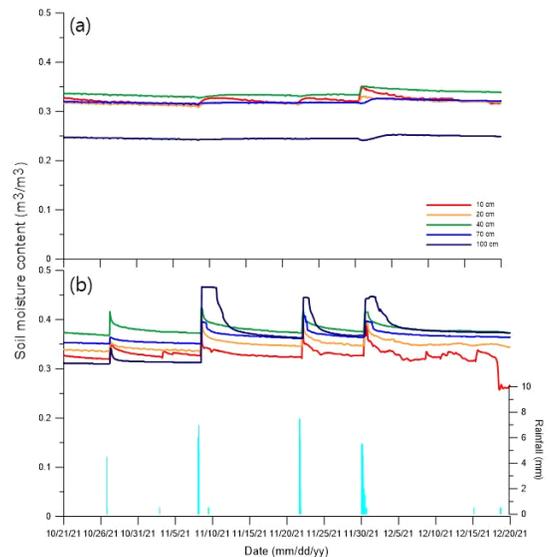
RTA와 RTG의 토양입도분포 분석결과 대부분이 모래로 약 76~88% 범위로 나타났다. 미사는 약 11~19%, 점토는 약 1~4%로 점토함량이 낮았다. USDA의 토성분류법을 따라 분류한 결과 RTA의 10, 100 cm 깊이의 토양은 사토(sand), 20, 40, 70 cm 깊이의 토양은 양질사토(loamy sand)로 분류되었으며, RTG의

10 cm 깊이 토양은 양질사토로 분류되었고 20, 40, 70, 100 cm 깊이의 토양은 사토로 분류되었다(표 3).

3.1에서의 토양 깊이별 토양수분 함량변화를 입도분석결과와 연관지어 해석하자면 점토함량의 차이 및 식생의 뿌리 길이로 이유를 들 수 있다. RTA의 경우 평균 점토함량이 3.22%인데 반해 RTG의 평균 점토함량은 1.39%로 두 지점 간 토양의 점토함량이 두 배 이상 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 다른 이유로는 토지이용인 인삼과 사과와의 뿌리 길이의 차이로 판단된다. 인삼은 보통 5년근 혹은 6년근까지 재배하는데, 6년근 인삼의 뿌리 길이는 약 35 cm 내외인 것에 반해 사과나무의 경우 거래되는 묘목의 뿌리 길이가 약 90 cm에 달한다. 즉 사과나무의 뿌리가 100 cm 아래의 깊이까지 자라며 토양수분을 흡수하기 때문에 RTA의 100 cm 깊이 토양



**Fig. 6.** Soil moisture content variation at different land uses.



**Fig. 7.** Soil moisture contents measured every 60 minutes at depths of 10-100 cm at (a) RTA and (b) RTG from October 21, 2021 to December 20, 2021.

**Table 2.** Statistical analysis of soil moisture content data by land use.

Land use	Mean ( $m^3/m^3$ )	Median ( $m^3/m^3$ )	Maximum ( $m^3/m^3$ )	Minimum ( $m^3/m^3$ )
Apple orchard	0.200	0.185	0.313	0.094
Ginseng field	0.175	0.203	0.234	0.072
Radish	0.158	0.139	0.344	0.095
Bare ground	0.168	0.163	0.305	0.083
Potato	0.311	0.316	0.355	0.231

**Table 3.** Soil particle size distribution and soil texture types.

Site	Depth (cm)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil texture
RTA	10	85.86	11.93	1.84	Sand
	20	76.27	19.45	4.30	Loamy sand
	40	80.35	15.70	3.95	Loamy sand
	70	79.56	16.91	3.53	Loamy sand
	100	85.28	12.23	2.50	Sand
RTG	10	80.94	16.78	2.29	Loamy sand
	20	87.03	11.82	1.14	Sand
	40	85.45	13.17	1.40	Sand
	70	85.85	13.06	1.08	Sand
	100	87.66	11.28	1.04	Sand

**Table 4.** Result of Kruskal-Wallis test for equal medians.

Test for median of each elevation			Test for median of different land uses		
H	HC	<i>p</i>	H	HC	<i>p</i>
5.098	5.098	0.2774	21.01	21.01	0.0003155

수분함량이 다른 깊이에 비해 현저히 낮고, 인삼이 약 30 cm 내외의 깊이에서 토양수분을 흡수하기 때문에 40 cm 깊이가 10, 20 cm 깊이보다 토양수분함량이 높은 것으로 판단하였다(Yu *et al.*, 2019; Guo *et al.*, 2020).

### 3.3 Kruskal-Wallis 검정

EDS1~10과 EDN1~10 사이의 Kruskal-Wallis 검정결과 고도별 토양수분함량의 중앙에 대하여 검정을 수행했을 때의 *p*값은 0.2774로 귀무가설을 기각하지 않아 다섯 고도별 토양수분함량의 중앙은 차이가 없다고 판단되었다. 그에 반해 토지이용별 Kruskal-Wallis 검정을 수행하였을 때 *p*값은 0.000032로 귀무가설을 기각하여 다섯 토지이용별 토양수분함량의 중앙은 유의한 차이가 있다고 해석하였다(표 4).

### 3.4 시계열적 특성

RTA와 RTG의 자기상관분석결과 깊이 10 cm 구간은 토지이용에 관계없이 모두 자기상관함수가 가장 빠르게 0에 도달하여 자기상관성이 낮고, 짧은 기억 효과를 가진다고 해석하였다. RTA의 깊이별 자기상관함수는 깊이 10 cm 구간은 166 지연시간 만에 0에 도달했고, 그 후 40 cm 구간이 332 지연시

간에 0에 도달했다. 그 뒤로 20, 100, 70 cm 구간이 차례대로 0에 도달하였다. RTG의 깊이별 자기상관함수는 깊이 10 cm 구간이 73 지연시간만에 0에 도달하여 RTA보다 93 지연시간 빠르게 도달하였다. 그 뒤로 40, 20, 100, 70 cm구간이 차례대로 0에 도달하여 RTA와 같은 순서로 자기상관함수가 0에 도달하여 두 토지이용 모두 깊이 10, 40, 20, 100, 70 cm 구간 순서대로 기억 효과가 짧은 것으로 해석했다(그림 8).

기온, 강수량, 상대습도를 입력값으로, 토양수분을 출력값으로 설정한 교차상관분석결과 RTA에서 입력값이 기온일 때 628 지연시간에 0.39로 가장 큰 교차상관계수를 보였으며 입력값이 상대습도와 강수량이 입력값일 때 각각 0.38, 0.32의 최대교차상관계수를 보였다(그림 9). 이 경우 모든 입력값에 대해 최대교차상관계수가 0.4를 넘지 않아 상관성이 크게 높다고 보기 어려워 토성 혹은 식생 뿌리의 특성 등과 같은 다른 요인이 기온, 강수량, 상대습도와 같은 입력값보다 RTA의 토양수분함량 변화에 더 큰 영향을 주고 있다고 해석할 수 있다.

이에 반해 RTG의 경우 입력값이 강수량일 때 2 지연시간에 0.48의 최대교차상관계수를 보였고, 입력값이 기온과 상대습도일 때 각각 0.39, 0.38의 최

대교차상관계수를 가져(그림 10) RTG의 토양수분 함량 변화가 다른 요인에 비해 강수량에 큰 영향을 받고 있다고 해석할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 강원도 양구군 해안면에서 토지이

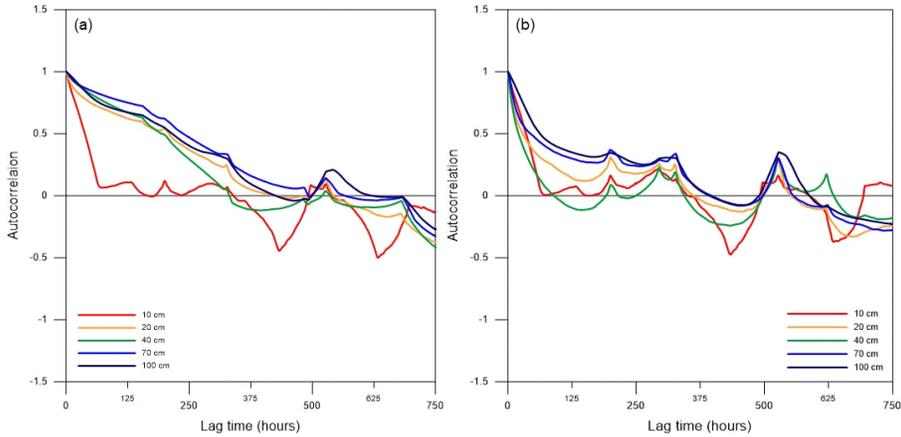


Fig. 8. Autocorrelation analysis of soil moisture content at different depth of (a) apple orchard and (b) ginseng field.

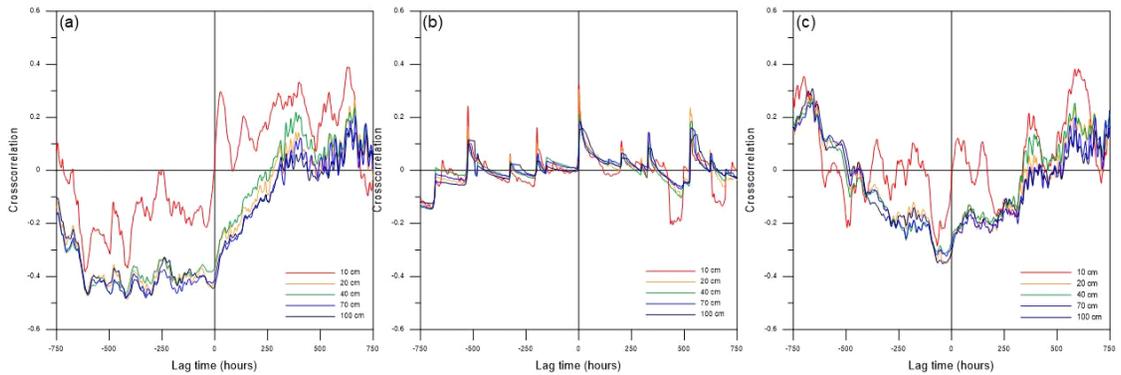


Fig. 9. Crosscorrelation analysis between (a) air temperature, (b) rainfall, (c) relative humidity and soil moisture content at different depth of apple orchard (RTA).

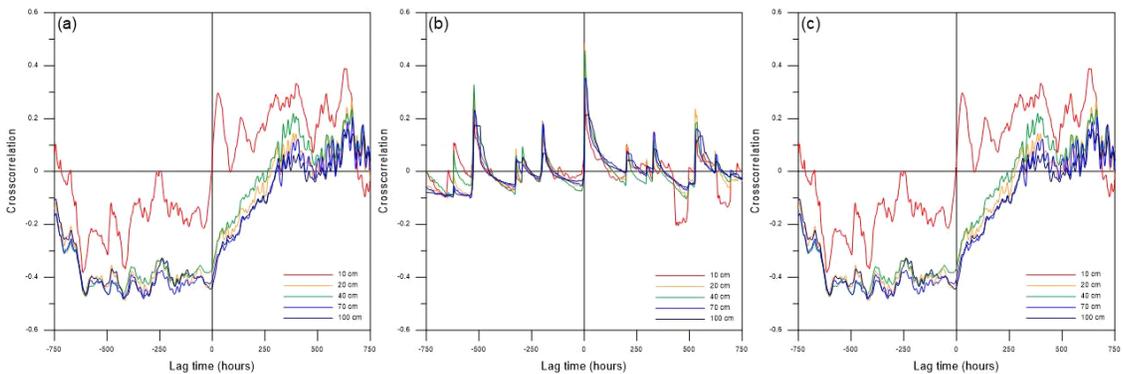


Fig. 10. Crosscorrelation analysis between (a) air temperature, (b) rainfall, (c) relative humidity and soil moisture content at different depth of ginseng field (RTG).

용 및 고도에 따른 토양수분 변화 양상을 관찰하고, 연구지역에서 급속도로 재배면적을 넓혀가고 있는 사과밭과 인삼밭을 대상으로는 그 변동 특성을 더욱 자세히 알기 위해 깊이별로 자동모니터링하여 아래와 같은 결과를 도출하였다.

토양수분함량을 고도별(420, 440, 460, 480, 500 m)로 비교하였을 때는 큰 차이를 보이지 않았고, Kruskal-Wallis 검정결과 또한 다섯 고도별 중앙의 큰 차이가 없다고 해석되었다. 그러나 토지이용 별로 비교하였을 때는 감자밭의 토양수분함량이 다른 토지이용에 비해 월등히 높은 값을 보였고 무밭의 중앙 다섯 유형의 토지이용 중 가장 낮은 중앙을 가졌으며 Kruskal-Wallis 검정결과 다섯 토지이용 별 토양수분함량의 중앙은 유의한 차이가 있다고 해석되었다.

사과밭과 인삼밭을 대상으로 한 자동모니터링 결과 RTA에서는 시간당 3.4 mm의 강수량이 발생했을 때 10, 20 cm 깊이의 토양수분함량만 증가하였으나 시간당 5.5 mm의 강수량이 발생했을 때는 40, 70 cm 깊이의 토양수분함량까지 단계적으로 상승하였다. RTG의 토양수분함량은 RTA보다 강수량에 더 민감하게 반응했다. 10 cm에서 100 cm까지의 모든 깊이에서 측정 기간동안 발생한 모든 강우 이벤트에 대해 상승하였다가 서서히 감소하는 양상을 보였다. 이에대한 이유로는 RTA와 RTG의 토지이용에 따른 토성 및 식생의 뿌리 길이 차이로 볼 수 있다.

RTA와 RTG의 자기상관분석결과 두 토지이용 모두 깊이 10, 40, 20, 100, 70 cm 구간 순으로 기억 효과가 짧은 것으로 해석되었다. 한편 교차상관분석 결과 RTA에서 입력값이 기온일 때 628 지연시간에 0.39로 가장 큰 교차상관계수를 보였으나 이는 상관성이 크게 높다고 보기 어려워 토성 혹은 식생 뿌리의 특성 등과 같은 다른 요인이 기온, 강수량, 상대 습도와 같은 입력값보다 RTA의 토양수분함량 변화에 더 큰 영향을 주고 있다고 해석할 수 있으며 RTG의 경우 입력값이 강수량일 때 2 지연시간에 0.48의 최대교차상관계수를 보여 다른 요인에 비해 강수량에 큰 영향을 받고 있다고 해석할 수 있다.

본 연구에서 시계열분석을 위해 활용된 자료는 2021년 10월부터 12월까지 2개월간의 자료로 토지이용과 토양수분의 관계를 명확히 밝혀내기에는 그

기간이 한정적이기 때문에 추후 더 긴 기간을 계획하여 추가적인 연구가 필요하다. 그러나 본 연구를 통해 제공된 자료는 강우 시 불포화대를 통해 지하수로 함양되는 수문학적 과정을 연구할 때 유의미하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2021R1F1A1064027). 논문을 심사해주신 익명의 심사위원님들께 감사의 말씀을 드립니다. 장비설치를 위한 야외조사를 도와주신 로저스 박사님과 박상욱 학우께 감사를 전합니다. 이 논문은 제1저자의 석사학위 논문의 일부로 사용될 것임을 밝힙니다.

## REFERENCES

- 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., Jeon, W.H. and Lee, J.Y., 2018, Estimation of deep percolation using field moisture observations and HYDRUS-1D modeling in Haean basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 54, 545-556 (in Korean with English abstract).
- 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, 109-123 (in Korean with English abstract).
- Batalha, M.S., Barbosa, M.C., Faybishenko, B. and Van Genuchten, M.T., 2018, Effect of temporal averaging of meteorological data on predictions of groundwater recharge. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66, 143-152.
- 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).
- Chia, R.W., Lee, J.Y., Jang, J. and Lee, S., 2022, Effects of land use change on soil moisture content at different soil depths. *Journal of the Geological Society of Korea*, 58, 117-135.
- 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.M., Lee, J.Y., Ha, K.C. and Kim, G.P., 2011, The study on time series analysis of groundwater data and groundwater recharge in Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 21, 337-348 (in Korean with English abstract).
- Fang, X., Zhao, W., Wang, L., Feng, Q., Ding, J., Liu, Y. and Zhang, X., 2016, Variations of deep soil moisture under different vegetation types and influencing factors in a watershed of the Loess Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 3309-3323.
- Fu, B., Wang, J., Chen, L. and Qiu, Y., 2003, The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China. *Catena*, 54, 197-213.
- Gaur, N. and Mohanty, B.P., 2013, Evolution of physical controls for soil moisture in humid and subhumid watersheds. *Water Resources Research*, 49, 1244-1258.
- Goderniaux, P., Brouyère, S., Fowler, H.J., Blenkinsop, S., Therrien, R., Orban, P. and Dassargues, A., 2009, Large scale surface-subsurface hydrological model to assess climate change impacts on groundwater reserves. *Journal of Hydrology*, 373, 122-138.
- Guo, X., Fu, Q., Hang, Y., Lu, H., Gao, F. and Si, J., 2020, Spatial variability of soil moisture in relation to land use types and topographic features on hillslopes in the black soil (Mollisols) area of northeast China. *Sustainability*, 12, 3552.
- 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., 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, 105-114 (in Korean with English abstract).
- Jeon, W.H., Lee, J.Y., Lim, H.S. and Yoon, H.I., 2016, Comparison of thermal characteristics of soil in austral summer and winter at King Sejong Station, Kin George Island, Antarctica. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 901-915 (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., Kim, C.S. and Lee, J.Y., 2020, Comparison of potential groundwater recharge in the rainy season of 2017 and 2018 by modeling with soil moisture in the Haeam Basin, Yanggu. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 63-76 (in Korean with English abstract).
- Larocque, M., Mangin, A., Razack, M. and Banton, O., 1998, Contribution of correlation and spectral analysis to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). *Journal of Hydrology*, 205, 217-231.
- Lee, J.Y., 2009, Importance of hydrogeological and hydrologic studies for Haeam basin in Yanggu. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 405-414 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y. and Lee, K.K., 2002a, A comparative study on characteristics of waterlevel response to rainfall in the two aquifer systems. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 7, 3-14 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y. and Lee, K.K., 2002b, Use of hydrologic time-series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 229, 190-201.
- Lee, J.Y., Raza, M. and Kwon, K.D., 2019, Land use and land cover changes in the Haeam Basin of Korea: Impacts on soil erosion. *Episodes*, 42, 17-32.
- 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, 951-961.
- Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs (MAFRA), 2021, <https://data.mafra.go.kr/main.do> (February 6, 2021).
- Ruosteenoja, K., Markkanen, T., Venalainen, A., Raisanen, P. and Peltola, H., 2018, Seasonal soil moisture and drought occurrence in Europe in CMIP5 projections for the 21st century. *Climate Dynamics*, 50, 1177-1192.
- Rural Development Administration (RDA), 2022, <http://soil.rda.go.kr/soil/chart/chart.jsp> (May 15, 2022).
- Schaufler, G., Kitzler, B., Schindlbacher, A., Skiba, U., Sutton, M.A. and Zechmeister-Boltenstern, S., 2010, Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: effects of soil moisture and temperature. *European Journal of Soil Science*, 61, 683-696.
- 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.G., Lee, M.W., Jin, M.S. and Han, S.B., 2006, Haeam basin, Yanggu. Detailed investigation report of geological and mineralogy cultural properties, 50-83 (in Korean).
- Won, J.K., Lee, M.W. and Woo, J.K., 1987, Geologic and geographic characteristics of Haeam 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).
- Yoo, D.S., Kim, K.S., Jang, W.S., Jun, M.S., Yang, J.E., Kim, S.C., Ahn, J.H. and Lim, K.J., 2008, Evaluation of sediment yield using area-weighted measured slope and slope length at HeaAn myeon watershed. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 24, 569-580 (in Korean with English abstract).
- Yu, B., Liu, G., Liu, Q., Huang, C., Li, H. and Zhao, Z., 2019, Seasonal variation of deep soil moisture under different land uses on the semi-arid Loess Plateau of China. *Journal of Soils and Sediments*, 19, 1179-1189.
- Yun, S.W., Shin, G.S. and Lee, J.Y., 2018, Evaluation on hydrogeologic characteristics of the paddy fields in the Hae-an basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 54, 399-413 (in Korean with English abstract).
- 

Received : May 3, 2022

Revised : May 23, 2022

Accepted : May 24, 2022