



Article

강원특별자치도 농촌지역에서 토지이용별 토양수분의 시계열 특성 비교

이민욱, 이진용*

강원대학교 지질학과

Comparing time-series characteristics of soil moisture with different land-use in rural areas of Gangwon State

Minwook Lee, Jin-Yong Lee*

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

Received: January 9, 2024 / Revised: February 6, 2024 / Accepted: February 13, 2024

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

요약: 최근 기후변화로 인한 가뭄 발생의 증가로 효율적인 수자원 관리가 중요해지고 있다. 본 연구에서는 지하수 함양과 중요한 관련이 있는 토지이용에 따른 토양수분의 변동 특성과 시계열 특성을 파악하였다. 이를 위해, 다양한 작물이 재배되고 있는 농촌지역에서 토양수분 함량을 측정하여 시계열 분석을 수행하였다. 시계열 분석으로 자기상관분석, 스펙트럼 밀도분석, 그리고 교차상관분석을 수행하였으며, 교차상관분석에서 입력자료로 강수량 및 기온 자료를 사용하였다. 토양수분은 강수 현상 직후 일시적으로 증가하였다가 서서히 감소하는 양상을 보였다. 자기상관분석 및 시계열 분석 결과, 월별로 자기상관성이 변화하는 패턴이 비슷하게 나타났으며, 토지이용 및 깊이에 따라 변동폭이 다르게 나타났다. 교차상관분석 결과, 강수량은 토양수분에 빠르게 양의 영향을 미치며 기온은 상대적으로 느린 속도로 음의 영향을 미치는 것으로 나타났다.

주요어: 토양수분, 토지이용, 시계열 분석, 지하수, 농촌지역

ABSTRACT: Efficient water resource management has gained increasing significance in light of the rising frequency of droughts attributed to climate change. This study focuses on unraveling the variation and time series characteristics of soil moisture in relation to land use, a crucial factor influencing groundwater recharge. Soil moisture content measurements were conducted in rural areas with diverse crop cultivation, and subsequent time series analyses were performed. Auto-correlation analysis, spectral density analysis, and cross-correlation analysis were employed, utilizing precipitation and temperature data as inputs. The findings revealed a short-term increase in soil moisture content immediately following precipitation, followed by a gradual decline. Monthly auto-correlation patterns exhibited similarity, with amounts of variation contingent upon land use and depth. Cross-correlation analysis showed a swift positive impact of precipitation on soil moisture content, while temperature exerted a relatively slow negative effect. This study contributes valuable insights into understanding the dynamics of soil moisture in agricultural landscapes, aiding in the development of effective water resource management strategies.

Key words: soil moisture, land-use, time-series analysis, groundwater, rural area

1. 서론

토양수분이란 불포화대 토양의 공극 내 존재하는 물을 의미한다. 토양수분의 흡착력에 따라 토양 입자와 결합되어 있는 결합수, 대기로부터 토양 내로 흡수된 흡습수, 흡습수 외부에 표면장력과 중력이 평형을 유지하며 존재하는 모세관수, 중력에 의하여 토양 입자와 분리되어 공극 내를 자유롭게 이동하는 중력수로 구분할 수 있다(Kim *et al.*, 2013; Ha *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2022a). 토양의 입도분포 특성, 토지이용 및 토지피복, 기후 및 기상조건 등 다양한 요인이 토양수분 변동 특성에 영향을 미칠 수 있다(Fu *et al.*, 2003; Hong *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2013; Lozano-Parra *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2022b).

토양수분은 토양의 균열, 수축, 팽윤 등과 같은 기계적 특성에 영향을 미치며, 이에 따라 토양 공학, 지질학, 농업학, 생태학, 수문학 등 다양한 분야에 중요한 요인으로서 작용한다(SU *et al.*, 2014). 또한, 토양수분은 식물 생장에 직접 이용될 수 있어 토양수분 조건의 변화는 식물 생장에 상당한 영향을 미칠 수 있다(Kwon *et al.*, 2015; Gil *et al.*, 2020).

지하수는 강수 또는 지표수가 지표 아래로 침투하여 토양 내에 포화되어 있는 물을 의미하며, 농업을 포함하여 다양한 분야에서 사용되는 중요한 수자원이다(Mileham *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2011; Baek *et al.*, 2017). 토양수분은 지구의 수문순환 중 지하수 함양의 중간 과정으로서 지하수 함양량을 추정하기 위한 인자로 사용되고 있다(Mathias *et al.*, 2017). Kim *et al.* (2018)은 농촌지역에서 토양의 깊이

별(30, 60, 90 cm) 토양수분 함량을 측정하였고 잠재적인 지하수 함양량 추정을 위해 불포화대 수치 모델링 인자로 활용하였다.

Berg and Sheffield (2018)은 문헌 연구를 통해 지구온난화와 토양수분의 관계를 분석하였으며, 지구온난화가 토양 내 수분을 급격하게 감소시킬 것이라고 주장하였다. Erler *et al.* (2019)은 고해상도 기후 모델링을 통해 건조한 조건에서는 지하수위 및 지하수 함양량이 감소하고 습한 조건에서는 증가할 것으로 예측하였으며, 토양수분도 유사한 경향으로 변할 것으로 제시하였다. Soulsby *et al.* (2021)은 스코틀랜드 고원에서 가뭄이 발생하였을 때 이때 강수량의 급격한 감소가 토양수분 및 지하수위를 10년간 최저수준으로 감소시켰으며, 기후변화로 인해 이러한 현상의 빈도가 증가할 수 있음을 주장하였다.

본 연구에서는 다양한 농작물이 재배되고 있는 강원도 농촌지역에서 토지이용에 따른 토양수분 함량을 측정하였고 기상 현상에 따른 토양수분의 시계열 특성을 평가하였다.

2. 연구지역 및 방법

2.1. 연구지역

연구지역은 강원특별자치도 양구군 해안면 일대에 위치한다(그림 1). 해안면은 분지 지형으로 해발고도가 상대적으로 낮고(410 m) 평탄하며, 그 주변을 대암산(1,304 m), 도솔산(1,147 m), 대우산(1,056 m) 등 해발고도가 높은 산으로 둘러싸고 있는 형태이다(Yun *et al.*, 2009; Lee *et al.*,



Fig. 1. (a) Location of the study area in Korea, (b) the studied Hae-an-myeon, Gangwon State, (c) real-time monitoring systems for soil moisture contents and soil temperature in areas with different land-uses in the study basin.

2022a; Cha *et al.*, 2023). 이러한 특성으로 많은 소하천들이 발달하였으며, 높은 산간 지역에서부터 중심지로 모여 소양호로 흘러간다(Lee, 2009; Raza *et al.*, 2019).

연구지역은 해발고도가 낮은 지역을 중심으로 지하수 관개 방식을 이용하여 다양한 농업 활동이 이뤄지고 있는 농촌지역이다(Raza and Lee, 2022). 해안면의 주요 토지 이용 현황은 임지(forest) 약 2,332만 m² (37.6%), 초지(grass) 약 1,897만 m² (30.7%), 논(rice paddy) 약 741만 m² (12.0%), 과수 및 상전(orchard and mulberry field) 약 700만 m² (11.3%), 밭(field) 약 457만 m² (7.4%), 기타 약 56만 m² (0.9%)로 이루어져 있다(RDA, 2024). 경사가 가파라지며 해발고도가 높은 지역에서는 감자, 무, 배추 등 고랭지 농업이 주로 발달하였으며, 특용작물(인삼, 더덕, 산채류 등)의 재배가 증가하는 추세이다(Choi *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2019).

연구지역 내 토성 분포 면적 자료에 따르면(RDA, 2024), 표토(0~20 cm) 토성은 68.5%의 사양토(sandy loam), 31.2%의 양토(loam), 0.1% 이하의 미사질식양토(silty clay loam)로 구성되어 있으며, 심토(20~100 cm) 토성은 86.0%의 사양질(coarse loamy), 13.5%의 식양질(silty), 0.1% 이하의 사질(sandy)로 구성되어 있다. 표토와 심토에서 모두 점토의 함량은 매우 낮게 나타나며, 표토에서는 모래의 함량이 가장 우세하게 나타나고, 심토에서는 미사의 함량이 가장 우세하게 나타난다.

2.2. 연구방법

2.2.1. 토양수분 및 기상자료수집

서로 다른 작물이 심어진 감자밭(PSM), 대파밭(SOSM), 콩밭(BSM)을 선정하여, 깊이별(10, 20, 40, 70, 100 cm)로

토양수분 센서(TEROS11, Meter Group, USA)를 설치하였다(그림 2). 토양수분 센서는 FDR (Frequency Domain Reflectometry) 방식이며, 데이터를 저장할 수 있는 메인 컨트롤러(ZL6, Meter Group, USA)와 연결되어 현장에서 측정된 자료를 실시간으로 확인할 수 있다. 모니터링 기간은 2022년 9월 1일부터 2023년 8월 22일까지 1시간 간격이다. 모니터링 중 기기의 센서 오류 및 기기의 결함 등으로 발생한 결측 기간은 분석에서 제외하였으며 장기간 연속된 토양수분 모니터링 자료를 이용하였다.

또한, 연구지역의 강수량 및 기온은 해안면에 설치된 자동기상관측장비(Automated Weather Station, AWS)를 이용하였다.

2.2.2. 시계열 분석

시계열 분석은 시간 및 주파수 영역에서 자료의 시계열 특성을 정량적으로 평가할 수 있다(Nash *et al.*, 1991; Larocque *et al.*, 1998). 본 연구에서는 토양수분의 시계열 특성을 파악 및 해석하기 위해 토양수분 시계열 자료를 이용하여 자기상관분석(auto-correlation analysis), 스펙트럼 밀도분석(spectral density analysis), 교차상관분석(cross-correlation analysis)을 수행하였다.

자기상관분석은 시계열 자료의 선형성과 기억효과를 파악하는 방법 중 하나로, 연속적으로 측정된 시계열 자료의 자기상관함수(auto-correlation function)를 계산한다(Larocque *et al.*, 1998). 자기상관함수는 시간이 지남에 따라 1에서 시작하여 0으로 수렴하는데, 이때 0에 도달하는데 걸리는 시간을 지연시간이라고 한다. 장주기는 자기상관성과 기억효과가 강하여 지연시간이 길게 나타나고 단주기는 지연시

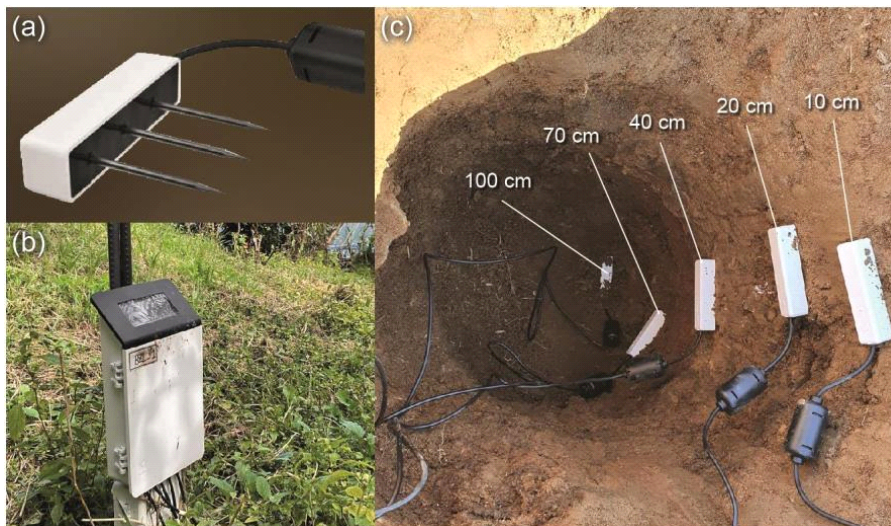


Fig. 2. Equipment (METER Group, Inc., Pullman, USA) used for real-time measurements in this study. (a) TEROS11 soil moisture sensor, (b) ZL6 data logger, (c) soil moisture sensors installed at various depths in the field.

간이 짧게 나타난다(Lee and Lee, 2002). 스펙트럼 밀도분석은 시계열 자료의 주파수 특성을 파악하는 방법이다. 푸리에 변환(Fourier transformation)을 이용하여 시계열 자료를 시간 영역에서 주파수 영역으로 변환하고, 스펙트럼 밀도함수(spectral density function)를 계산하여 자료의 주기성을 분석한다.

$$\gamma_k = \frac{C(k)}{C(0)} \quad (1)$$

$$C(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} [(x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})] \quad (2)$$

$$S(f) = 2[1 + 2 \sum_{k=1}^m w(k)r_k \cos(2\pi fk)] \quad (3)$$

여기서 γ_k 는 자기상관함수, $C(k)$ 는 자기공분산함수, \bar{x} 는 시계열 자료의 평균, n 은 시계열 자료의 길이, k 는 지연시간으로 0에서 m 의 범위를 가지며, m 은 절삭점(cutting point), $S(f)$ 는 스펙트럼 밀도함수를 의미한다(Larocque *et al.*, 1998).

본 연구에서 자기상관분석은 토양수분 자기상관성의 계절적 패턴을 감지하고 특정 월의 독특한 변동을 확인하기 위하여 전체 기간이 아닌 월별로 기간을 분할하여 수행되었다. 스펙트럼 밀도분석은 전체 기간에 대한 뚜렷한 주기성과 빈도 성분을 파악하여 종합적인 데이터 특성을 평가하고자 전체 기간에 대하여 수행되었다.

교차상관분석은 입력(input) 자료의 변화가 출력(output) 자료에 어떠한 영향을 미치는지 파악하기 위해 입력 시계열 자료와 출력 시계열 자료 간의 상관관계를 측정하는 통계적인 방법이다. 이때 입력 자료와 출력 자료 간의 상관정도를 교차상관함수(cross-correlation function)로 나타낸다. 최대 교차상관함수 값에 도달하는데 소요되는 시간을 지연시간(time delay)라고 하며, 입력 자료가 출력 자료에 미치는 영향이 최대일 때의 시간을 의미한다. 입력 자료가 출력 자료에 미치는 영향이 빠르고 강한 경우, 최대 교차상관함수가 크고 지연시간이 짧게 나타나며, 반대로 영향이 느리고 약한 경우에는 최대 교차상관함수가 작고 지연시간이 길게 나타난다(Choi *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2022b).

본 연구에서는 기후변화를 직관적으로 체감할 수 있는 요인인 강수량 및 기온이 토양수분에 미치는 영향을 파악하기 위해 입력 자료를 강수량 및 기온, 출력 자료를 토양수분 함량으로 설정하였다.

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

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} [(x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y})] \quad (5)$$

여기서 $\gamma_{xy}(k)$ 는 $k > 0$ 일 때의 교차상관함수, $C_{xy}(k)$ 는 교차공분산함수, x_t 와 y_t 는 시계열 자료, σ_x 와 σ_y 는 x_t 와 y_t 의 표준편차, n 은 시계열 자료의 길이, \bar{x} 와 \bar{y} 는 x_t 와 y_t 의 평균을 의미한다(Larocque *et al.*, 1998).

3. 결과 및 토의

3.1. 토양수분 모니터링

모니터링 기간 동안 강수량 및 토양수분 시계열 자료를 그래프로 도시하였다(그림 3). 강수는 6월 중순부터 9월 초

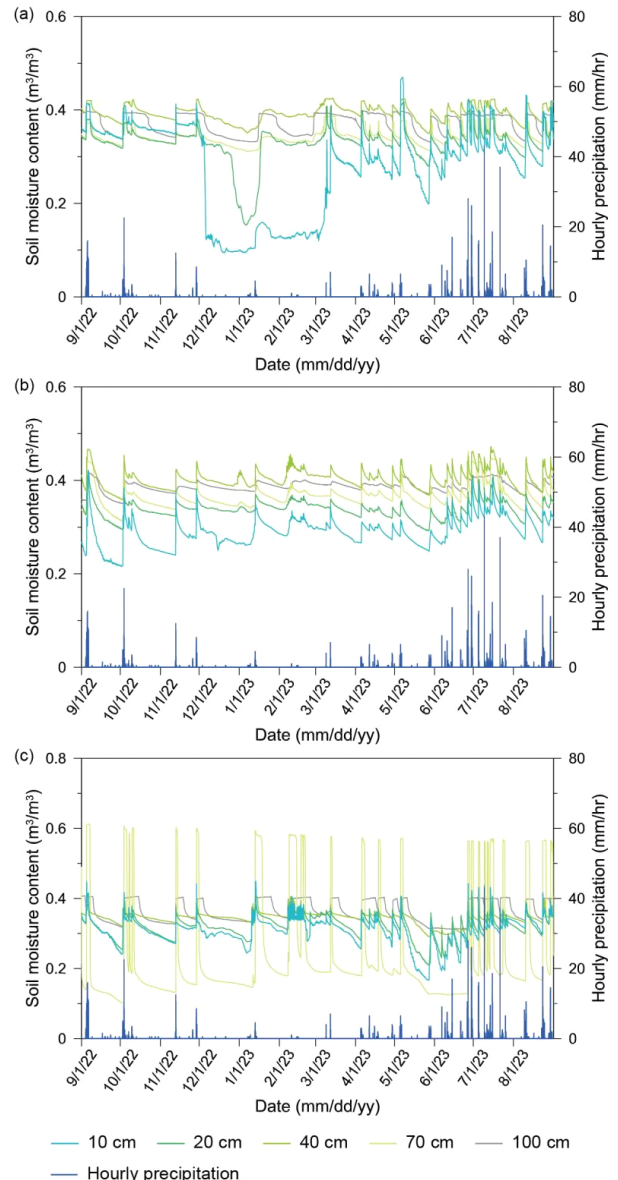


Fig. 3. Hourly precipitation in the study area observed by AWS and soil moisture content measured every hour at different depths in the areas of different land-use. (a) PSM, (b) SOSM, (c) BSM.

Table 1. Lag time based on the results of auto-correlation analysis with time-series soil moisture data at various depths and months with different land-use.

Land-use	Depth (cm)	Lag time (hours)											
		2022				2023							
		Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.
PSM	10	N	57	N	N	194	201	208	79	212	N	64	163
	20	N	207	N	N	310	92	132	72	227	N	73	166
	40	N	184	N	N	301	88	174	74	242	N	274	138
	70	N	185	N	N	291	80	155	65	218	308	155	85
	100	N	178	291	N	271	136	N	94	248	137	149	114
SOSM	10	275	201	262	326	164	130	216	91	233	222	77	75
	20	N	133	213	N	117	115	316	97	217	209	120	92
	40	307	183	211	316	97	102	226	63	195	141	148	146
	70	187	64	169	N	142	110	186	69	221	140	240	150
	100	183	69	N	N	192	201	170	94	258	103	205	155
BSM	10	N	183	N	108	129	103	N	89	215	138	64	163
	20	N	190	N	N	159	129	N	89	247	N	73	166
	40	N	49	N	N	108	84	246	76	N	N	274	138
	70	64	179	47	N	116	84	68	48	N	288	155	85
	100	N	199	123	N	199	144	138	101	N	119	149	144

N: null, meaning that the auto-correlation did not reach 0 during the period.

까지 집중되었으며, 시간당 최대 강수량은 2023년 7월 9일 11시에 약 43 mm/hr를 기록하였다. 강수시 토양수분은 모든 토지이용 및 깊이에서 일시적으로 급격히 증가하다가 점진적으로 감소하는 경향이 반복되었다. PSM의 경우, 깊이가 얕을수록 강수에 의한 토양수분 변화가 가장 민감하였으며, 70, 100 cm 깊이 구간에서는 토양수분이 작은 강도의 강수에 반응하지 않는 것으로 나타났다. SOSM의 경우에도, 깊이가 얕을수록 강수에 의한 토양수분 변화가 민감하게 나타났으며, PSM과 BSM에 비해 상대적으로 모든 깊이에서 토양수분의 변화 양상이 동일하게 나타났다. BSM의 경우에도, 표토 구간에서 토양수분의 변화가 가장 민감하였다. PSM과 달리, 40 cm 구간에서도 작은 강도의 강수에 반응하지 않는 것으로 나타났다. 70 cm 깊이 구간의 토양수분 함량은 특징적으로 강수 후에 약 60%까지 급격히 증가하였다.

반복적인 강수에 의해 토양수분이 증가 및 감소하는 BSM 및 SOSM과 달리 PSM의 10, 20 cm 깊이의 토양수분은 특정 기간 동안 일반적인 수치에서 벗어나 낮은 수치를 유지하는 것으로 나타났다. 10 cm 깊이는 2022년 12월 4일부터 2023년 3월 12일까지, 20 cm 깊이는 2022년 12월 26일부터 2023년 1월 18일까지의 기간 동안 각각 17.3, 14.4% 만큼 급격히 감소 후 각각 99일, 24일간 유지되었다. AWS의 기온 자료에 의하면, 2022년 11월 29일 00시 13.2°C에서 2022년 12월 1일 07시 -12.7°C로 약 25.9°C 하강한 것으로 나타났다. PSM의 10, 20 cm 깊이의 토양수분이 동절

기에 급격히 감소한 것은 물의 어는점 이하로 급강하한 기온에 의하여 토양 내 수분이 얼어 낮게 측정된 것으로 판단된다(Tian *et al.*, 2013). 10 cm 깊이의 토양수분이 20 cm 깊이에서보다 일찍 하강하였다가 늦게 회복되었는데, 이는 토양수분 깊이가 깊어질수록 기온 변화에 대한 토양수분의 변화 반응이 느리기 때문에 토양수분이 얼거나 녹는 시점이 다르게 나타난 것으로 사료된다.

전체 모니터링 기간 동안 토양수분의 변동(최대값-최소값)은 토지이용 및 깊이에 따라 다르게 나타났다(PSM 37.1, 26.3, 7.5, 7.5, 6.8%; SOSM 20.7, 12.0, 11.3, 14.9, 6.5%; BSM 28.3, 18.2, 11.7, 51.1, 9.5%). 깊이를 고려하지 않은 PSM, SOSM, BSM의 평균 토양수분 함량 변동폭은 각각 17.0, 13.1, 23.8%로 나타났으며, BSM, PSM, SOSM 순으로 변동폭이 크게 나타났다. 세 모니터링 지점 모두 지표를 덮고 있는 농업용 구조물이나 강수가 지표로 떨어지는 것을 막을 수 있는 큰 육상 식물이 없기 때문에, 토양수분의 변동성의 차이는 토양의 입도분포와 토양 구조의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

3.2. 시계열적 특성

3.2.1. 자기상관분석 및 스펙트럼 밀도분석

토지이용 및 깊이별 토양수분 모니터링 자료를 이용하여 자기상관분석 및 스펙트럼 밀도분석을 수행하였다. 세 토지이용의 깊이별 지연시간(lag time)은 월별로 증가 또는 감소하는 변화 양상이 유사하게 나타났다. 세 토지이용의

모든 깊이에서의 지연시간은 전체적으로 보았을 때, 2022년 9월부터 12월까지, 그리고 2023년 5월부터 6월까지 상대적으로 길어 기억효과가 강한 것으로 나타났다(표 1). 2023년 1월부터 4월까지, 그리고 2023년 7월부터 8월까지 상대적으로 낮아 기억효과가 약한 것으로 나타났다.

PSM에서 깊이에 따라 자기상관성이 변화하는 시기와 지연시간이 증가 또는 감소하는 정도가 상이하게 나타났다(그림 4). 10, 20 cm 깊이 구간에서는 7월에 감소후 8월에 다시 증가하였는데, 40, 70, 100 cm 깊이 구간에서는 7월부터 8월까지 점차적으로 감소하였다. 10 cm 깊이의 지연시간이 2023년 2, 3월에 깊은 구간에서보다 길게 나타났는데, 이는 겨울에 급격히 하강한 기온으로 인해 표토 내의 토

양수분이 얼어 상대적으로 변화가 적었기 때문으로 판단된다. 여름철 얇은 깊이에서 지연시간이 짧은 경향이 있는데, 이는 짧은 주기의 강수로 인하여 토양수분이 빠르게 회복되기 때문으로 판단된다. 강수로 인해 토양수분이 증가하였다가 감소하면서 자기상관성도 감소하는데, 다시 강수로 인하여 표토에 수분이 더 빠르게 공급되면서 자기상관성이 증가하기 때문이다.

SOSM의 경우, 3, 5, 9, 11, 12월에 자기상관성이 증가하였으며, 4, 6, 7, 8, 10월에는 자기상관성이 감소하는 경향을 보인다(그림 5). 4월에는 모든 깊이 구간에서 공통적으로 자기상관성이 감소하였으며, 6, 7, 8월에는 깊이별로 감소하는 시기가 상이하게 나타났다. 10, 20 cm 깊이 구간은

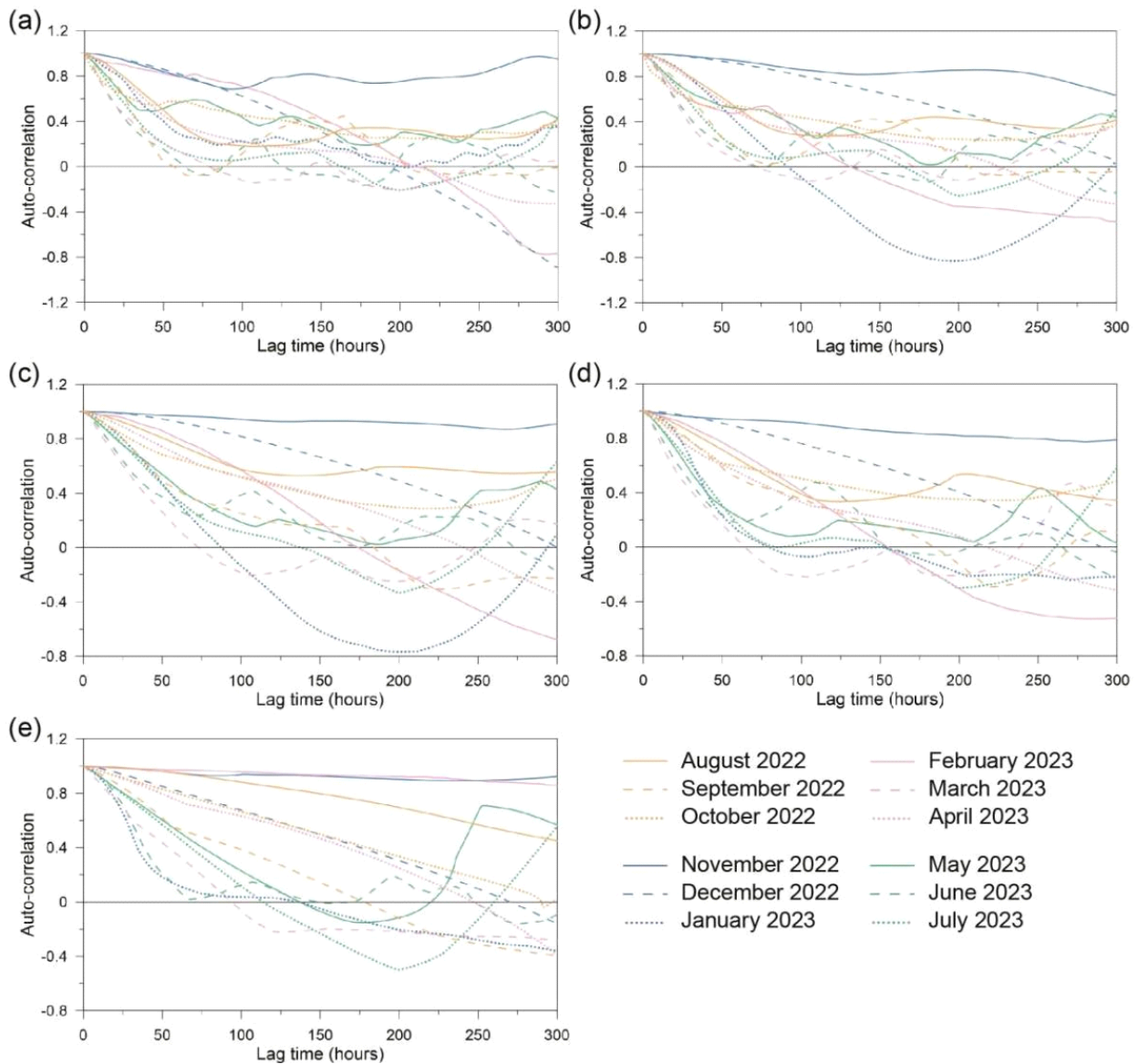


Fig. 4. Results of auto-correlation analysis with time-series soil moisture data at various depths and months in PSM. (a) 10 cm, (b) 20 cm, (c) 40 cm, (d) 70 cm, (e) 100 cm.

자기상관성이 감소하는 시기가 7, 8월로, 6월에 감소하는 40, 70, 100 cm 깊이 구간보다 상대적으로 늦는 것을 확인하였다.

BSM에서도 PSM, SOSM과 비슷한 경향으로 자기상관성이 증가 또는 감소하는 것으로 나타났다(그림 6). 일부 깊이가 구간에서 지연시간의 변화 양상이 상이하게 나타났는데, 70, 100 cm 깊이 구간에서 9, 11월에 자기상관성이 감소하였다. 70 cm 깊이 구간의 경우 다른 깊이 구간보다 상대적으로 지연시간의 증가 및 감소하는 크기가 큰 경향을 보였으며, 다른 깊이 구간과 달리 3월에 지연시간이 증가하지 않았다.

토지이용 및 깊이별 토양수분 시계열 자료의 가장 우세

한 주기를 파악하기 위해 스펙트럼 밀도분석 후 스펙트럼 밀도가 가장 높은 주기를 계산하였다(그림 7; 표 2). 스펙트럼 밀도분석의 결과, 토양수분의 변동 주기는 토지이용별로 각각 PSM은 1,178-4,271시간, SOSM은 3,417-4,271시간, BSM은 4,271-4,881시간으로 PSM의 주기가 가장 짧고, BSM의 주기가 가장 긴 것으로 나타났다.

3.2.2. 토양수분과 기온의 교차상관분석

토양수분과 강수량 및 기온의 상관관계를 파악하기 위하여 강수량 및 기온을 입력 자료, 토양수분 함량을 출력 자료로 설정하여 교차상관분석을 수행하였다(그림 8; 표 3).

먼저 PSM의 토양수분과 기온의 교차상관분석 결과, 지

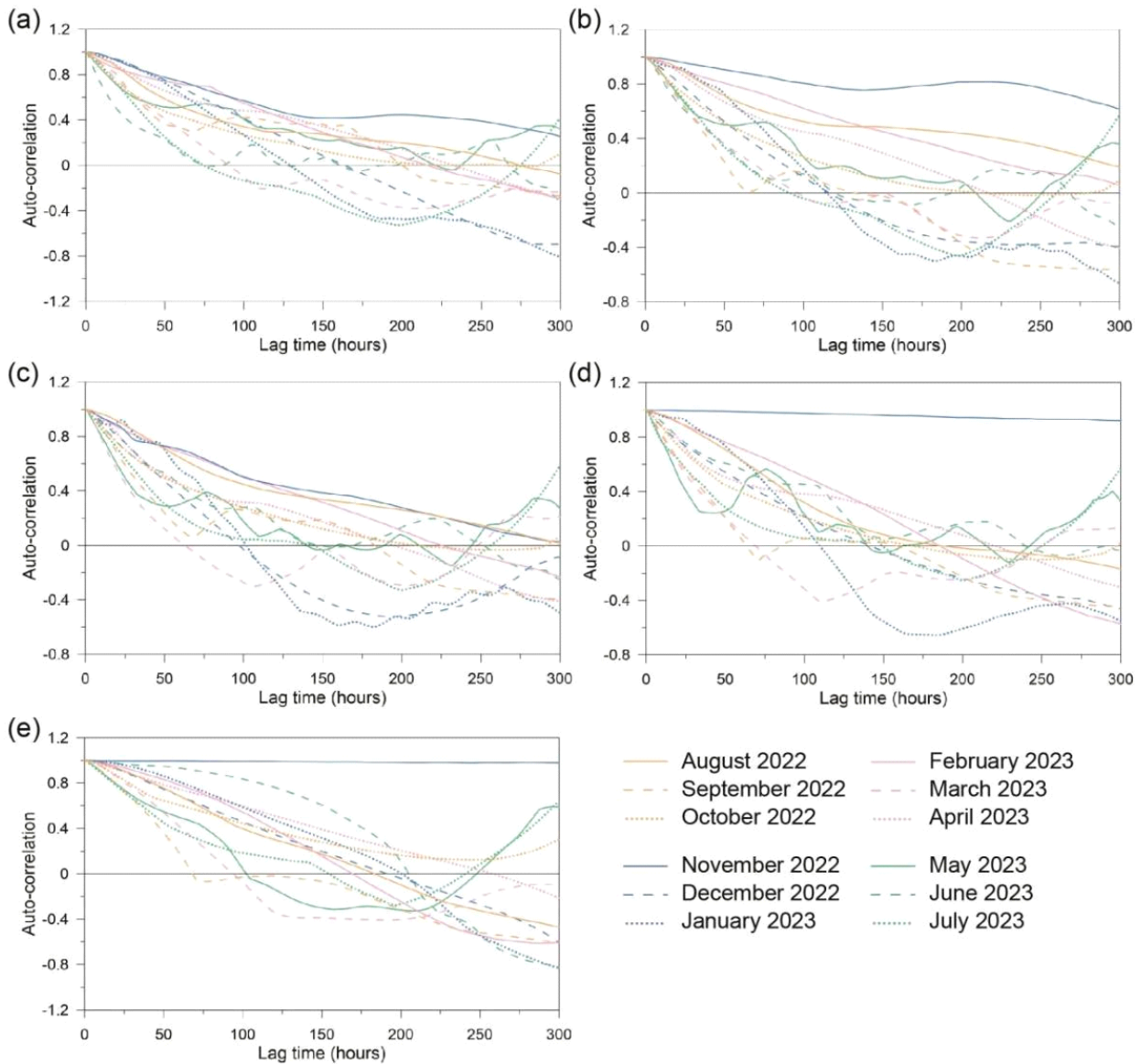


Fig. 5. Results of auto-correlation analysis with time-series soil moisture data at various depths and months in SOSM. (a) 10 cm, (b) 20 cm, (c) 40 cm, (d) 70 cm, (e) 100 cm.

연시간은 깊이가 깊어짐에 따라 감소하다가 100 cm 깊이에서 다시 증가하는 경향을 보였다. 최대 교차상관함수는 음의 값을 가지며, 10 cm 깊이에서 -0.60으로 가장 큰 값을 가지고, 깊이가 깊어지면서 -0.30에서 -0.37의 범위에서 반복적으로 증가 또는 감소하였다.

SOSM의 경우, 지연시간이 깊이가 깊어짐에 따라 나타나는 일정한 경향성은 없었으며, 20 cm 깊이에서 크게 감소하고 70 cm 깊이에서 증가하였다. 최대 교차상관함수도 일정한 경향성은 나타나지 않았으며, 10 cm 깊이에서 -0.02로 가장 작았으며, 70 cm 깊이에서 -0.06으로 감소 후 100 cm 깊이에서 -0.13으로 증가하였다.

BSM의 경우, 지연시간은 70 cm 깊이를 제외하면 상대

적으로 일정하게 나타났으며, 70 cm 깊이에서 크게 감소하는 경향을 보였다. 최대 교차상관함수의 경우, SOSM과 동일하게 10 cm 깊이에서 -0.14로 가장 작았으며, 70 cm 깊이에서 -0.17로 감소 후 100 cm 깊이에서 -0.22로 증가하는 경향을 보였다.

세 가지 토지이용을 비교하였을 때, 지연시간은 BSM이 492시간에서 1,247시간으로 가장 짧았으며, PSM에서 지연시간이 2,418시간에서 3,752시간으로 가장 긴 것으로 나타났다. 최대 교차상관함수의 경우, PSM에서 -0.30에서 -0.60으로 가장 큰 것으로 나타났고, SOSM에서 -0.02에서 -0.15로 가장 작은 범위의 값을 가지는 것으로 나타났다. 기온과 토양수분의 교차상관분석의 결과, 깊이에 따른 특징적인

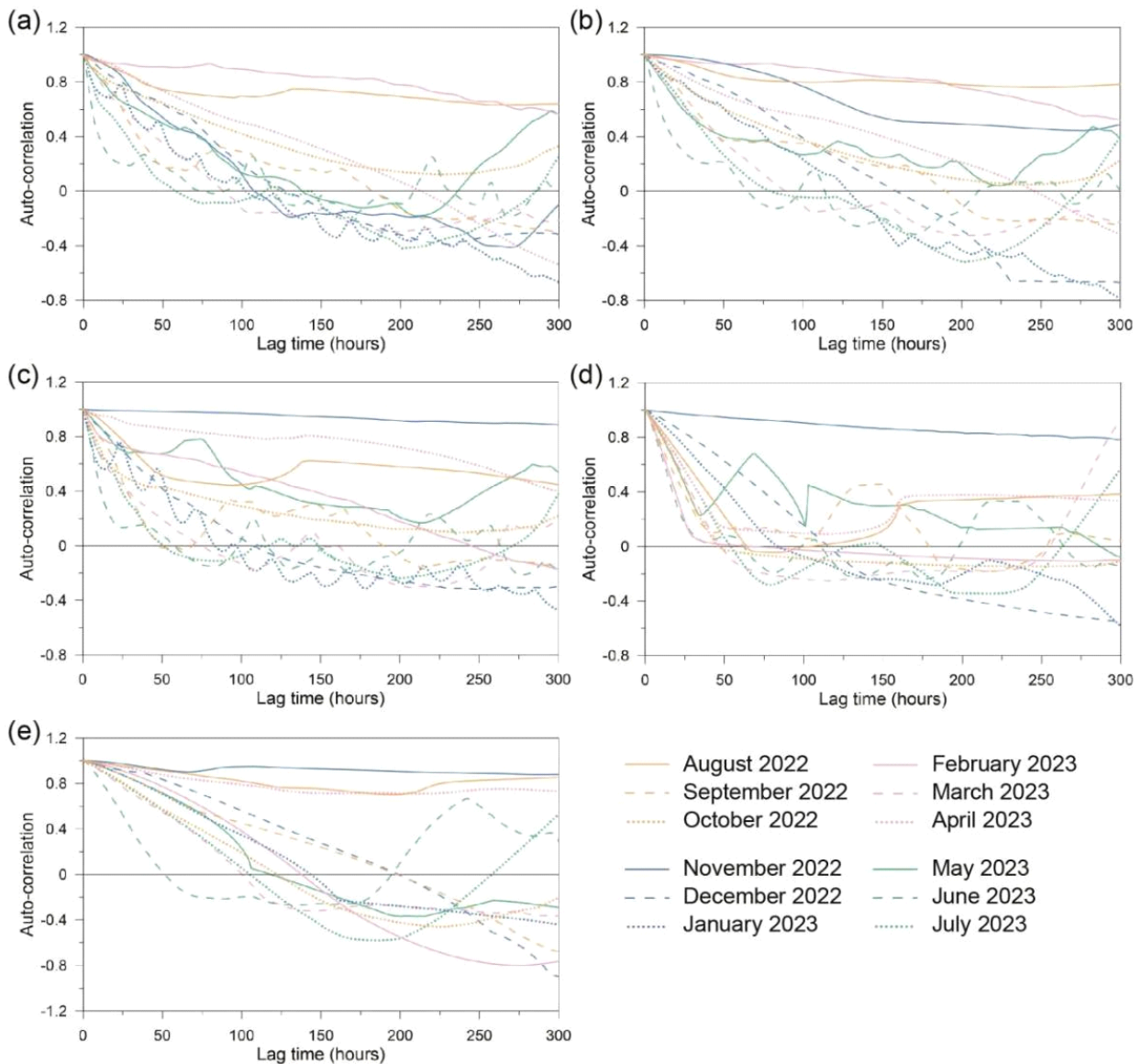


Fig. 6. Results of auto-correlation analysis with time-series soil moisture data at various depths and months in BSM. (a) 10 cm, (b) 20 cm, (c) 40 cm, (d) 70 cm, (e) 100 cm.

경향성은 나타나지 않았다.

3.2.3. 토양수분과 강수량의 교차상관분석

PSM의 토양수분과 강수량의 교차상관분석 결과, 10 cm 깊이에서 9시간의 지연시간을 가지며 깊이가 깊어짐에 따라 점진적으로 지연시간이 증가하는 경향을 보이며, 100 cm 깊이에서 지연시간이 66시간으로 급격하게 증가하였다. 최대 교차상관함수는 70 cm 깊이까지 깊어질수록 점차적으로 증가하다가 100 cm 깊이에서 다시 감소하였다.

SOSM의 경우, 10 cm 깊이에서 100 cm 깊이까지 깊어짐에 따라 지연시간이 점차적으로 증가하는 경향을 보였다. 최대 교차상관함수는 10 cm 깊이에서 70 cm 깊이까지

는 0.25-0.26으로 큰 차이를 보이지 않았으며, 100 cm 깊이에서 0.17로 감소하는 경향을 보였다.

BSM의 경우, 10 cm 깊이에서 40 cm 깊이까지는 4시간 이하의 짧은 지연시간을 가지는 것으로 나타났으며, 70 cm 깊이와 100 cm 깊이에서 각각 18, 83시간으로 급격하게 증가하였다. 최대 교차상관함수는 깊이에 따라 일정한 경향을 보이지 않고, 증가와 감소가 반복되는 경향을 보였다. 20 cm 깊이에서 0.17로 감소하였다가 70 cm 깊이까지 0.27로 증가하고, 100 cm 깊이에서 0.13으로 다시 감소하는 경향으로 나타났다.

세 가지 토지이용을 비교하였을 때, 지연시간은 표토를 기준으로 BSM이 가장 짧았으며, 심토에서는 SOSM이 가

Table 2. Periods at the highest spectral density based on the results of spectral density analysis with time-series soil moisture data at various depths with different land-use.

Depth (cm)	PSM		SOSM		BSM	
	(hours)	(days)	(hours)	(days)	(hours)	(days)
10	4,271	178	3,797	158	4,271	178
20	3,417	142	4,271	178	4,271	178
40	3,417	142	3,417	142	4,881	203
70	3,417	142	3,797	158	4,881	203
100	1,178	49	3,797	158	4,881	203

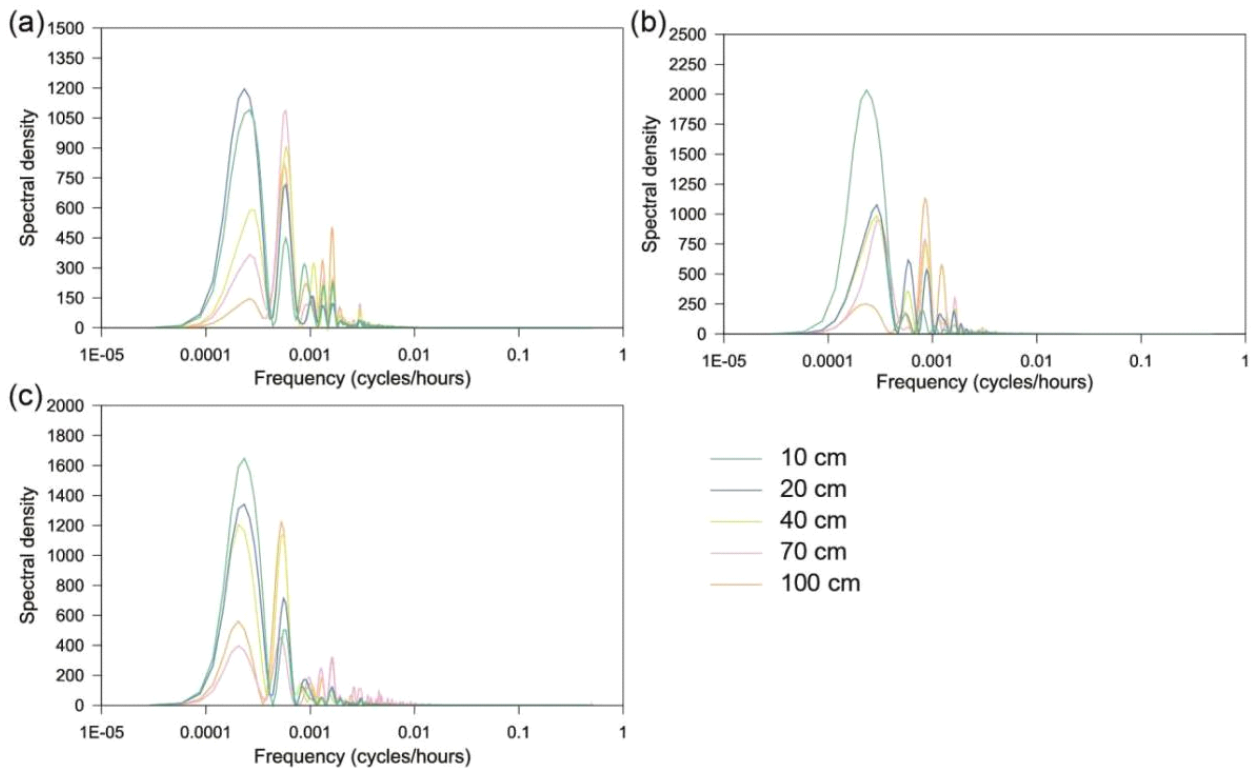


Fig. 7. Results of spectral density analysis with time-series data on soil moisture contents at different depths in areas of different land-use. (a) SOSM, (b) PSM, (c) BSM.

Table 3. Maximum cross-correlation coefficient and time delay based on the results of cross-correlation analysis with time-series soil moisture data at various depths with different land-use.

Depth (cm)	PSM				SOSM				BSM			
	Precip.		Temp.		Precip.		Temp.		Precip.		Temp.	
	T	r(k)	T	r(k)	T	r(k)	T	r(k)	T	r(k)	T	r(k)
10	9	0.16	3,752	-0.60	6	0.26	1,122	-0.02	2	0.23	1,225	-0.14
20	16	0.15	2,529	-0.33	15	0.25	477	-0.15	4	0.17	1,221	-0.29
40	32	0.18	2,434	-0.35	14	0.26	1,310	-0.15	4	0.23	492	-0.30
70	27	0.21	2,418	-0.30	15	0.25	2,464	-0.06	18	0.27	1,222	-0.17
100	66	0.12	2,455	-0.37	32	0.17	1,702	-0.13	83	0.13	1,247	-0.22

T: time delay (hours), r(k): maximum cross-correlation coefficient.

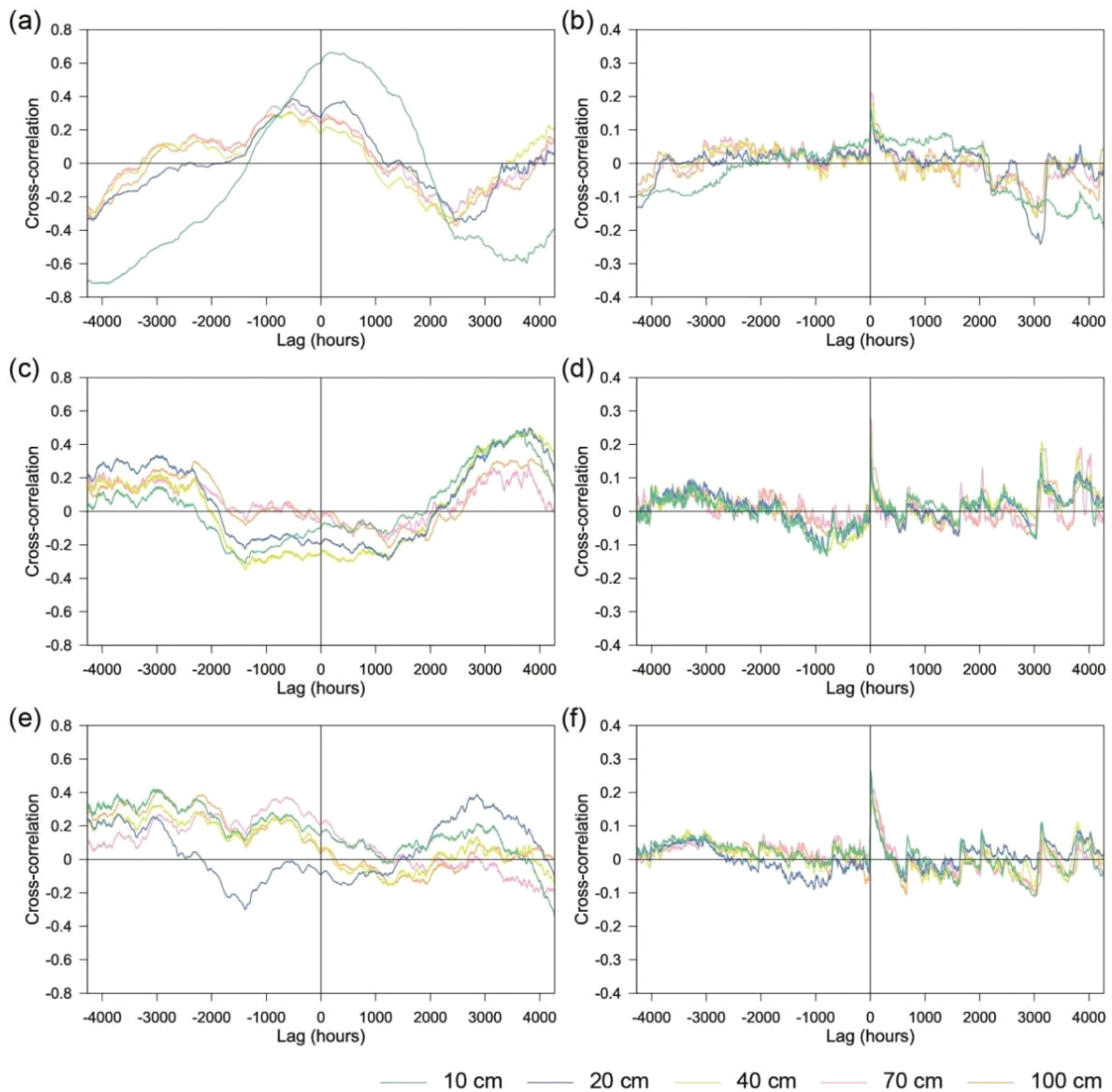


Fig. 8. Results of cross-correlation analysis between time-series data on soil moisture contents, air temperature, and rainfall at different depths in areas of different land-use. (a) soil moisture-temperature in PSM, (b) soil moisture-rainfall in PSM, (c) soil moisture-temperature in BSM, (d) soil moisture-rainfall in BSM, (e) soil moisture-temperature in SOSM, (f) soil moisture-rainfall in SOSM.

장 짧은 지연시간을 가지는 것으로 나타났다. 최대 교차상관함수는 PSM에서 0.12-0.21로 낮은 값을 가지는 것으로 나타났고, 100 cm 깊이를 제외하면 SOSM이 0.25-0.26으로 가장 높은 값을 가지는 것으로 나타났다. 최대 교차상관함수는 토지이용과 깊이에 따라 0.12-0.27로 낮은 값을 가지는 것으로 나타났으며, 이는 강수가 토양으로 침투하는 과정에서 수분과 토양의 마찰작용으로 인하여 운동에너지가 손실되었기 때문인 것으로 판단된다(Lee *et al.*, 2022a). 전체적으로 지연시간은 깊이가 깊어짐에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 최대 교차상관함수는 대체적으로 70 cm 깊이까지 깊어짐에 따라 증가하다가 100 cm 깊이에서 감소하는 경향을 보였다.

4. 결론

토지이용에 따른 토양수분의 시계열 특성과 기상 현상에 따른 변동 특성을 파악하기 위하여 다양한 작물이 재배되고 있는 농촌지역에서 토양수분 함량을 측정하고 시계열 분석을 수행하였다. 강수 현상은 6월 중순부터 9월 초까지 집중되어 나타났으며, 토양수분은 강수 현상에 반응하여 일시적으로 급격히 증가한 후 시간이 지나면서 서서히 감소하는 경향을 보였다. 토양수분은 깊이가 얕을수록 강수에 민감하게 반응하였으며, 세 가지 토지이용 중 BSM에서 강수에 의해 토양수분이 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 겨울철에 표토구간에서 낮은 기온으로 인하여 토양수분 측정에 영향이 있었으며, BSM의 70 cm 깊이 구간에서 토양수분이 이상적으로 변동하는 원인을 파악하기 위하여 해당 구간의 토양 특성에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

월별 자기상관분석 결과, 세 토지이용 모두 특정 시기에 지연시간이 변화하는 양상이 유사하게 나타났다. 깊이에 따라 변화하는 양상은 일정한 경향성을 갖지 않았으나, 공통적으로 40 cm에서 70 cm 구간 근처에서 지연시간이 감소하는 경향을 보였다. 표토 구간에서 특징적으로 겨울철 급격한 기온 하강으로 토양수분 함량의 변동이 적어 지연시간이 길게 나타났으며, 여름철에는 잦은 강수로 인하여 지연시간이 짧게 나타나는 것으로 판단된다. 스펙트럼 밀도분석을 통해, 토양수분 변동 주기는 PSM에서 가장 짧고, BSM에서 가장 긴 것으로 나타났다.

토양수분과 기온의 교차상관분석 결과, 기온 변화에 따라 토양수분은 음의 관계를 가지고 변화하는 것으로 나타났으며, 깊이에 따른 경향성은 나타나지 않았다. 토지이용별로 BSM에서 지연시간이 가장 짧았으며, PSM에서 가장 길었다. 최대 교차상관함수는 PSM에서 가장 컸으며, SOSM에서 가장 작은 값으로 나타났다. 토양수분과 강수량의 교차상관분석 결과, 강수에 의해 토양수분은 빠르게 양의 관

계를 가지고 반응하는 것으로 나타났다. 지연시간은 깊이가 깊어짐에 따라 길어지는 경향을 보였으며, 최대 교차상관함수는 70 cm 깊이까지 증가하다가 100 cm 깊이에서 감소하는 경향을 보인다.

토양수분의 시계열적 특징은 토지이용별로 유사한 경향성을 보였으나, 각각의 토지이용간 세부적인 차이를 구분하기 위하여 깊이별 입도분석을 통한 토양의 특성을 파악하는 것이 필요하다. 이러한 종합적인 결과들은 토지이용과 깊이에 따른 토양수분의 양상 및 상호작용을 효과적으로 나타내며, 향후 토양 시스템의 관리 및 예측에 유용한 정보를 제공한다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2021R1F1A1064027). 논문 초안을 검토해주신 최수정 선생님께 감사드립니다.

REFERENCES

- 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.
- Berg, A. and Sheffield, J., 2018, Climate change and drought: the soil moisture perspective. *Current Climate Change Reports*, 4, 180-191.
- Cha, J., Lee, J.Y. and Chia, R.W., 2023, Microplastics contamination and characteristics of agricultural groundwater in Haean Basin of Korea. *Science of The Total Environment*, 864, 161027.
- Choi, H.J., Jo, N.G., Yoo, K.O., Choi, B.S. and Kim, S.M., 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).
- Choi, H.M., Lee, J.Y., Ha, K. and Kim, G.P., 2011, The study on time series analysis of groundwater data and groundwater recharge in Jeju Island. *The Journal of Engineering Geology*, 21, 337-348 (in Korean with English abstract).
- Erler, A.R., Frey, S.K., Khader, O., d'Orgeville, M., Park, Y.J., Hwang, H.T., Lapen, D.R., Peltier, W.R. and Sudicky, E.A., 2019, Evaluating climate change impacts on soil moisture and groundwater resources within a lake-affected region. *Water Resources Research*, 55, 8142-8163.
- 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.
- Gil, M., Kwon, H.H., Kwon, Y.H., Jung, M.J., Kim, S.Y. and Rhie, Y.H., 2020, Growth of *Minuartia laricina*, *Arenaria juncea*, and *Corydalis speciosa* in Field with Various Soil Water Contents. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 29, 344-353 (in Korean with English abstract).

- 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).
- 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).
- Kwon, K.J., Jung, H.H. and Park, B.J., 2015, Effects of Irrigation Frequency on Growth Responses of Indoor Foliage Plants. *Journal of Korean Society for People, Plants, and Environment*, 18, 379-385 (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 Haean 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., 2002, 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., Raza, M. and Kwon, K.D., 2019, Land use and land cover changes in the Haean Basin of Korea: Impacts on soil erosion. *Episodes*, 42, 17-32.
- 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, 237-248 (in Korean with English abstract).
- Lee, M.W., Lee, S.B. and Lee, J.Y., 2022a, Comparison of Soil Permeability and Time-Series Variation of Soil Moisture in Areas with Different Land Use in an Agricultural Region of Gangwon Province, Korea. *The Journal of Engineering Geology*, 32, 483-498 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.B., Lee, M.W. and Lee, J.Y., 2022b, Characteristics of soil moisture variation with land-use in the Haean basin of Gangwon province. *Journal of the Geological Society of Korea*, 58, 335-346 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Mathias, S.A., Sorensen, J.P. and Butler, A.P., 2017, Soil moisture data as a constraint for groundwater recharge estimation. *Journal of Hydrology*, 552, 258-266.
- Mileham, L., Taylor, R., Thompson, J., Todd, M. and Tindimugaya, C., 2008, Impact of rainfall distribution on the parameterisation of a soil-moisture balance model of groundwater recharge in equatorial Africa. *Journal of Hydrology*, 359, 46-58.
- Nash, M.S., Wierenga, P.J. and Gutjahr, A., 1991, Time series analysis of soil moisture and rainfall along a line transect in arid rangeland. *Soil Science*, 152, 189-198.
- Raza, M. and Lee, J.Y., 2022, Relationship between agricultural land use and spatial heterogeneity in quality of water resources in Haean Basin of Korea. *Water Resources*, 49, 515-524.
- Raza, M., Lee, J.Y. and Kwon, K.D., 2019, Land use and land cover changes in the Haean Basin of Korea: Impacts on soil erosion. *Episodes*, 42, 17-32.
- RDA (Rural Development Administration), 2024, <http://soil.rda.go.kr/soil/chart/chart.jsp> (January 4, 2024).
- SU, S.L., Singh, D.N. and Baghini, M.S., 2014, A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*, 54, 92-105.
- Soulsby, C., Scheliga, B., Neill, A., Comte, J.C. and Tetzlaff, D., 2021, A longer-term perspective on soil moisture, groundwater and stream flow response to the 2018 drought in an experimental catchment in the Scottish Highlands. *Hydrological Processes*, 35, e14206.
- Tian, H., Ye, L. and Chen, H., 2013, Study on effect of soil temperature on FDR soil moisture sensor in frozen soil. *Intelligent Information, Control, and Communication Technology for Agricultural Engineering*, 8762, 334-338.
- 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.
- Yun, S.W., Jo, Y.J. and Lee, J.Y., 2009, Comparison of groundwater recharges estimated by waterlevel fluctuation and hydrograph separation in Haean basin of Yanggu. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 391-404 (in Korean with English abstract).