

수막재배 지역에서의 강수에 따른 토양수분 및 침투율 모니터링

하규철^{1,2,*} · 김용철¹ · 김성윤¹

¹한국지질자원연구원 지구환경연구본부 지하수연구실

²과학기술연합대학원대학교 광물 · 지하수자원학과

요 약

침투는 강수가 토양표면으로부터 토양층 내부로 물이 스며들어 가는 과정으로 지하수 함양의 시발점이 되는 과정이면서, 지표유출에 영향을 미치는 중요한 수문요소이다. 금번 연구에서는 수막재배 지역에서의 비닐하우스 시설이 강수의 토양내 침투과정에 미치는 영향을 평가하기 위해 시도되었다. 연구지역은 충청북도 청주시 상당구 가덕면 상대리 일대의 수막재배 시설이 밀집되어 있는 지역이며, 토양수분센서와 라이지미터를 설치하여 장기간동안 토양수분과 침투율을 모니터링 하였다. 관측기간은 2012년 10월부터 2016년 4월까지이며, 비닐하우스 시설 내부와 외부, 그리고, 수막재배와는 거리가 먼 곳에 추가로 관측을 실시하였다. 토양수분 관측결과, 수막재배 지역 비닐하우스 내부와 외부에서 강수량 또는 비닐하우스 차단에 의해 변동 양상이 서로 다르게 나타나고 있음을 확인하였다. 비닐하우스 내부에서는 강수에 대한 영향이 거의 나타나지 않았으며, 비닐하우스 외부에서는 강수에 대한 영향 이외에 수막재배에 이용되고 남은 물에 의해서도 토양수분이 변동하고 있는 것이 관측되었다. 침투율 관측결과에서도 토양수분 관측결과와 마찬가지로 강수와 수막재배시 사용된 물에 의한 침투율 차이가 나타났다. 수막재배 기간동안 비닐하우스 내부에서 침투되는 양은 0~27.4 mm인데 반하여, 비닐하우스 외부에서 침투되는 양은 60.7~140.6 mm로서 그 차이가 매우 컸다. 수막재배 지역 이외의 지역에서 측정된 침투율 관측결과에서는 2015년 12월부터 2016년 3월까지 월별로 강수량 대비 0~67.6%(평균 51.3%) 정도 관측되었다.

주요어: 토양수분, 침투율, 수막재배

Kyoochul Ha, Yongcheol Kim and Sung-Yun Kim, 2016, Monitoring of soil water content and infiltration rate by rainfall in a water curtain cultivation area. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 3, p. 221-236

ABSTRACT: Infiltration is the process that water goes into the soil layer from the soil surface, which is the starting point for groundwater recharge, and it influences surface run-off. This study aims to assess the infiltration by green houses in a water curtain cultivation area, which is located in Sangdae-ri Gadeog-myeon Sangdang-gu Cheongju-si Chungbuk-do. Soil water sensors at various depths and lysimeter devices were used to monitor the soil water contents and long-term infiltration rate. The monitoring was mainly performed from October, 2012 to April, 2016 inside and outside of a green house, and a monitoring point at a distance from the the water curtain cultivation area was added for a reference. The monitoring result showed that there were very different variation patterns of the soil water contents between inside and outside of the green house. While the soil water contents inside the green house did not respond to rainfall, the soil water contents outside were influenced by both water curtain cultivation activities and rainfalls. The infiltration amounts inside and outside the green house were 0~27.4 mm and 60.7~140.6 mm during the water curtain cultivation season, respectively. The infiltration rate at the reference point was 0~67.6% (51.3% in average) to the rainfall amount from December, 2015 to March, 2016.

Key words: soil water content, infiltration, water curtain cultivation

(Kyoochul Ha, Yongcheol Kim and Sung-Yun Kim, Groundwater Department, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea; Kyoochul Ha, Mineral & Groundwater resources, University of Science and Technology, Daejeon 34113, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-42-868-3081, E-mail: hasife@kigam.re.kr

1. 서 론

침투(infiltration)는 수문순환 과정에서 강수가 토양표면으로부터 토양 내 공극 또는 작은 공간으로 물이 스며들어 가는 과정이다. 침투는 지하수 함양의 시발점이기도 하고, 지표유출에도 상당한 영향을 미칠 수 있기 때문에 대상지역의 수문학적 과정을 이해하기 위해서는 반드시 평가해야 할 수문요소이다(Ward and Elliot, 1995). 토양수분은 토양층에 함유된 물을 말하며, 흡착수(hydrosopic water), 모세관수(capillary water), 중력수(gravitational water)의 형태로 존재한다. 흡착수는 대기로부터 직접 수분을 흡수하여 토양 입자 표면에 얇은 피막을 이루는 물이고, 모세관수는 표면장력에 의해 토양입자 주위에서 서로 연결된 피막을 이루어 식물에 의해 쉽게 증발·흡수되는 물이다. 중력수는 중력에 의해 아래로 이동하는 잉여 토양수라고 할 수 있다(Hahn, 2015). 어떤 한 지점에서 측정된 토양수분은 강수의 토양내 침투를 통하여 증가하였다가, 이후 증발(evaporation)이나 식생에 의한 증산(transpiration)작용, 중력에 의해서 아래로 물이 이동하면서 수분함량이 감소하게 된다.

토양수분을 측정하기 위해서는 중력측정법(Gravimetric technique)에 의해 토양시료를 직접 채취하고, 그 안에 저장되어 있는 물의 함량을 직접 측정할 수 있지만, 이 방법은 한번의 측정으로 끝나버리기 때문에, 지속적인 현장 모니터링에는 적합하지 못하다. 따라서, 지속적인 현장 모니터링을 위해서는 간접적인 방법인 중성자의 이동속도측정법(Neutron Scattering technique), 장력측정법(Tensiometric technique), 그리고 토양의 유전상수를 측정하는 FDR (Frequency Domain Reflectometry), TDR (Time Domain Reflectimetry) 방식 등을 이용한다. 이러한 방법들에 대한 비교는 많은 연구자들에 의해 보고되어졌다(Schmugge *et al.*, 1980; Zegelin, 1996; Topp, 2003).

최근, 우리나라에서는 토양수분 관측을 통한 수문학적 연구가 활발하게 이루어 지고 있다. 광릉수목원 내 산지사면에서의 토양수분 시계열 자료의 단변량 분석(Son *et al.*, 2007)과 비포화 토양에서 천이상태의 함수량과 상대 전기전도도의 관계에 관한 연구(Park *et al.*, 1999), 산지사면에서의 효과적인 토양수분 측정에 관한 연구(Kang *et al.*, 2004), 토양수분 모니터링 자료를 토양 증발량 평가에 활용하는 연구(Gwak and Kim, 2012;

Gwak *et al.*, 2013), 수문모델링에서 모형의 보정 및 검증에 이용한 연구(Ahn *et al.*, 2013) 등 매우 다양하다.

침투율은 단일 원통 또는 이중 원통(Single or double ring infiltrometer)을 이용하거나, 디스크장력침투계(Disc Tension Infiltrometer), Guelph 투수량계 등을 이용하여 현장에서 직접 침투실험을 실시하여 측정할 수 있다(Kim, 2010). 그러나, 이러한 방법들은 일정한 양의 물을 공급하여 주면서 물이 침투해 들어가는 양을 측정하기 때문에 자연상태에서의 지속적인 침투율을 모니터링 하는 것이라고 할 수 없다. 따라서, 토양층을 침투해 들어가는 양을 지속적으로 관측하기 위해서는 라이지미터(lysimeter)를 이용해야만 한다. 라이지미터는 콘크리트나 금속제인 용기에 토양을 채우고 작물을 재배하여 작물의 증발산량, 토양의 물수지 측정 또는 양분 등의 이동을 관측하는 장치이다.

이번 연구는 수막재배 과정에서 비닐하우스 내·외부의 토양수분과 강수량 또는 관개용수의 토양 침투율을 관측함으로써 지하수로의 함양되는 물의 양을 간접적으로 평가하기 위해 수행되었다. 우리나라에서는 1980년대 중반 이후 시설재배와 수막재배 면적이 증가하면서 축적층 지하수의 이용량이 크게 증가하였다. 수막재배는 지하수의 열에너지를 이용하여 비닐하우스를 난방하는 방법으로서, 강수량이 적은 시기인 동절기에 다량의 지하수를 집중적으로 양수하게 되므로 일시적인 지하수 고갈 문제가 발생될 수 있다(KIGAM, 2010; Moon *et al.*, 2012). 이와 같은 일시적 지하수 고갈은 한번 사용한 지하수를 배수로로 통해서 흘려버리는 비순환식이라는 데에서 기인되고 있다(KIGAM, 2010). 이러한 문제를 해결하기 위해 국토교통부 수변 지하수 활용 고도화 연구사업에서는 대수층 순환식 인공함양 기술을 개발하고 있다. 이를 위해서는 대상지역에 대한 물수지를 파악할 필요가 있으며, 물수지 평가를 위해서는 침투율과 지하수 함양량, 수막재배시 토양수분 변화양상을 파악할 필요가 있다. 특히, 이번 연구결과는 비닐하우스 내부는 관개용수에 의한 영향, 비닐하우스 외부는 강수량에 의한 영향을 서로 비교할 수 있는 자료를 제공해 주고 있다.

2. 연구지역

연구지역은 충청북도 청주시 상당구 가덕면 상대

리 일대이며, 수막재배 비닐하우스 시설이 빼곡이 밀집되어 있는 곳이다. 이들 수막재배 시설에서 생산되는 주 품종은 딸기이다(그림 1). 본 지역은 국토교통부 수변 지하수 활용 고도화 연구 사업의 일환으로 대수층 순환식 인공함양 기술의 실용화를 위해 시범지역으로 선정된 곳으로서 2013년부터 2016년 현재까지 지하수 인공함양 주입 및 양수시설, 지하수 모니터링 관정, 집수 탱크 및 여과시설 등이 설치되어 운영되고 있는 곳이다. 이곳의 수막재배 시설면적은 그림 1에서 점선으로 표시된 영역 408,808 m² 중 50,662 m²로서 약 12.5%를 차지하고 있다.

지표지질을 보면 지대가 높은 동쪽 구릉지역이 주라기 화강암으로 구성되어 있고, 무심천 주변으로 제4기 충적층이 넓게 분포되어 있다. 시추조사 결과, 표토층을 포함한 충적층 두께는 11.7~24.0 m (평균 15.9 m)이며, 주로 실트질 모래와 자갈 섞인 모래가 혼재하고 있다. 퇴적물의 색깔은 암회색에서 황갈색까지 넓은 범위로 존재한다(KIGAM, 2013).

3. 연구방법

3.1 관측장비 설치

이번 연구에서는 현장에서 지속적으로 침투율과 토양수분함량을 측정하기 위해서 Decagon Devices사의 Gee 라이지미터와 토양수분센서를 설치·운영하였다. Gee 라이지미터는 일정한 부피를 갖는 원통형 통에 토양을 채우고, 강수량 또는 관개용수 등에 의해 침투되는 물을 워(wick) 차집장치를 해 측정함으로써 일정한 시간간격으로 침투율을 관측할 수 있는 장비이다(Decagon Devices, Inc., 2003, 2015). 현재 Decagon사에서 판매하는 Gee 라이지미터는 G2와 G3 type 2가지 종류가 있으며, 지하수위가 높은 곳에서는 G3 type을 이용한다. 두 모델 모두 정확도는 ± 1.4 mm이고, 해상도는 0.2 mm이다. 그림 1에서 모니터링 초기 D1, D2-1지점에는 D2 type 장비를 설치하였으나, 이후 비닐하우스 내부에 있는 D2-1을 D2-2로 대체하고, D3지점에 신규로 설치하

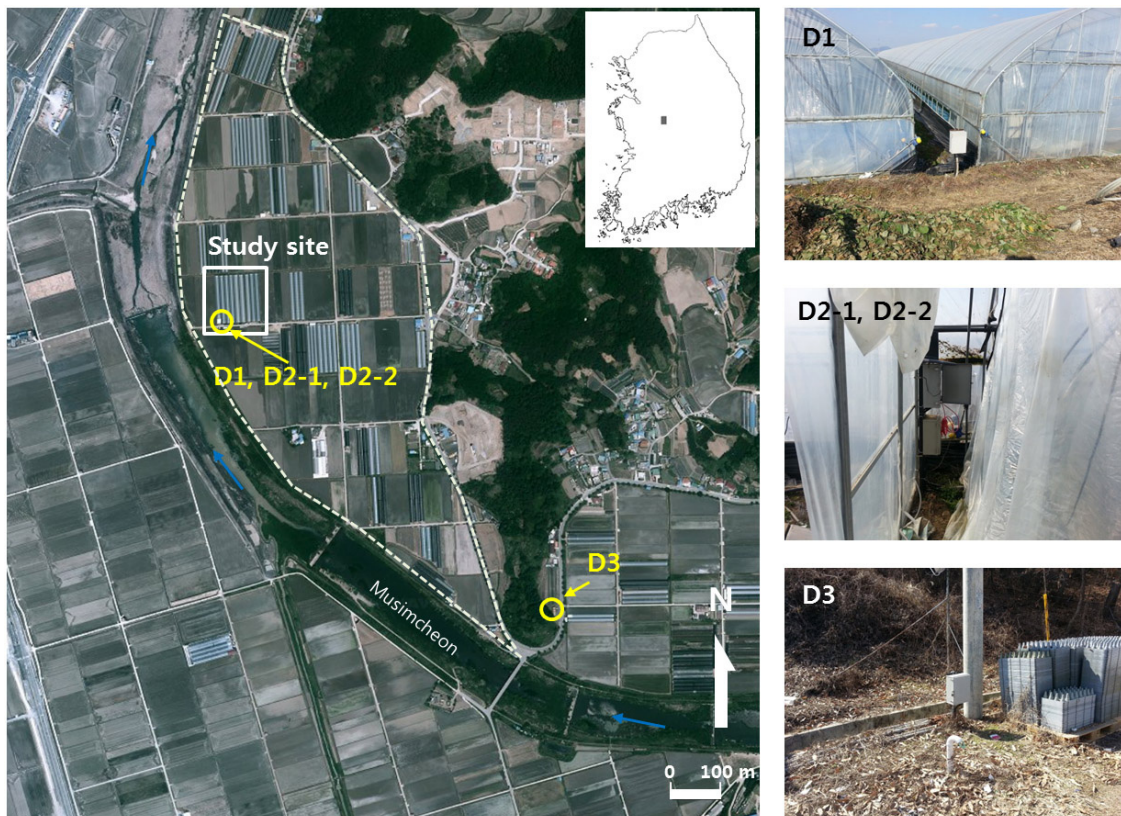


Fig. 1. Study site and the monitoring points (map source: <http://map.naver.com>).

Table 1. Monitoring of soil water content and infiltration in the study site.

ID	Lysimeter	Monitoring Period*	Monitoring item	Comment
D1	G2 type	Oct. 16, 2012 ~ Apr. 21, 2016	• Infiltration • Soil water content (at 10, 30, and 50 cm depths)	Outside the green house
D2-1	G2 type	Oct. 17, 2012 ~ Nov. 20, 2015	• Infiltration • Soil water content (at 10, 30, and 50 cm depths)	Inside the green house
D2-2	G3 type	Nov. 20, 2015 ~ Apr. 21, 2016	• Infiltration • Soil water content (at 15, 30, 45, and 60 cm depths)	Replacement of the D2-1 equipment
D3	G3 type	Jul. 31, 2015 ~ Apr. 21, 2016	• Infiltration • Soil water content (at 15, 30, 45, and 60 cm depths)	Newly installed outside at other place

*The period means the total operation time of the equipment, and some data during the period were missing due to malfunction of the device.

면서부터는 D3 type 장비를 설치하였다.

Gee 라이지미터 원통형 통에는 불교란 토양시료를 채우는 것이 이상적이거나, 자갈이나 모래가 많아서 불교란 토양시료를 채취하는 것이 어려워 부득이 굴착시 모아둔 토양을 다시 채우는 방식으로 라이지미터를 설치하였다. 관측지점의 토양은 실트질 및 사질 토양이 주를 이루고 있으며, 자갈도 많이 함유하고 있다. 비닐하우스 주변지역은 수막재배를 위해 해마다 농지정리가 이루어짐에 따라, 지표에서 약 50 cm 정도는 매립에 의한 다양한 크기의 토양 및 자갈이 분포하고 있다. 육안으로 판단할 때, 실트질과 사질토의 비율은 약 40 : 60으로 사질토 비율이 다소 높다(KIGAM, 2014). 그러나, D3지점은 사질토가 대부분이고 실트질은 10% 미만이다.

라이지미터 설치를 위해서는 땅을 굴착하여야 하며, 이를 위해 굴착장비를 동원하거나, 굴착장비가 들어가지 못하는 비닐하우스 내부에 설치할 때에는 인력으로 굴착하여야만 한다. 원통형 통이 아닌 워(wick) 차집장치가 있는 깊이에는 핸드오거를 사용하여 굴착할 수 있다. D2 type/D3 type 라이지미터 모두 원통형 통 길이가 100 cm이고, 워(wick) 차집장치가 들어가는 부분이 약 80 cm 정도 되기 때문에 전체적으로는 180 cm 정도를 굴착하여야만 한다. 굴착과정 중에 지하수가 스며 나오면 토사가 무너져 내리기 때문에 장비설치가 어려워지는 데, D1과 D2-1 지점에서는 지표하 1.5 m 지점부터 지하수가 스며 나오기 시작했다(KIGAM, 2014). 굴착이 완료되고

나서 Gee 라이지미터의 아래부분인 워(wick) 차집장치와 그 위로 원통형 통을 세우게 된다. 원통형 통에는 굴착과정에서 모아놓은 토양을 채워넣고, 지표로부터 일정 깊이에 토양수분을 측정할 수 있는 센서를 설치하게 된다. D1과 D2-1 지점에는 지표로부터 10 cm, 30 cm, 50 cm인 3개 지점에 토양수분센서(Decagon사의 EC-5)를 설치하였고, D2-2와 D3 지점에서는 지표로부터 15 cm, 30 cm, 45 cm, 60 cm인 4개 지점에 토양수분센서(Decagon사의 5TE)를 설치하였다(표 1). Gee 라이지미터에 토양채움과 토양수분센서 설치가 완료되고 나서 침투율과 토양수분 센서를 지표에 자료수집 로거를 설치하여 케이블로 연결하였다. 5TE와 EC-5는 FDR (Frequency Domain Reflectometry) 방식으로 토양수분을 측정하는 센서로서 정확도는 0.03, 해상도는 0.001이다(Decagon Devices, Inc., 2016a, 2016b).

3.2 자료수집 및 분석

앞서 설명한대로 Gee 라이지미터를 설치하여 침투량과 토양수분을 모니터링하였으며, 시간간격은 1시간 간격으로 로거에 자동 저장되도록 하였다. 관측센서가 위치하는 곳은 수막재배 시설이 있는 비닐하우스 내부(D2-1)와 외부(D1)에 하나씩이며, 2015년 말 비닐하우스 내부에 있는 D2-1 센서가 고장이 나서 같은 위치에 장비를 교체하고 D2-2로 명칭을 변경하였다. 또한, 2015년에 수막재배 지역에서 멀리 떨어진 D3 지점에 추가적으로 장비를 설치하고,

Table 2. Basic statistics of the soil water content data at each location.

ID	Depth (cm)	Data aquisition		Soil water content			
		Start	End	Min	Max	Ave*	Std**
D1	10 cm	2012-10-16	2014-04-26	0.112	0.305	0.217	0.029
		2014-05-13	2014-06-25	0.125	0.248	0.180	0.037
	30 cm	2012-10-16	2014-04-26	0.130	0.308	0.153	0.020
		2014-05-13	2014-06-25	0.121	0.195	0.136	0.013
	50 cm	2012-10-16	2014-04-26	0.148	0.340	0.178	0.023
		2014-05-13	2016-04-21	0.125	0.279	0.196	0.016
D2-1	10 cm	2012-10-17	2013-02-15	0.181	0.260	0.217	0.010
		2013-02-21	2015-11-20	0.200	0.284	0.216	0.009
	30 cm	2012-10-17	2013-02-15	0.154	0.342	0.196	0.006
		2013-02-21	2014-05-14	0.190	0.201	0.197	0.022
	50 cm	2012-10-17	2013-02-15	0.166	0.332	0.236	0.044
		2013-02-21	2015-11-20	0.231	0.312	0.262	0.029
D2-2	15 cm	2015-11-20	2016-04-21	0.144	0.465	0.308	0.115
	30 cm	2015-11-20	2016-04-21	0.134	0.455	0.346	0.120
	45 cm	2015-11-20	2016-04-21	0.154	0.460	0.380	0.109
	60 cm	2015-11-20	2016-04-21	0.168	0.428	0.339	0.068
D3	15 cm	2015-07-31	2016-04-21	0.125	0.287	0.189	0.027
	30 cm	2015-07-31	2016-04-21	0.067	0.270	0.124	0.026
	45 cm	2015-07-31	2016-04-21	0.113	0.446	0.142	0.018
	60 cm	2015-07-31	2016-04-21	0.086	0.446	0.112	0.030

* Average, ** Standard deviation

수막재배가 이루어지고 있는 곳과 아닌 곳을 상호 비교할 수 있도록 하였다.

D1과 D2-1에 설치된 라이지미터는 G2 type으로서 토양수분센서는 지표로부터 10 cm, 30 cm, 50 cm 깊이에 설치되었으며, 관측은 각각 2012년 10월 16일부터 2016년 4월 21일까지, 10월 17일부터 2015년 11월 20일까지 이루어졌다. D2-2와 D3은 G3 type의 라이지미터이고, 토양수분센서는 지표로부터 15 cm, 30 cm, 45 cm, 60 cm 깊이에 설치되었으며, 관측은 각각 2015년 11월 20일과 7월 31일부터 2016년 4월 21일까지 이루어졌다.

연구지역에서는 대수층 순환식 인공함양 기술의 실용화를 위해 다양한 관측장비가 운영되고 있는데, 지하수 모니터링 관정뿐만 아니라 강수량 등을 측정할 수 있는 자동기상관측장치가 설치되어 있다. 자동기상관측장치에서는 대기온도, 습도, 강수량 자료가 1시간 단위로 관측되고 있으므로, 토양수분, 침투율

과 강수량과의 상관성 분석을 위해 사용된 강수량 자료는 이 자동기상장치로부터 수집된 것이다. 강수량 자료도 토양수분함량자료나 침투율 자료와 마찬가지로 센서 이상에 의해 자료누락이 발생한 기간이 있었는데, 이 기간은 2014년 3월 21일부터 2014년 9월 22일까지이다. 강수량 자료가 없는 기간에는 근처 청주 기상대 일강수량 자료를 수집하여 분석에 이용하였다. 또한, D1지점에서 약 10 m정도 떨어진 곳에는 지하수 관측공 CWW-14공이 위치하고 있는데, 이곳에도 지하수위가 자동으로 관측되고 있으므로 여기에서 관측된 지하수위 자료는 침투율 및 토양수분과의 상호관계를 파악하기 위해 참고적으로 활용되었다.

3.3 자기상관 및 교차상관 분석

침투율과 토양수분, 강수량과의 상관성 및 상호반응 관계를 알아보기 위한 방법으로는 시계열 분석에서 많이 사용되어온 방법인 자기상관분석과 교차상

관분석 방법을 이용하였다(Larocque *et al.*, 1998; Lee and Lee, 2000; Kim *et al.*, 2005; Ha *et al.*, 2006). 자기 및 교차상관분석은 시스템의 입출력과 관련된 반응을 분석하는데 효과적이기 때문에, 수리지질학에 있어서 매우 유용한 방법으로 알려져 있다. 이번 연구에서 이러한 자기 및 교차상관분석을 통해 강수량과 침투율과의 관계, 깊이별 토양수분함량의 강수에 대한 반응을 알아보고자 적용하였다. 이번 연구에서 사용된 분석방법은 자기상관함수와 교차상관함수를 비교하는 것으로 다음의 과정에 의하여 계산된다.

자기상관 분석(autocorrelation analysis)은 시계열 자료의 선형성(linearity)과 기억효과를 비교할 수

있는 방법이다. 시계열자료가 강한 선형성과 기억효과를 가질수록 긴 지연시간동안 자기상관함수가 0이상의 값을 가지며, 약한 선형성과 기억효과를 가질수록 짧은 지연시간에 0에 수렴하게 된다(Larocque *et al.*, 1998; Lee and Lee, 2000; Kim *et al.*, 2005). 교차상관분석(cross-correlation analysis)은 입력시계열자료 x_t 와 출력시계열자료 y_t 사이의 연관성(linkage)을 알아보기 위하여 사용되는 것으로, 입력 자료와 출력자료간의 인과관계(causal relationship)에 대한 정보를 제공하여 준다.

자기상관함수 $r(k)$ 와 교차상관함수 $r_{xy}(k)$ 는 다음과 같이 계산이 된다.

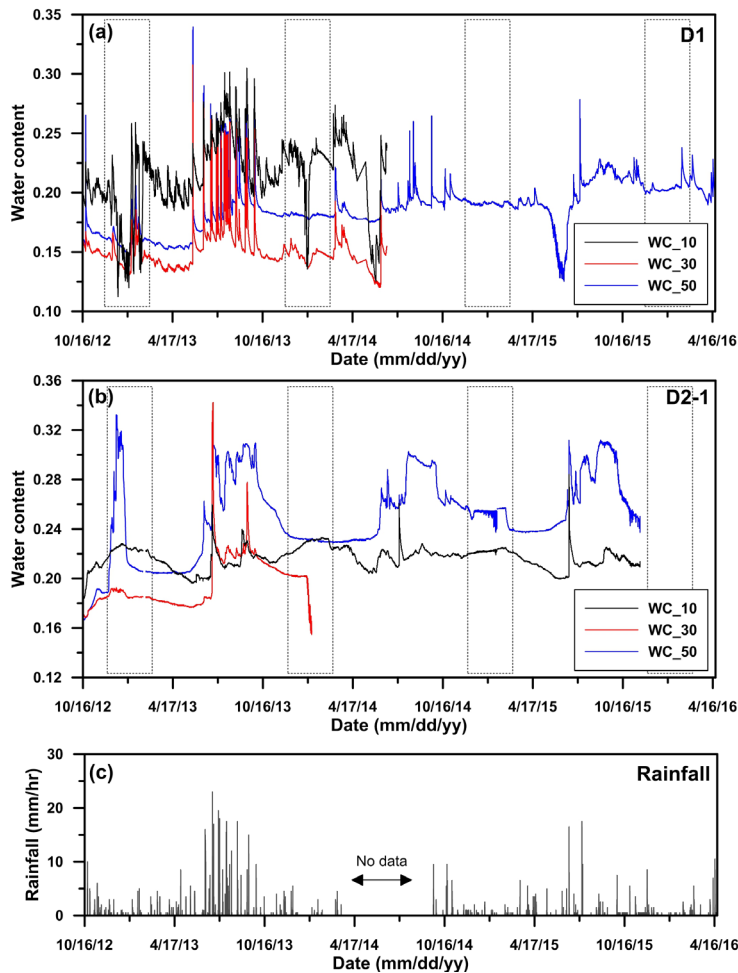


Fig. 2. Monitoring results of the soil water contents at various depths (a) outside the green house, (b) inside the green house, and (c) rainfall. The dotted box indicates the period for the water curtain cultivation from December to February next year.

$$r(k) = \frac{C(k)}{C(0)}$$

$$C(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{X})(x_{i+k} - \bar{X})$$

$$r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y}$$

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{X})(y_{i+k} - \bar{Y})$$

여기에서 k 는 시간지연(time lag; $k=0 \sim m$), n 은 시계열 길이, $\bar{X}$ 은 x_t 시계열의 평균이다. m 은 절삭점(cutting point)으로 분석기간을 의미하며, 대개의 경우 시계열 길이, n 의 1/4값을 사용한다(Davis, 1986). σ_x 와 σ_y 는 각각 시계열 x_t 와 y_t 의 표준편차이

- (1) 고, $\bar{Y}$ 는 y_t 시계열의 평균이다. 교차상관함수를 이용하여 시간지연 $k=0$ 과 최대 교차 상관함수 값 사이의 시간지연(time lag)으로 정의되는 지체시간(delay time)을 구할 수 있는데, 지체시간이 짧으면 짧을수록 입력 시계열에 대한 출력 시계열의 반응시간이 빠르고 시스템내의 스트레스의 전파가 잘 된다는 것을 의미 한다(Larocque *et al.*, 1998; Ha *et al.*, 2006).

4. 결과 및 토의

4.1 토양수분 변화

토양수분 자료는 깊이별로 설치된 센서의 상태에 따라 운영기간 동안 완전한 자료를 모두 획득하지는

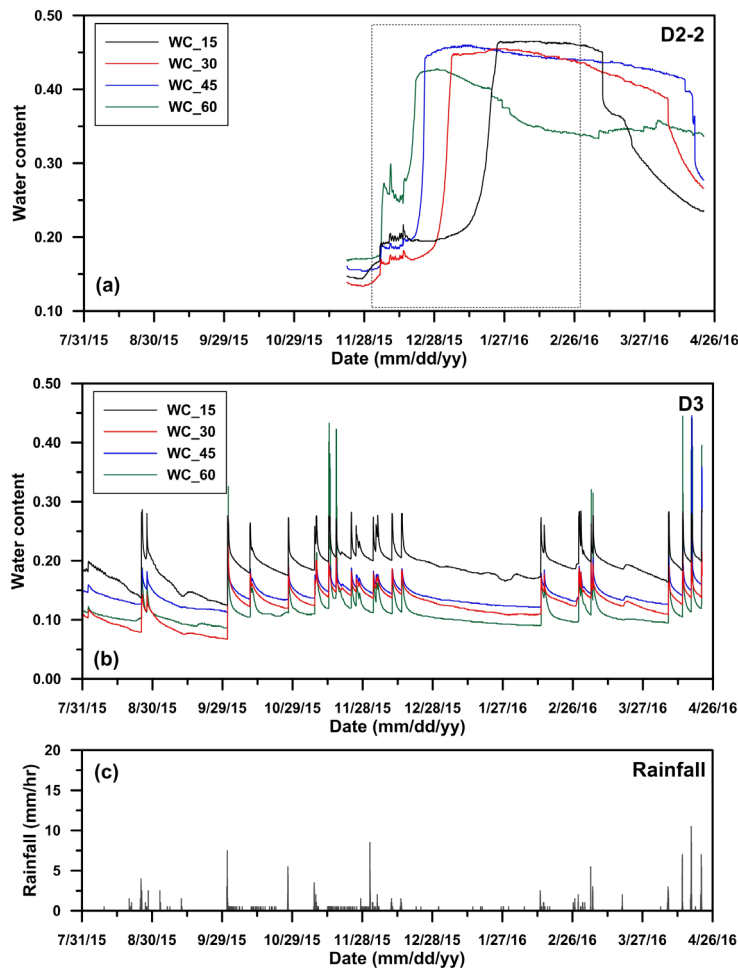


Fig. 3. Monitoring results of the soil water contents (a) inside the green house through the replacement of D2-1 equipment, (b) outside the green house and at other place, and (c) rainfall.

못하였다. 표 2에 각각의 관측위치 및 깊이, 자료 수집기간별 토양수분 자료에 대한 기초 통계값을 나타내었다. D1과 D2-1에서 깊이별 토양수분함량 자료는 관측기간 중 센서 이상에 따라서 누락된 부분이 많아 구간별로 통계값을 달리 산정하였다. 또한, 그림 2와 그림 3은 토양수분 시계열 자료를 그래프로 나타낸 것이다.

먼저 비닐하우스 외부에 있는 D1의 토양수분 변화를 보면, 관측 자료의 취득기간 전체 기준으로 지표로부터 10 cm에서는 0.112~0.305, 30 cm에서는 0.121~0.308, 50 cm에서는 0.125~0.340의 범위에서 변동하였다. 평균 토양수분함량을 살펴보면 10 cm 깊이의 토양수분(0.217, 0.180)이 30 cm (0.153, 0.136) 나 50 cm (0.178, 0.196)의 토양수분보다 높게 형성되어 변동하고 있는 양상을 나타내었다. 관측기간 전 구간에서 토양수분은 강수가 있을 때에 증가하였다가 이내 감소하고, 강수가 발생하면 다시 증가하는 식으로 강수에 대한 반응이 잘 나타나고 있었다. 또한, 지표하 10 cm (표준편차 0.029, 0.037) 깊이의 토양수분 변화는 30 cm (표준편차 0.020, 0.013), 50 cm (표준편차 0.023, 0.016) 깊이의 토양수분 변화에 비하여 변동성이 크게 나타났는데, 이 지점은 지표면에서 가깝게 위치하고 있으므로 해서 그만큼 강수와 외부 환경에 직접적으로 영향을 받기 때문으로 추정된다.

비닐하우스 내부에 설치되어 있는 D2-1에서는 D1과 토양수분 변화가 뚜렷하게 다르게 변동하고 있는 양상을 보였다. 강수에 대한 반응패턴이 D1에 비하여 매우 완화되어 있거나, 강수에 대하여 거의 반응하고 있지 않은 것을 알 수 있다. 전반적으로 장비가 설치된 초기 2012년 12월에서 2013년 1월까지를 제외하고는 강수가 집중되는 시기인 6월부터 8월까지 기간동안 토양수분이 높은 상태이었다가 그 외의 기간에는 낮아지는 등 계절적인 양상이 잘 나타났다. 즉, 강수가 적은 갈수기와 수막재배가 이루어지는 시기가 맞물려 토양수분함량이 낮게 분포하여 변동하였다. 이 곳에서의 토양수분은 관측자료 취득기간 전체 기준으로 지표하 10 cm 깊이에서는 0.181~0.284, 30 cm에서는 0.154~0.342, 50 cm에서는 0.166~0.3332의 범위에서 변동하였다. 평균 토양수분을 살펴보면 10 cm 깊이(0.217, 0.216)와 30 cm 깊이(0.196, 0.197)보다 50 cm (0.236, 0.262)깊이의 토

양수분이 높게 형성되어 변동하고 있는 양상을 나타내었다. 특히, 50 cm 깊이의 토양수분 분포를 보면, 상부 10 cm, 30 cm 깊이 토양수분이 높은 시기보다도 오랫동안 유지되고 있는 양상을 보였다.

그림 3은 비닐하우스 내부에 설치되어 있던 D2-1 (G2 type)을 같은 위치에서 새로이 D2-2 (G3 type)로 교체하여 토양수분을 모니터링한 결과와 수막재배 이외의 지역에서 D3 (G3 type)의 토양수분 변화를 나타낸 그림이다. D2-2에서의 토양수분함량은 2015년 11월 20일부터 2016년 4월 21일까지 약 5개월 동안 지표로부터 15 cm 깊이에서는 0.144~0.465 (평균 0.308), 30 cm에서는 0.134~0.455 (0.346), 45 cm에서는 0.154~0.460 (평균 0.380), 60 cm에서는 0.168~0.428 (평균 0.339)의 분포를 보였다. 동 기간 동안 토양수분은 강수와 무관하게 변동하고 있으며, 60 cm 깊이를 제외하고 토양수분의 상한에 도달하여 일정한 기간 동안 유지되고 있는 양상을 보였다. 또한, 깊이별로 토양수분이 증가하는 시기가 다른데, 10 cm 깊이에서는 2016년 1월 중순, 30 cm 깊이에서는 2015년 12월말, 45 cm 깊이에서는 12월 중순, 60 cm 깊이에서는 2015년 12월초로서 지표로부터 깊어질수록 이른 시기에 토양수분이 증가되었다. 이와 같은 관측결과를 설명하기 위해서 다음과 같은 추정이 가능할 것이다. 첫 번째, 깊은 곳에서의 토양수분이 먼저 증가하는 것은 센서설치 시 굴착한 토양을 재패킹하면서 토양수분이 중력에 의해 아래로 이동한 결과라고 보여진다. 두 번째, 일정한 기간 동안 높은 토양수분을 가지고 유지되고 있는 것은 지속적으로 수분이 공급되었거나, 증발산과 같은 손실이 없기 때문이라고 추정된다. 이 시기에는 수막재배가 이루어지는 시기로서 비닐하우스 내부에서는 지속적으로 수분이 공급되는 시기였고, 수막재배가 종료되는 시기에 맞추어 얇은 깊이에서부터 토양수분함량이 감소되는 것이 이를 뒷받침하고 있다.

D3지점의 토양수분 변화양상은 D2-2와는 확연히 달랐다. 강수에 대한 증가와 감소양상이 잘 나타나고 있고, 깊이별로도 전 구간에서 거의 비슷한 양상을 나타내었다. D3지점에서의 토양수분은 2015년 7월 31일부터 2016년 4월 21일까지 약 9개월동안 관측되었는데, 지표로부터 15 cm 깊이에서는 0.125~0.287 (평균 0.189), 30 cm에서는 0.067~0.270 (0.124), 45 cm에서는 0.113~0.446 (평균 0.142), 60

cm에서는 0.086~0.446 (평균 0.112)의 분포를 보였다. 전반적으로 2015년 8월부터 9월까지의 기간보다 이후 2015년 10월부터 2016년 4월까지 기간동안 토양수분이 최저 값 기준으로 15 cm, 30 cm, 45 cm, 60 cm 깊이에서 모두 약 0.1 정도 증가한 것을 알 수 있는데, 이는 이 시기에 강수량이 많이 발생하여 토양내 수분이 많이 유지될 수 있는 환경으로 조성되었기 때문으로 추정된다.

4.2 침투율 관측

그림 4는 비닐하우스 외부에 있는 D1지점과 비닐하우스 내부에 있는 D2-1지점에서 관측된 침투율 관측결과를 나타낸 그림이다. 이 그래프를 보면, 비닐하우스 내부(D2-1)에 비해서 비닐하우스 외부(D1)에서 관측된 침투율이 매우 높은 것을 알 수 있다. 또한, 센서의 이상에 의한 영향을 제외하더라도 겨울철(12월부터 이듬해 2월까지) 수막재배 기간동안을 제외하면, 비닐하우스 내부와 외부 공히 침투량이 없는 것으로 나타나 있다.

D1과 D2-1에서의 침투율 자료가 누락된 것은 지

하수위와 연관되어 있다. 본 연구지역 D1과 D2-1에 설치된 G2 type의 라이지미터는 침투율 측정센서가 지표하 1.8 m 정도에까지 내려가 있으므로, 이보다 지하수위가 높아지게 되면 더 이상 상부 토양을 통해 침투되는 양을 모니터링 할 수가 없다. 그림 5는 비닐하우스 외부 관측장소인 D1지점으로부터 약 10 m 정도 떨어진 곳에 위치한 CWW-14 지하수 관정에서의 지하수위 변동을 나타낸 그래프이다. 수막재배가 이루어지는 구간에서는 지하수 양수에 따른 지하수위 강하, 그리고, 양수가 이루어지지 않았을 때에는 지하수위가 회복되는 양상이 잘 나타나 있는 것을 알 수 있다. 지하수 양수가 계속되면서 최대 수위 강하량이 지속적으로 증가하여 최대 지하수 심도가 더 깊어지는 것이 관측된다. 반면, 수막재배가 이루어지지 않는 기간동안에는 지하수위가 회복되어 여름철 최고수위는 지표하 1 m까지 상승하였다. 따라서, 지하수위가 지표하 1.8 m보다 높게 형성되는 시기에는 아쉽게도 관측자료를 얻을 수가 없는 것이다. 2015년에 개발 보급된 G3 type 라이지미터는 이러한 G2 type의 단점을 보완한 장비이다.

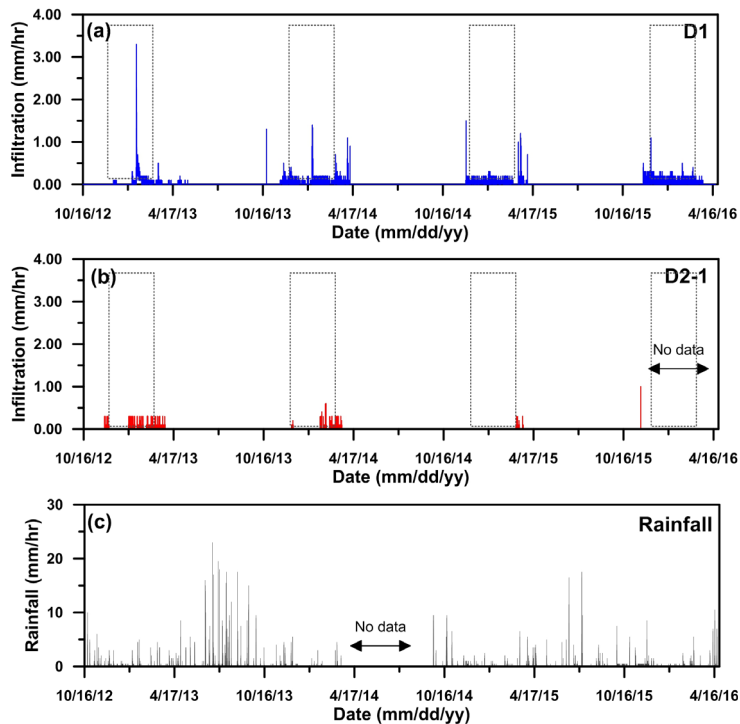


Fig. 4. Monitoring results of the infiltration rate (a) outside the greenhouse, (b) inside the greenhouse, and (c) rainfall. The dotted box indicates the period for the water curtain cultivation from December to February next year.

Table 3. The monthly infiltration in the study site (The figures in parentheses indicate the infiltration ratio to the total rainfall).

Monitoring Period (mm/yyyy)	Infiltration (mm)			Rainfall (mm)
	D1	D2-1	D3	
12/2012	3.9 (12.4%)	5.0 (8.8%)	-	31.5
01/2013	9.2 (29.7%)	12.0 (39.3%)	-	31.0
02/2013	127.5 (344.6%)	10.4 (31.3%)	-	37.0
03/2013	19.3 (41.1%)	7.9 (16.9%)	-	47.0
Subtotal	159.9 (109.1%)	35.3 (24.1%)		146.5
12/2013	27.5 (73.3%)	1.3 (3.5%)	-	37.5
01/2014	40.2 (804.0%)	0.0 (0.0%)	-	5.0
02/2014	35.7 (510.0%)	11.0 (161.8%)	-	7.0
03/2014	34.8 (68.1%)	10.9 (21.3%)	-	*51.1
Subtotal	138.2 (136.7%)	23.2 (22.9%)		101.1
12/2014	16.3 (79.5%)	0.0 (0.0%)	-	20.5
01/2015	28.8 (128.0%)	0.0 (0.0%)	-	22.5
02/2015	15.6 (69.3%)	0.0 (0.0%)	-	22.5
03/2015	36.3 (105.2%)	2.9 (6.6%)	-	34.5
Subtotal	97.0 (97.0%)	2.9 (2.9%)		100.0
12/2015	59.3 (98.8%)	-	26.0 (43.3%)	60.0
01/2016	62.5 (1,562.5%)	-	0.0 (0.0%)	4.0
02/2016	5.3 (17.1%)	-	12.4 (40.0%)	31.0
03/2016	-	-	18.6 (67.6%)	27.5
Subtotal	**127.1 (133.8%)	-	57.0 (46.5%)	122.5

*The rainfall data were from the Cheongju Meteorological Monitoring Station due to the Automatic Weather Monitoring sensor's breakdown.

**The values are the subtotals from December, 2015 to February, 2016.

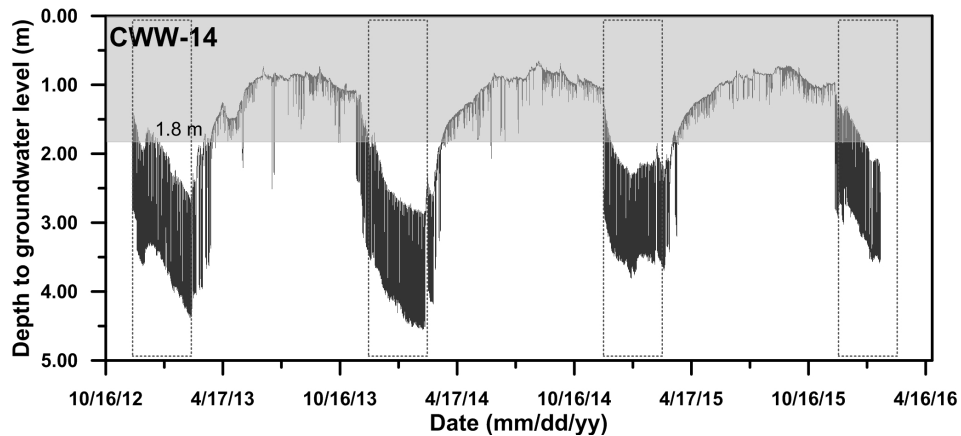


Fig. 5. Groundwater level variations at the monitoring well, CWW-14. The infiltration data were missing during the period that the depth to groundwater level is less than 1.8 m below land surface for the G2 type lysimeter indicated as the shaded area. The dotted box indicates the period for the water curtain cultivation from December to February next year.

앞서 언급했듯이 얇은 지하수 심도가 분포하는 지역에서는 G2 type의 라이지미터로 침투율을 측정하기가 어렵기 때문에, 이곳에도 G3 type의 라이지미터를 설치하여 자연상태에서 강수가 토양층을 통과하는 양을 측정할 필요가 있었다. D2-1지점은 토양수분 센서가 고장이 나서 새로이 라이지미터를 설치할 필요가 있었는데, 새로운 모델인 G3 type으로 교체하고 D2-1을 D2-2로 명칭을 변경하고, 2015년 11월 20일부터 침투율 관측을 시도하였다. 이 또한 설치과정에서 문제가 있어 아쉽게도 완전한 관측자료를 얻지 못했다. D3지점은 수막재배 지역에서는 다소 멀리 떨어진 지역으로 수막재배와는 관계가 없는 지역이다. 2015년 7월 31일 장비를 설치 하였으나, 마찬가지로 침투율 측정 센서 연결문제로 관측을 못하다가, 이후 장비를 보수하여 2015년 11월 20일부터 2016년 4월 21일까지는 관측자료를 얻을 수 있었다.

위와 같이 장비 또는 센서의 이상, 그리고, 지하수위가 상승하여 침투율 관측이 누락된 시기를 제외하고, 얻어진 자료를 월별로 정리하여 표 3에 나타내었다. 2012년 12월부터 2013년 3월까지의 D1과 D2-1에서 각각 159.9 mm, 35.3 mm의 침투량을 나타내었으며, 이 시기에 강수량은 146.5 mm였다. 월별 강수량 대비 침투량 비율은 D1에서 12.4~344.6%까지 분포하였으며, D2-1에서는 8.8~39.3%까지 분포하였다. 2012년부터 2015년도 12월부터 이듬해 2월까지의 수막재배 기간동안 침투량을 비교하여 보면, D1에서는 60.7~140.6 mm, D2-1에서는 0~27.4

mm로 그 차이가 매우 큰 것을 알 수 있다.

D2-1은 비닐하우스 내부에 위치하고 있어서 강수와는 관계없이 작물에 물을 대는 관개용수량에 따라 달라지기 마련이다. 비닐하우스 외부에 위치하고 있는 D1지점의 침투율 관측결과는 어느 정도 강수와 상관성을 보일 것으로 예상되었는데, 예상과는 다르게 강수에 무관한 양상을 보였다. 오히려 내린 강수량 총량보다도 더 많은 물이 침투되는 것도 관측된다. 이와 같은 현상은 수막재배에 의해 사용된 물이 비닐하우스 외부로 흘러나오면서 토양층 아래로 침투되기 때문으로 판단된다. 다른 시기에도 비슷한 양상을 나타내었는데, 2016년 1월에 D1에서의 침투량이 강수량 대비 1,562.5%에 달하기도 하였다. 반면, D2-1에서의 침투량은 2014년 12월부터 2015년 2월까지 전혀 없는 것으로 기록되었다. 이러한 시기가 대부분 수막재배 시기와 맞물려 있지만, 비닐하우스 내부와 외부만을 비교한다면, 비닐하우스 외부에서의 침투량은 비닐하우스 내부보다도 각 기간별 기준으로 4.5~33배 많았다. 이와 같은 차이는 수막재배에 사용된 물에 의한 영향과 강수량이 복합적으로 나타난 결과이다.

그림 6은 수막재배 지역이 아닌 곳에서의 침투량과 비교하기 위해 D1과 D3 지점에서 측정된 침투량 자료를 강수량과 함께 누적으로 나타낸 것이다. D3에서의 침투량 자료가 2015년 11월 20일부터 2016년 4월 21일까지 있으므로 상호 비교를 위해 기간을 맞추어서, 이 기간동안 강수량과 D1에서의 침투량

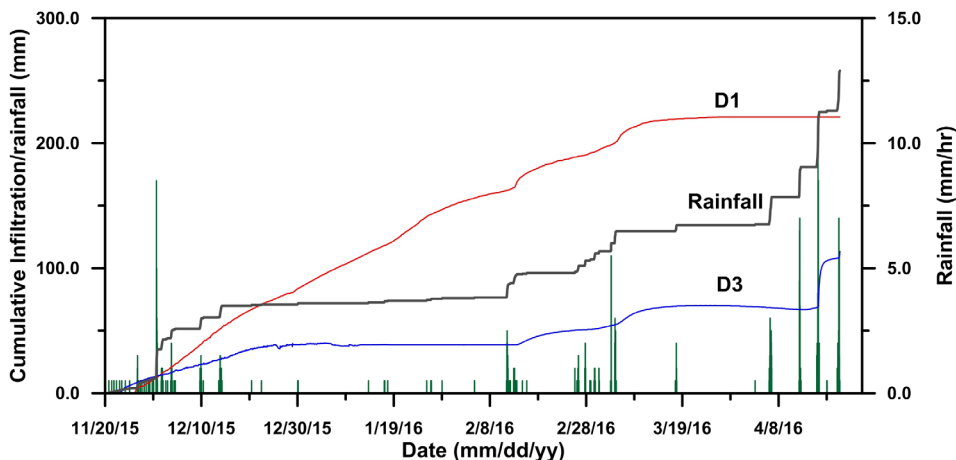


Fig. 6. Cumulative infiltration at the D1 and D3 location and rainfall. The bar graph is for the rainfall intensity in mm/hr.

을 누적 침투량/강수량으로 나타내었고, 시간당 강수량도 함께 나타내었다. 이 기간 동안 총 강수량은 258 mm가 내렸으며, D1과 D3에서의 누적 침투량은 각각 220.9 mm, 113.5 mm이었다. D1에서는 앞서 언급했듯이 수막재배에서 사용된 물이 흘러나오는 곳에 위치하다 보니 수막재배의 영향이 그대로 나타나고 있으며, 이러한 결과는 2015년 12월부터 2016년 2월 초까지 거의 선형적인 것을 알 수 있다. 반면, D3에서는 계단형의 누적 강수량 분포가 완전한 형태로 변한 것을 제외하고는 강수에 의한 영향이 잘 나타나고 있는 것을 알 수 있다. D1에서는 수막재배 기간동안 총 강수량보다도 더 많은 양의 물이 토양층 아래로 침투해 들어가고 있었고, D3에서는 누적침투량이 총강수량 대비 44.0%였다. 이와 같은 관측결과, 침투율은 현장 여건에 따라서 매우 다

르게 나타나며, 특히 수막재배 지역에서는 강수보다 수막재배 배출수 영향이 크다는 것이 관측결과 확인되었다.

4.3 강수량과의 상관성

일반적으로 토양수분 변동의 원인은 강수량이지만, 연구지역에서는 수막재배의 영향이 크게 나타나 있는 것을 알 수 있다. 침투율과 강수량과의 관계를 정량적으로 평가하기 위해 자기상관분석과 교차상관분석을 실시하였다(그림 7). 수막재배 기간과 아닌 기간을 나누어 분석을 실시하였는데, 그림 7(a)는 수막재배 기간인 2012년 12월 1일부터 2013년 2월 28일까지의 강수량과 비닐하우스 외부(D1)와 내부(D2-1)에서 관측된 침투율의 자기상관함수를 나타낸 것이고, 그림 7(b)는 2015년 11월 20일부터 2016년 4월

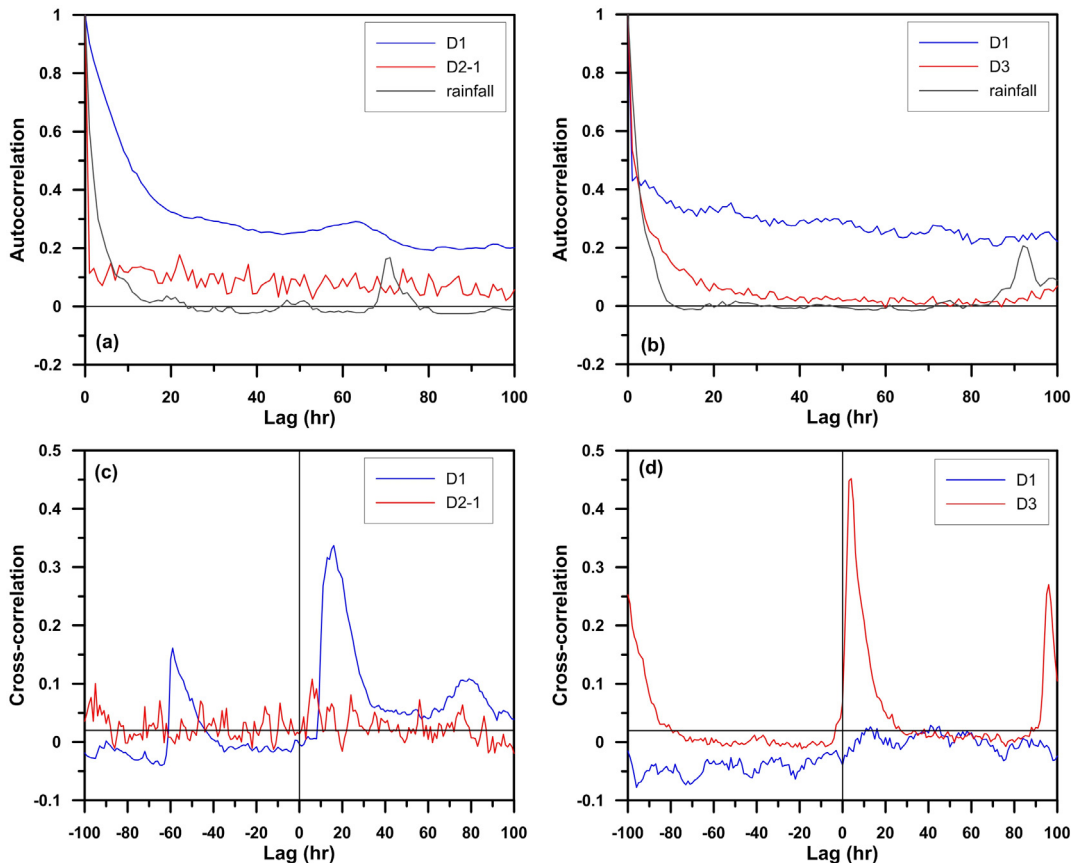


Fig. 7. Autocorrelation for the infiltration of (a) the D1, D2-1, and rainfall from Dec. 1, 2012 to Feb. 28, 2013, (b) the D1, D3, and rainfall from Nov. 20, 2015 to Apr. 21, 2016, and cross-correlation of the infiltration to the rainfall for (c) the D1 and D2-1 from Dec. 1, 2012 to Feb. 28, 2013, and (d) the D1 and D3 from Nov. 20, 2015 to Apr. 21, 2016.

21일의 기간동안 비닐하우스 외부에서 수막재배 영향을 받는 D1과 수막재배의 영향을 받지 않는 D3에서의 침투율 및 강수량의 자기상관함수를 나타낸 것

이다. 그림 7(a)와 그림7(b)에서 D1의 침투율 자료는 D2-1, D3의 침투율 자료와 강수량에 비하여 강한 선형성과 기억효과를 가지고 있는 것으로 나타난다.

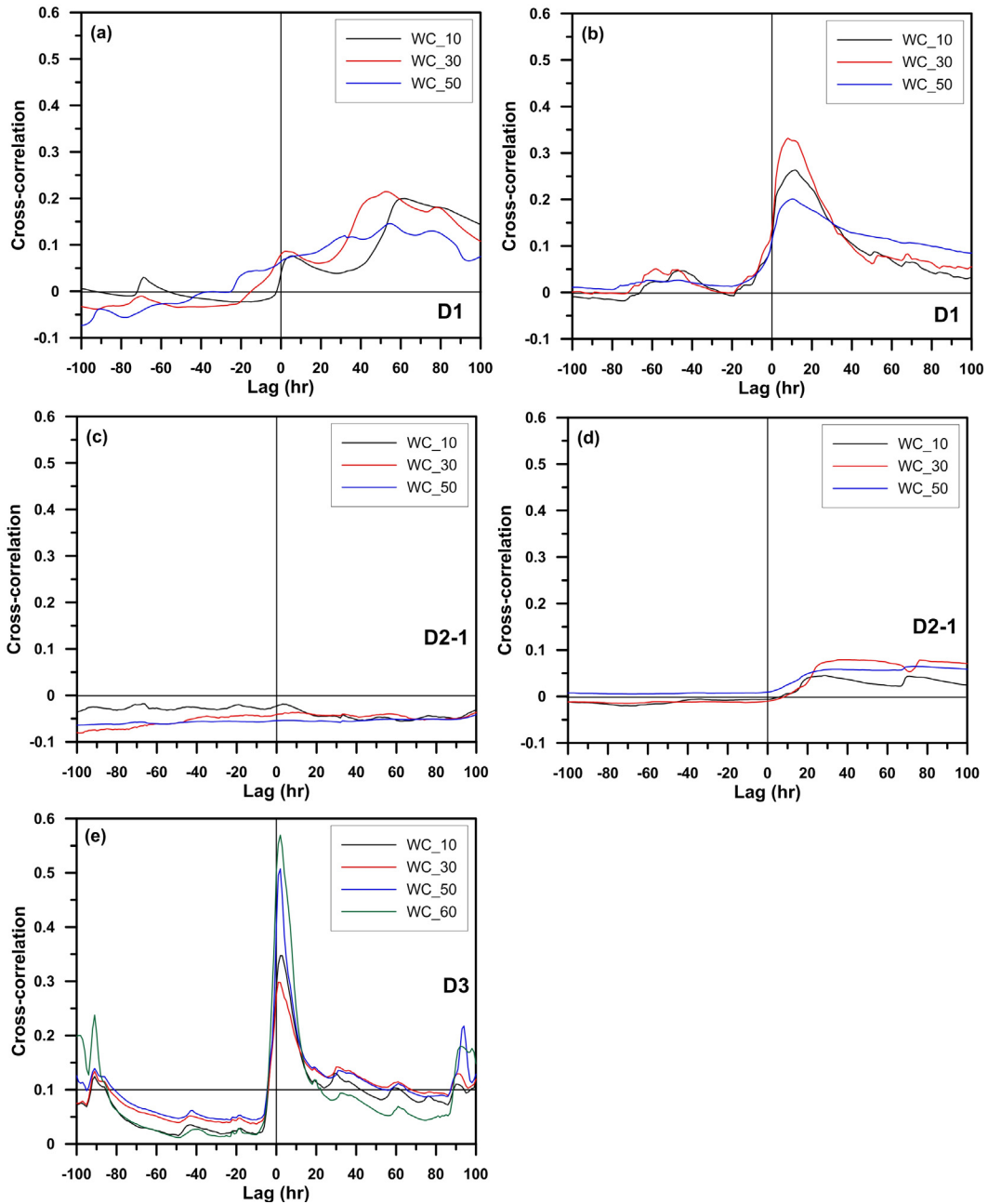


Fig. 8. Cross-correlation for the soil water contents to the rainfall at the various depths of the D1(a, b), D2(c, d), and D3(e) locations. The graphs, (a) and (c), are prepared during the water curtain cultivation operation season from Dec. 1, 2012 to Feb. 28, 2013, and (b) and (d) during the non-operation season from Mar. 1, 2013 to Nov. 30, 2013). The graph, (e), represents the cross-correlation of the soil moisture data to the rainfall from Nov. 20, 2015 to Apr. 21, 2016 at the D3 location.

그림 6에서도 D1의 수막재배 기간동안 침투율 자료가 선형성이 나타나는 것을 이미 확인한 바 있다.

그림 7(c)는 수막재배 기간인 2012년 12월 1일부터 2013년 2월 28일까지의 D1, D2-1 침투율 자료를 강수량에 대하여 교차상관분석을 실시한 것이다. D2-1의 침투율 자료는 강수량과 상관성이 나타나지 않으나, D1과는 지체시간 6시간에서 0.337이라는 비교적 높은 상관성이 나타나고 있는 것을 알 수 있다. D2-1은 비닐하우스 내부에 위치하고 있어 강수량과는 무관하며, D1은 비닐하우스 외부에 위치하여 강수량에 영향을 받고 있기 때문으로 추정된다. 그러나, 그림 7(d)에서 2015년 11월 20일부터 2016년 4월 21일까지의 기간동안 강수량과 D1 침투율 자료 간의 교차상관분석 결과를 보면 강수와의 상관성이 거의 나타나지 않는데, 이 시기에는 수막재배에 의해 사용된 물이 공급되어 이러한 효과가 강수보다도 더 크기 때문이다. 수막재배의 영향을 받지 않는 비닐하우스 외부에 노출된 D3 침투율은 강수량과 지체시간 4시간에서 0.452의 비교적 높은 교차상관값을 나타내었다.

그림 8은 토양수분과 강수량간의 교차상관을 나타낸 그림이다. D1과 D2-1은 2012년 12월 1일부터 2013년 2월 28일까지의 수막재배 기간과, 수막재배가 이루어지지 않는 2013년 3월 1일부터 2013년 11월 30일까지 기간으로 나누어 분석을 실시하였다. 그림 8(a)에서 D1의 강수량에 대한 최대 교차상관계수는 지표하 10 cm, 30 cm, 50 cm에서 각각 지체시간 61시간, 52시간, 55시간에서 0.200, 0.214, 0.146로 나타났다. 앞서 언급했듯이 수막재배 기간동안 D1에서의 침투율이 강수 뿐만 아니라 수막재배에 사용된 물 공급에도 의존하고 있어서 토양수분과 강수량을 직접 비교하는 것은 무리일 수 있을 것이다. 반면, 그림 8(b)에서 수막재배 기간 이외의 기간에 대한 D1에서의 토양수분과 강수량과는 매우 높은 교차상관계수를 나타내었다. D1의 지표하 10 cm, 30 cm, 50 cm에서 최대 교차상관계수는 각각 지체시간 11시간, 10시간, 10시간에서 0.263, 0.327, 0.201이었다. 이번 관측결과에서는 토양 깊이에 따른 지체시간의 차이는 거의 나타나지 않았다. 교차상관계수는 지표아래에서부터 더 깊이 내려갈수록 감소하는 것이 일반적인데, D1에서는 10 cm 깊이에서보다 30 cm 깊이에서 최대치를 나타내었다. 이와 같은 결

과는 센서가 위치하는 지점과 지표에서부터 수리적인 연결성 차이에 의해서, 즉 수리적인 불균질성으로부터 나타난다고 생각된다. D1 지역에서 50 cm의 깊이 토양층을 강수가 침투하는데 걸리는 시간을 최대 교차상관계수가 나타나는 지체시간인 10시간이라고 가정한다면, 대략적인 침투속도는 5 cm/hr가 된다.

비닐하우스 내부에 위치해 있는 D2-1에서는 수막재배기간이나 수막재배가 이루어지지 않는 기간 모두 강수에 대한 상관성은 거의 나타나고 있지 않다(그림 8(b)와 8(c)). 그림 8(e)는 D3에서 2015년 11월 20일부터 2016년 4월 21일까지의 기간동안 토양수분과 강수량과의 교차상관계수를 나타낸 그림이다. 이 지역은 D1에서처럼 수막재배에 의한 영향이 없고, 토양자체도 침투가 용이한 사질토로 구성되어 있기 때문에 강수에 대한 반응은 매우 높다. 분석결과, D3의 지표하 15 cm, 30 cm, 45 cm, 60 cm 깊이에서의 최대 교차상관계수는 각각 지체시간 2시간에서 0.347, 0.298, 0.507, 0.507로 높은 상관성을 보여주었다. 깊이별로 최대 교차상관계수의 지체시간 차이도 나타나지 않았다. D1에서와 마찬가지로 D3에서의 깊이별 교차상관계수는 15 cm, 30 cm 깊이보다도 45 cm, 60 cm 깊이에서 보다 높게 나왔는데, 토양의 수리적 불균질성에 의해 반응성이 역전되기도 하고, 모니터링 간격이 1시간으로서 구간별 차이를 구별해 내기에는 너무 빠르게 물이 침투되고 있는 것이 아닌지 생각된다. D3 지점의 60 cm 토양층을 강수가 통과하는 데 걸리는 시간을 최대 교차상관계수가 나타나는 지체시간인 2시간이라고 본다면, 대략적인 침투율은 30 cm/hr이 되어 D1지점보다 침투능이 6배 정도 높게 나타났다.

5. 결 론

이번 연구는 수막재배 지역에서 비닐하우스 시설이 강수의 토양내 침투량에 미치는 영향을 평가하기 위해 시도되었다. 토양수분센서와 라이지미터를 이용하여 깊이별로 토양수분 변화 및 침투율을 장기간 동안 모니터링 하였다. 연구지역은 충청북도 청주시 상당구 가덕면 상대리 일대의 수막재배 시설이 밀집되어 있는 지역이며, 관측기간은 2012년 10월부터 2016년 4월까지이다. 수막재배 지역에서는 비닐하

우스 시설 내부와 외부에 각각 1지점씩, 그리고, 수막재배와는 거리가 먼 곳에서도 추가적으로 관측이 이루어졌다. 토양수분과 침투율 시계열 자료에 대한 변동양상을 파악하고, 강수량과 상관성을 파악하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

토양수분은 수막재배 지역에서 비닐하우스 내·외부에서 강수량의 토양내 침투 또는 비닐하우스 차단에 의해 변동 양상이 상이하게 나타났다. 비닐하우스 내부에서 관측된 토양수분은 수막재배 기간(겨울철) 동안 변동성이 그리 크지 않으며, 강수에 대한 반응도 나타나지 않았다. 수막재배가 이루어지지 않는 여름철에도 강수에 대한 상관성이 낮게 나타났는데, 이는 비닐하우스 시설에 의해 강수가 차단되었기 때문으로 판단된다. 반면, 비닐하우스 외부에서 관측된 토양수분은 강수에 대한 반응이 잘 나타나고 있으며, 그 외에도 수막재배에 이용되고 유출되는 물에 의해서도 영향을 받는 것이 관측되었다. 수막재배 지역이 아닌 곳에서 관측된 토양수분 변화는 강수량에 직접적으로 반응되는 매우 높은 상관성을 보이고 있어 수막재배 지역의 관측결과와 잘 비교된다.

침투율 관측결과도 토양수분 관측결과와 마찬가지로, 수막재배 지역에서는 강수와 수막재배시 사용된 물에 의한 침투효과가 잘 나타났다. 수막재배 시 비닐하우스 내부에서 침투되는 양은 0~27.4 mm인데, 비닐하우스 외부에서 침투되는 양은 60.7~140.6 mm로서 그 차이가 매우 컸다. 특히 수막재배 시 사용되고 남은 물에 의한 영향을 받는 곳에서는 강수량 보다 더 많은 양의 물이 토양층으로 침투할 수 있음을 확인하였다. 수막재배 지역 이외의 지역에서는 2015년 12월부터 2016년 3월까지 월별로 강수량 대비 0~67.6%(평균 51.3%) 정도 침투되는 것으로 나타났다.

교차상관분석을 통해 수막재배지역 비닐하우스 내·외부의 토양수분함량과 침투율 차이를 뚜렷하게 비교할 수 있었으며, 여기에서 강수량, 비닐하우스 차단 효과, 수막재배에 사용된 물이 침투되는 효과 등이 관여되어 상관계수는 달라졌다.

금번 연구는 수막재배 지역에서 물이 토양층으로의 침투하는 현상을 장기간 토양수분과 침투율 자료를 이용하여 최초로 평가하였다는데 의의가 있으며, 관측장비 및 센서의 고장에 의한 자료 누락이 많았다는 점, 장비설치 시 자연적인 토양층을 교란시킴

으로써 자연상태를 그대로 보존하지 못한 점 등은 한계로 작용한다. 향후, 이를 보완하여 양질의 자료를 축적한다면, 물수지 분석, 지하수 함양량 평가 및 유동 분석 등 수문학적 평가에 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

사 사

이 연구 논문은 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 물관리연구사업(11기술혁신 C05)에 의한 '수변 지하수 활용 고도화' 연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 세부과제 "수변 총적층 지하수위 복원 기술"의 연구 결과이다. 본 논문을 자세히 검토해 주시고, 유익한 조언을 해주신 익명의 심사위원과 이화여자대학교 이정훈 교수께 감사드립니다.

REFERENCES

- Ahn, S.R., Park, G.A., Jang, C.H. and Kim, S.J., 2013, Assessment of Climate Change Impact on Evapotranspiration and Soil Moisture in a Mixed Forest Catchment Using Spatially Calibrated SWAT Model. *Journal of Korea Water Resources Association*, 46(6), 569-583.
- Davis, J.C., 1986, *Statistics and data analysis in geology*. John Wiley & Sons, 2nd Ed., 646 p.
- Decagon Devices, Inc., 2003, *Drain Gauge Model G2 Operator's manual*. version 5, 36 p.
- Decagon Devices, Inc., 2015, *Drain Gauge G3 Operator's manual*. 38 p.
- Decagon Devices, Inc., 2016a, *EC-5 Soil Moisture Sensor Operator's manual*. 19 p.
- Decagon Devices, Inc., 2016b, *5TE Soil Moisture Sensor Operator's manual*. 23 p.
- Gwak, Y.S. and Kim, S.H., 2012, Soil evaporation evaluation using soil moisture measurements at a hillslope on a mountainous forest. *Journal of Korea Water Resources Association*, 45(6), 557-568.
- Gwak, Y.S., Kim, S.H. and Kim, S.J., 2013, Comparison of Soil Evaporation Using Equilibrium Evaporation, Eddy-Covariance and Surface Soil Moisture on the Forest Hillslope. *Journal of the Environmental Sciences*, 22(1), 119-129.
- Ha, K., Ko, K.-S., Koh, D.-C., Yum, B.-W. and Lee, K.-K., 2006, Time series analysis of the responses of the groundwater levels at multi-depth wells according to the river stage fluctuations. *Economic and Environmental*

- Geology, 39(3), 269-284.
- Hahn, J., 2015, Hydrogeology and groundwater modeling. Naeha Publishing Co., 722 p.
- Kang, C., Kim, S., Jung, S. and Kim, W., 2004, Development of Soil Moisture Monitoring System for Effective Soil Moisture Measurement for Hillslope Using Flow Distribution Algorithm and TDR. Journal of Korea Water Resource Association, 37(1), 31-41.
- KIGAM, 2010, Integrated technologies in securing and applying groundwater resources to cope with earth environmental changes. GP2009-009-01-2010(2), 347 p.
- KIGAM, 2014, Groundwater level restoration of riverside porous aquifer. Land Transport and Maritime R&D 3rd year Report, 248 p.
- Kim, H.-J., 2010, A study on geological and hydrogeological characteristics in relation to the formation of mountain wetland in Mt. Jang, Busan City. Master's thesis, Pusan National University, 164 p.
- Kim, J., Lee, J., Cheong, T., Kim, R. Koh, D., Ryu, J. and Chang, H., 2005, Use of times series analysis for the identification of tidal effect on groundwater in the coastal area of Kimje, Korea. Journal of Hydrology, 300, p. 188-198.
- 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. and Lee, K.K., 2000, Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system. Journal of Hydrology, 229, 190-201.
- Moon, S.H., Ha, K., Kim, Y. and Yoon, P., 2012, Analysis of groundwater use and discharge in water curtain cultivation areas: Case study of the Cheongweon and Chungju areas. Journal of Engineering Geology, 22(4), 387-398.
- Park, J., Seo, I. and Sunu, J., 1999, Study on Characteristic of Transient Solute Transport in the Vadose Zone by Using TDR: (1) Relationship between Water Content and Relative Electrical Conductivity. Journal of Korea Water Resource Association, 32(6), 741-749.
- Schmugge, T.J., Jackson, T.J. and McKim, H.L., 1980, Survey of methods for soil moisture determination. Water Resources Research, 16(6), 961-979.
- Son, M., Kim, S., Kim, D., Lee, D. and Kim, J., 2007, Univariate Analysis of Soil Moisture Time Series for a Hillslope Located in the KoFlux Gwangneung Supersite. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 9(2), 88-99.
- Topp, G.C., 2003, State of the art of measuring soil water content, Hydrological Processes. 17, 2993-2996.
- Ward, A.D. and Elliot, W.J., 1995, Environmental Hydrology. Lewis Publishers, 475 p.
- Zegelin, S., 1996, Soil Moisture Measurement, Field Measurement Techniques in Hydrology-Workshop Notes. Corpus Christi College, Clayton, C1-C22.

Received : May 31, 2016

Revised : June 23, 2016

Accepted : June 23, 2016