

건조지역 원격탐사 footprint 내 토양수분의 시공간적 변동성 분석

Spatio-temporal Variability of Soil Moisture within Remote Sensing Footprints in Semi-arid Area

황교택* · 조훈식** · 이승오*** · 최민하****

Hwang, Kyotaek · Cho, Hun sik · Lee, Seung Oh · Choi, Minha

Abstract

Soil moisture is a key factor to control the exchange of water and energy between the surface and the atmosphere. In recent, many researches for spatial and temporal variability analyses of soil moisture have been conducted. In this study, we analyzed the spatio-temporal variability of soil moisture in Walnut Gulch Experimental Watershed, Arizona, U.S. during the Soil Moisture Experiment 2004 (SMEX04). The spatio-temporal variability analyses were performed to understand sensitivity of five observation sites with precipitation and relationship between mean soil moisture, and its standard deviation and coefficient of variation at the sites, respectively. It was identified that log-normal distribution was superior to replicate soil moisture spatial patterns. In addition, precipitation was identified as a key physical factor to understand spatio-temporal variability of soil moisture based on the temporal stability analysis. Based on current results, higher spatial variability was also observed which was agreed with the results of previous studies. The results from this study should be essential for improvement of the remotely sensed soil moisture retrieval algorithm.

Keywords : soil moisture, spatio-temporal variability, SMEX04, temporal stability analysis

요 지

지표에서의 토양수분은 수문학적, 생태학적 과정에서 지표면과 대기 사이의 물과 에너지의 교환을 조절하는 매우 중요한 인자로서 최근 이의 시공간적 변동성에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 연구에서는 2004년 6-9월에 걸쳐 추진되었던 Soil Moisture Experiment 2004(SMEX04) 프로젝트를 통하여 측정된 미국 Arizona 주의 Walnut Gulch Experimental Watershed 유역에 대한 토양수분 데이터를 이용하여 건조 지역에서의 토양수분의 시공간적 변동성을 통계적 방법으로 해석하였다. 시간 안정도를 분석하여 각 지점의 강우사상에 대한 민감도를 분석하였고 공간 변동성 분석을 통해 유역 내 강우관측소 주변 5개 지점을 대상으로 각 지점의 평균토양수분과 이의 표준편차 및 변동계수와와의 관계를 파악하였다. 연구 결과, 대상지역에서 토양수분의 공간적인 분포는 대수정규분포가 적합하다는 것과 건조지역에서 보이는 공통된 특징인 높은 공간적 변동성을 확인할 수 있었다. 또한 시간 안정도 분석을 통해 지점별로 시간과 강우 발생에 대해 민감한 정도를 분석하였으며, 강우사상이 토양수분에 큰 영향을 주는 인자인 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 도출된 토양수분의 시공간적 변동 특성은 차후 인공위성 토양수분 데이터의 retrieval algorithm을 개선하는데 도움이 될 것이다.

핵심용어 : 토양수분, 시공간적 변동성, SMEX04, 시간 안정도 분석

1. 서 론

토양수분은 증발되면서 대기 중에 수증기를 공급하고 응결되면서 잠열을 방출하는 등 물과 에너지의 순환에 큰 영향을 주어 전체적으로는 강우, 유출, 침투, 저류 등 다른 인자에 큰 영향을 미치는 등 수문학적으로 중요한 인자이다 (Heathman *et al.*, 2009). 따라서 지중의 토양이 함유하고 있는 수분량의 변화 양상을 파악하는 것은 수문학, 기상학적

거동에 큰 영향을 주어 전체적인 물순환 과정을 이해하는데 중요한 역할을 한다. 하지만 토양수분은 토질, 강우, 토지 피복 상태, 고도와 경사 등 수많은 인자들의 영향을 받기 때문에 이를 단적으로 산출해내기는 어려우며, 이 때문에 시간과 공간에 따른 토양수분의 분포 경향을 통계적으로 분석하여 파악하는 과정이 선행되어야 한다(Famiglietti *et al.*, 1998; Qiu *et al.*, 2001).

토양수분은 지표면으로부터의 깊이에 따라 다른 양상을 보

*한양대학교 공과대학 건설환경공학과 석사과정 (E-mail : khwang@hanyang.ac.kr)

**홍익대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 (E-mail : arasumohe@gmail.com)

***정희원 · 홍익대학교 공과대학 토목공학과 조교수 (E-mail : seungoh.lee@hongik.ac.kr)

****정희원 · 교신저자 · 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 조교수 (E-mail : mchoi@hanyang.ac.kr)

이며, 이 때문에 한 지점에 대한 토양수분을 깊이별로 여러 종류의 표본에 대해 측정하여 이용한다. 토양수분은 지표면으로부터 깊은 곳에 위치할수록 시간과 공간에 대해 안정된 분포를 보이지만 지표면에 가까워질수록 토지 피복 현황과 기상 인자 등 외부 환경의 영향을 많이 받게 되면서 그 변동성이 다양한 모습을 보이게 된다(Choi *et al.*, 2007; Qiu *et al.*, 2001).

현재 미국과 유럽 등지에서는 광범위한 지역을 대상으로 토양수분에 대한 통계적 분석을 활발하게 추진하고 있다. Famiglietti *et al.*(1999)은 미국 Oklahoma 중부 지방에서의 연구를 통해 지점의 평균 토양수분 변화량이 토양과 식생의 종류, 강우의 변화에 대해 통계적으로 일정한 차이를 보였고, 토양수분 함유량이 감소함에 따라 표준편차, 변동계수, 왜곡도 및 첨도가 증가함을 보였다. Qiu *et al.*(2001)은 중국 Loess Plateau 건조 지역에 대한 공간 변동성 분석을 통해 강우강도가 높고 토양수분량이 클수록 낮은 공간 변동성을 가지게 되는 것과 토지 이용과 지형 등 외부 환경 조건이 토양수분의 공간적 분포에 영향을 준다는 것을 확인하였다.

Choi *et al.*(2007)은 미국 Iowa 주 Walnut Creek Watershed의 원격탐사 격자에서 여러 깊이에서의 토양수분의 시공간적 분포를 통계적으로 분석한 결과, 깊이에 따른 평균 토양수분과 토양수분 변동계수 값이 지수 관계를 가지고 있음을 입증하였다. Brocca *et al.*(2009)은 이탈리아 중부 지역에서 각 지점에서의 시간안정도를 평가하여 시공간적 거동에 영향을 주는 인자를 해석하였다. Heathman *et al.*(2009)은 미국의 Southern Great Plains 지역에 대한 시공간적 통계 분석을 통해 극한강우시에 지표 근처의 토양수분량이 시간적으로 안정된 모습을 보이는 반면, 깊은 곳에서의 토양 수분은 시간적으로 안정된 경향을 나타내지 않는다는 것을 보였다.

본 연구에서 이용한 데이터는 2004년 6~9월에 걸쳐 진행되었던 Soil Moisture Experiment 2004(SMEX04) 프로젝트의 자료로, 본 연구의 대상 지역인 미국 Arizona 주 Walnut Gulch Experimental Watershed(WGEW)와 멕시코 Sonora 지역의 토양수분량을 Hydra Probe를 이용하여 직접 관측한 값이다. 이를 Aqua 인공위성에 설치된 AMSR-E 토양수분 관측 센서를 이용하여 원격탐사한 값과 비교·분석하여 현재 토양수분의 원격탐사에 쓰이고 있는 retrieval algorithm의 정확도를 검증하고 개선하기 위해 추진되었다(Cosh *et al.*, 2008).

본 연구에서는 4달에 걸친 프로젝트 기간 동안 Hydra Probe를 이용하여 원격탐사 footprint 내에서 직접 관측한 데이터를 바탕으로 통계 분석을 실시함으로써 건조 지역 토양수분 데이터의 시간적, 공간적 분포 경향을 파악하고자 하였다. 여기서 원격탐사 footprint는 Merriam-Webster's Online Dictionary에 따르면 “the area on a surface covered by something”, 즉 탑재된 센서에 의해 스캔된 지표면을 일컫으며 일반적으로 한 개의 원격탐사 이미지 개체에 반영이 되는 대상지역 전체를 뜻한다. 이 밖에도 대상지역의 측정기간 전체를 반영할 수 있는 분포 형태를 결정하여 연구 지역의 특성을 알아내고 비슷한 조건을 가지고 있는 지역과의 비교를 통해 토양수분에 영향을 주는 주요 인자에 대해 규명하고자 하였다. 본 연구와 같이 특정한 기후 조건을 가지고

있는 대상 지역에 대한 토양수분 자료의 분포 형태가 결정된다면 이를 데이터베이스화하여 원격탐사된 토양수분 데이터에 대해 검증, 분석하는데 이용함으로써 원격탐사 알고리즘에 대한 시공간적 적용성을 검토 및 개선할 수 있다. 또한 여러 방법으로 확립된 데이터는 수문 모형의 주 입력자료로 활용할 수 있게 될 것이며, 이 정보를 바탕으로 하여 강이나 저수지 등을 효과적으로 관리할 수 있고 농작물의 재배와 토양자원의 보존 등 관련 사업의 추진에 유용하게 쓰일 것이다(Starks *et al.*, 2003).

2. 연구대상 및 방법

2.1 SMEX04 자료 및 WGEW 지역 특성

본 연구는 미국 Arizona 주의 Walnut Gulch Experimental Watershed(WGEW) 지역을 대상으로 진행되었다. 이 지역은 2004년에 추진된 Soil Moisture Experiment 2004(SMEX04) 프로젝트를 통하여 Fig. 1과 같이 총 19개 관측지점에 대해 5 cm 깊이에서 측정된 토양수분 함유량을 제공하고 있으며, 본 연구에서는 이 중 표기된 5개 지점(RG_003, RG_014, RG_018, RG_057, RG_069)의 데이터를 이용하여 통계분석을 실시하였다. 대상 지역은 위도 31.112~31.422°N, 경도 109.718~110.239°W에 걸쳐 분포되어 있으며 Chihuahua 사막과 Sonora 사막 사이에 위치해 있어 이 지역을 중심으로 약 600,000 km²가 건조 지역으로 이루어져 있다. Table 1에서 보는 바와 같이 고도는 해발 1,250~1,640 m에 위치해 있으며 토양 형태는 대부분 양토(loam)로 이루어져 있다. 식생은 관목(shrub)이 전 지역의 2/3을 뒤덮고 있으며 대부분 초원(grassland) 형태로 구성되어 있다. 연평균 강우량은 350 mm이고 강우기간은 1년에 53일 가량 되며, 계절적 분포 경향은 우리나라와 비슷한 모습을 보여 우기인 7~9월에 연강우량의 60%가 집중된다(Soil Moisture Experiments in 2004).

2.2 평균토양수분량 및 강우 분포

Fig. 2는 5개 대상 지점에서의 관측기간에 따른 평균 토양수분량과 강우량의 분포를 나타낸 시계열 그래프이다. 총 122일의 관측기간 중 30번 내외의 강우사상이 관측되었으며 강우가 없는 기간에는 5% 미만으로 평균토양수분량이 유지되었다. 7월 중순에서 8월 중순까지(DOY 195~229) 강우가 집중적으로 이어졌으며, 9월 중순(DOY 262)에 5개 지점에

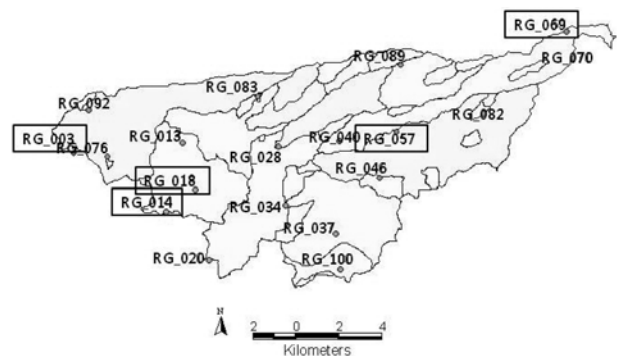


Fig. 1 The Walnut Gulch Experimental Watershed with locations of each surface soil moisture sensor (Soil Moisture Experiments in 2004)

Table 1. Basic Soil Properties of the Observation Sites (Soil Moisture Experiments in 2004)

Observation Site #	Elevation (m)	Soil Type	Vegetation Cover
RG_003	1,253	Off watershed but sandy	shrub
RG_014	1,373	Chiricahua very gravelly clay loam	shrub
RG_018	1,358	Shiefflin very stony loamy sand	shrub
RG_057	1,462	Tombstone very gravelly fine sandy loam	shrub
RG_069	1,640	Blacktail gravelly sandy loam	grass

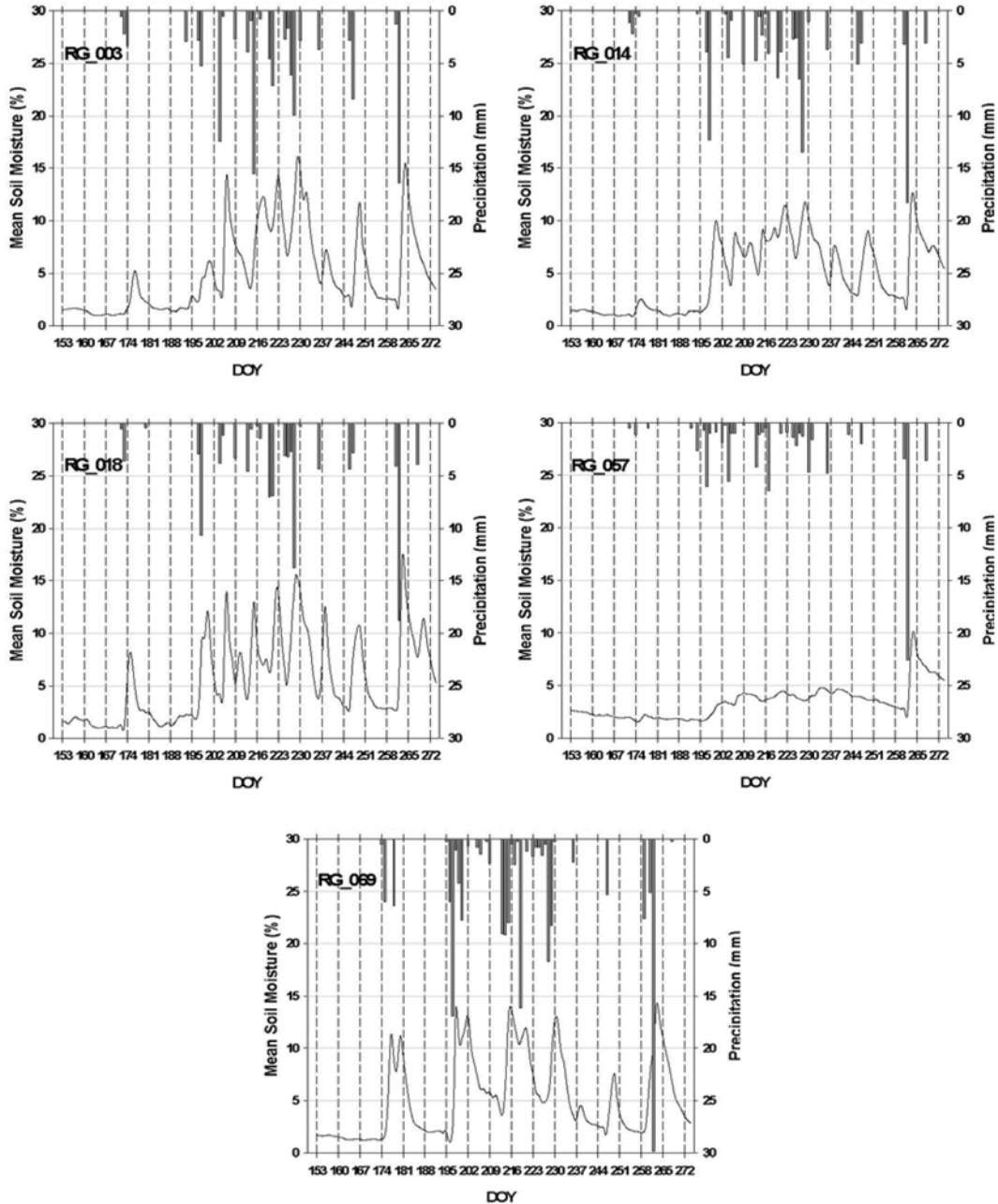


Fig. 2 Distribution of the mean soil moisture and precipitation at each site

서 가장 큰 강우량을 기록하였다. RG_003과 RG_014에서는 강우 후 평균토양수분량이 감소하는데 걸리는 시간은 평균 1주일 정도 소요되었으며 RG_018과 RG_069의 경우 토양수분량의 변동이 강우사상에 민감하게 반응하고 평균토양수분량의 감소 과정도 2~3일 내외로 빠르게 진행되었다. RG_057에서의 강우 관측일수는 34일로 다른 지역보다 많은 일수를 보였지만 강우량 자체가 적었기 때문에 집중호우가 발생하였던 9월 중하순(DOY 258~274)을 제외하고는 5%

미만의 값을 계속 유지하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 통계분포 분석

Table 1은 5개 지점에 대한 공간 통계 분석 결과를 정리한 것이다. 5개 지점에 대한 토양수분량의 분포를 예측하는데 활용하기 위한 정규성(normality) 분석은 Probability

Table 2. Summary of field statistics and PPCC test

Date (Day of Year)	Number of sites	Mean (%)	Standard Deviation (%)	Coefficient of Variation	Skewness	Kurtosis	PPCC		Fitness of PDF
							Normal	Log-normal	
153	5	2.32	1.23	0.53	1.52	1.82	Reject	Accept	LN
154	5	2.30	1.22	0.53	1.62	2.24	Reject	Accept	LN
155	5	2.24	1.23	0.55	1.59	2.14	Reject	Accept	LN
157	5	2.45	1.24	0.51	1.81	3.37	Reject	Accept	LN
158	5	2.35	1.24	0.53	1.80	3.23	Reject	Accept	LN
159	5	2.26	1.20	0.53	1.82	3.33	Reject	Accept	LN
160	5	2.19	1.20	0.55	1.83	3.34	Reject	Accept	LN
161	5	2.18	1.20	0.55	1.87	3.63	Reject	Accept	LN
162	5	1.98	1.13	0.57	1.66	2.45	Accept	Accept	N/LN
163	5	1.87	1.15	0.61	1.56	1.96	Reject	Accept	LN
164	5	1.84	1.16	0.63	1.49	1.67	Reject	Accept	LN
165	5	1.85	1.17	0.63	1.48	1.63	Accept	Accept	N/LN
167	5	1.84	1.12	0.61	1.66	2.50	Reject	Accept	LN
168	5	1.73	1.13	0.65	1.60	2.23	Reject	Accept	LN
169	5	1.77	1.13	0.64	1.68	2.63	Reject	Accept	LN
170	5	1.75	1.09	0.62	1.64	2.47	Reject	Accept	LN
171	5	1.81	1.11	0.61	1.66	2.53	Reject	Accept	LN
172	5	1.86	1.09	0.59	1.73	2.84	Reject	Accept	LN
173	5	1.70	1.09	0.64	1.71	2.85	Reject	Accept	LN
174	5	2.82	1.99	0.70	0.92	-1.46	Accept	Accept	N/LN
175	5	3.66	2.83	0.77	1.37	1.10	Accept	Accept	N/LN
176	5	4.16	1.88	0.45	-0.33	-2.65	Accept	Accept	N/LN
177	5	4.86	3.76	0.77	1.69	2.94	Reject	Accept	LN
178	5	3.96	2.97	0.75	1.65	2.59	Reject	Accept	LN
179	5	3.78	2.69	0.71	1.41	1.64	Accept	Accept	N/LN
180	5	4.23	4.02	0.95	1.86	3.47	Reject	Accept	LN
181	5	3.94	3.22	0.82	1.62	2.44	Reject	Accept	LN
182	5	3.23	2.28	0.71	1.31	0.86	Accept	Accept	N/LN
183	5	2.60	1.56	0.60	0.67	-2.02	Accept	Accept	N/LN
184	5	2.21	1.20	0.54	0.45	-2.82	Accept	Accept	N/LN
185	5	2.03	1.12	0.55	0.60	-1.32	Accept	Accept	N/LN
187	5	2.13	1.08	0.51	1.45	2.19	Accept	Accept	N/LN
188	5	1.99	1.02	0.52	1.33	1.81	Accept	Accept	N/LN
189	5	1.98	0.99	0.50	1.58	2.76	Accept	Accept	N/LN
190	5	2.04	1.06	0.52	1.57	3.21	Reject	Accept	LN
191	5	2.30	1.22	0.53	1.82	3.66	Reject	Accept	LN
192	5	2.37	1.23	0.52	1.95	4.13	Reject	Accept	LN
193	5	2.40	1.27	0.53	1.85	3.75	Reject	Accept	LN
194	5	2.36	1.29	0.55	1.98	4.15	Reject	Accept	LN
195	5	2.30	1.27	0.55	1.87	3.79	Reject	Accept	LN
197	5	2.78	1.50	0.54	1.93	3.88	Reject	Accept	LN
198	5	7.30	4.64	0.64	0.21	-1.26	Accept	Accept	N/LN
199	5	8.07	3.52	0.44	-1.39	1.40	Accept	Reject	N
200	5	9.62	3.81	0.40	-1.97	4.01	Reject	Reject	-
201	5	9.08	3.81	0.42	-0.88	0.70	Accept	Reject	N
202	5	8.15	3.86	0.47	0.09	-1.26	Accept	Accept	N/LN
203	5	6.39	2.81	0.44	0.40	-1.82	Accept	Accept	N/LN

Table 2. Summary of field statistics and PPCC test

Date (Day of Year)	Number of sites	Mean (%)	Standard Deviation (%)	Coefficient of Variation	Skewness	Kurtosis	PPCC		Fitness of PDF
							Normal	Log-normal	
204	5	5.72	2.31	0.40	0.42	-2.45	Accept	Accept	N/LN
205	5	5.24	1.87	0.36	0.35	-2.89	Accept	Accept	N/LN
206	5	10.52	7.05	0.67	0.82	-0.12	Accept	Accept	N/LN
207	5	9.23	5.53	0.60	1.41	2.40	Accept	Accept	N/LN
208	5	8.45	5.31	0.63	1.86	3.80	Reject	Accept	LN
209	5	7.79	5.27	0.68	2.09	4.49	Reject	Reject	-
210	5	7.84	4.39	0.56	1.73	3.32	Reject	Accept	LN
211	5	8.08	4.19	0.52	1.47	2.59	Accept	Accept	N/LN
212	5	6.59	3.45	0.52	1.68	2.59	Reject	Accept	LN
213	5	5.44	2.76	0.51	1.84	3.33	Reject	Reject	-
214	5	6.70	2.68	0.40	0.63	0.06	Accept	Accept	N/LN
215	5	10.91	4.98	0.46	-0.71	0.58	Accept	Accept	N/LN
216	5	10.33	5.15	0.50	0.04	-0.74	Accept	Accept	N/LN
218	5	9.29	4.71	0.51	0.73	0.80	Accept	Accept	N/LN
219	5	9.55	4.55	0.48	0.56	1.09	Accept	Accept	N/LN
220	5	9.37	4.78	0.51	0.74	-0.13	Accept	Accept	N/LN
221	5	9.95	4.21	0.42	0.14	0.41	Accept	Accept	N/LN
222	5	11.10	4.80	0.43	-0.21	0.13	Accept	Accept	N/LN
223	5	11.61	6.58	0.57	0.72	0.48	Accept	Accept	N/LN
224	5	9.48	5.78	0.61	1.41	2.38	Accept	Accept	N/LN
225	5	8.31	5.34	0.64	1.86	3.68	Reject	Accept	LN
226	5	7.24	4.60	0.64	1.98	4.12	Reject	Accept	LN
227	5	8.77	5.85	0.67	0.57	-2.92	Accept	Accept	N/LN
228	5	11.04	7.09	0.64	0.70	-0.28	Accept	Accept	N/LN
229	5	12.41	6.95	0.56	0.29	0.29	Accept	Accept	N/LN
230	5	12.28	6.15	0.50	-0.04	1.17	Accept	Accept	N/LN
231	5	11.24	5.53	0.49	0.28	0.99	Accept	Accept	N/LN
232	5	10.15	5.14	0.51	0.83	1.84	Accept	Accept	N/LN
233	5	9.65	4.96	0.51	1.45	3.00	Accept	Accept	N/LN
234	5	8.19	4.60	0.56	2.05	4.43	Reject	Reject	-
235	5	6.59	4.04	0.61	2.18	4.79	Reject	Reject	-
236	5	5.54	3.33	0.60	2.16	4.72	Reject	Reject	-
237	5	6.52	4.53	0.69	1.75	2.99	Reject	Accept	LN
238	5	10.01	7.28	0.73	1.27	0.91	Accept	Accept	N/LN
239	5	8.74	6.02	0.69	1.75	3.25	Reject	Accept	LN
240	5	7.52	5.72	0.76	2.00	4.23	Reject	Accept	LN
241	5	6.33	5.00	0.79	2.12	4.63	Reject	Reject	-
242	5	5.48	3.90	0.71	2.09	4.53	Reject	Reject	-
243	5	4.80	2.94	0.61	2.05	4.36	Reject	Reject	-
244	5	4.25	2.50	0.59	2.03	4.21	Reject	Reject	-
245	5	4.06	2.27	0.56	1.93	3.81	Reject	Accept	LN
246	5	3.97	2.16	0.54	1.85	3.55	Reject	Accept	LN
247	5	6.32	4.08	0.65	1.12	1.03	Accept	Accept	N/LN
249	5	10.26	6.36	0.62	1.27	2.31	Accept	Accept	N/LN
250	5	8.94	5.86	0.66	1.63	3.14	Accept	Accept	N/LN
251	5	7.58	5.67	0.75	1.88	3.72	Reject	Accept	LN
252	5	6.43	5.16	0.80	2.02	4.19	Reject	Accept	LN

Table 2. Summary of field statistics and PPCC test

Date (Day of Year)	Number of sites	Mean (%)	Standard Deviation (%)	Coefficient of Variation	Skewness	Kurtosis	PPCC		Fitness of PDF
							Normal	Log-normal	
253	5	5.31	4.15	0.78	2.08	4.48	Reject	Accept	LN
254	5	4.55	3.34	0.73	2.09	4.55	Reject	Reject	-
255	5	4.07	2.73	0.67	2.08	4.51	Reject	Reject	-
256	5	3.82	2.47	0.65	2.07	4.48	Reject	Reject	-
257	5	3.70	2.26	0.61	2.05	4.43	Reject	Reject	-
259	5	3.52	2.07	0.59	2.09	4.54	Reject	Reject	-
260	5	3.77	1.79	0.47	1.72	2.73	Reject	Reject	-
261	5	4.42	2.59	0.59	0.78	-2.28	Reject	Accept	LN
262	5	5.58	3.42	0.61	0.45	-1.15	Accept	Accept	N/LN
263	5	14.52	5.77	0.40	0.55	-0.26	Accept	Accept	N/LN
264	5	14.50	4.71	0.32	1.58	2.89	Accept	Accept	N/LN
265	5	12.25	4.43	0.36	1.66	3.28	Reject	Accept	LN
266	5	10.96	4.32	0.39	1.91	3.98	Reject	Accept	LN
267	5	10.09	4.43	0.44	2.09	4.52	Reject	Reject	-
268	5	9.17	4.37	0.48	2.17	4.78	Reject	Reject	-
269	5	8.78	4.10	0.47	1.49	1.96	Accept	Accept	N/LN
270	5	9.03	4.25	0.47	0.78	-0.70	Accept	Accept	N/LN
271	5	8.35	4.05	0.48	1.15	1.62	Accept	Accept	N/LN
272	5	7.53	3.74	0.50	1.27	2.44	Accept	Accept	N/LN
273	5	6.64	3.33	0.50	1.38	2.98	Accept	Accept	N/LN
274	5	5.92	2.89	0.49	1.38	3.02	Reject	Accept	LN

N = normal, LN = Log-normal

Plot Correlation Coefficient(PPCC) test를 이용하여 행해졌다(Helsel and Hirsch, 2002). 연구기간 122일 중 관측값이 대부분 확보된 115일 동안의 정규분포(Normal distribution)와 대수정규분포(Log-normal distribution)에 대하여 일 단위로 실시된 검정의 결과, 각각 52일, 95일이 통과하여 45.2%, 82.6%의 통과율을 보였다. 각각 강우와 토양수분의 변화에 따라 나타나는 일정한 경향성이 있지만 대체로 강우에 따른 왜곡도(skewness)가 0보다 클 때 대수정규분포가 성립하였다. 이 중 강우가 오랜 시간동안 내리지 않아 왜곡도가 일정한 값을 유지하는 기간을 제외한 강우 발생 전후 기간에는 정규분포가 성립하였다. 따라서 왜곡도의 값이 0보다 큰 기간에서는 대수정규분포가 연구지역에 대해 가장 적합한 분포를 가지는 것을 확인하였다. 이 결과는 Choi *et al.*(2007)에서 나타난 연구 결과와 동일한 경향을 보여 건조지역에서의 강우의 발생에 따른 토양수분량의 변화양상을 분석하는 데 기초로 삼을 수 있다.

3.2 평균토양수분량과 변동계수와의 관계

이전까지 관측한 토양수분 데이터는 대개 10~20여일에 이르는 짧은 기간동안 수집여 지점에서 집중적으로 관측했다. 하지만 계절 변화와 강수 등에 의해 변화하는 공간적 경향을 파악하기 위해서는 더욱 긴 기간을 대상으로 하여야 하며, SMEX04는 이에 따라 총 4달에 걸친 기간을 대상으로 함으로써 통계적 신뢰성을 높였다(Cosh *et al.*, 2008). 본

연구에서는 연구기간인 6~9월(DOY : 153~274)동안 관측한 토양수분 실측 데이터를 이용함으로써 충분한 수의 자료를 이용할 수 있었고, 이를 바탕으로 Fig. 3과 같이 평균토양수분과 변동계수와의 관계 분포를 나타내고 그 관계식을 도출할 수 있었다.

그래프의 개형은 전형적인 반비례 그래프의 형태를 가지며, 이를 이용하여 3개의 상수 a , b , c 를 가지는 유리함수를 이용한 $CV(\%) = (a + b * M(\%)) / (1 + c * M(\%))$ 형태의 관계식을 각 지점에 대해 도출하였다. 여기서 각 지점을 대표하는 관계식의 R^2 값은 0.42에서 0.87까지의 범위를 나타내고 있으며 평균토양수분량이 5% 미만일 때에 더욱 잘 맞는 경향을 보인다. 이와 같은 평균토양수분량과 변동계수와의 일반적인 관계로부터 토양수분량이 적을수록, 즉 토양이 건조할수록 토양수분량의 변동성이 급격히 커진다는 것을 알 수 있다. 또한 Table 1의 기본통계결과로부터 강우가 일정기간 이상 발생하지 않아 건조해진 토양의 변동성이 커져 큰 왜곡도(skewness)를 가지게 되는 통계적 과정을 찾을 수 있으며, 이는 Fig. 3의 평균토양수분량과 변동계수와의 관계를 반영한다.

연구지역인 WGEW 지역에서의 평균 토양수분은 Table 1에서 확인할 수 있듯이 강우 직후를 제외하고는 대개 5% 미만의 값을 보였다. 따라서 Fig. 3의 각 그래프를 통해 평균 토양수분이 5% 미만의 값을 가지는 범위에서 매우 큰 변동계수 값을 가지게 되는 것을 확인할 수 있으며, 이러한

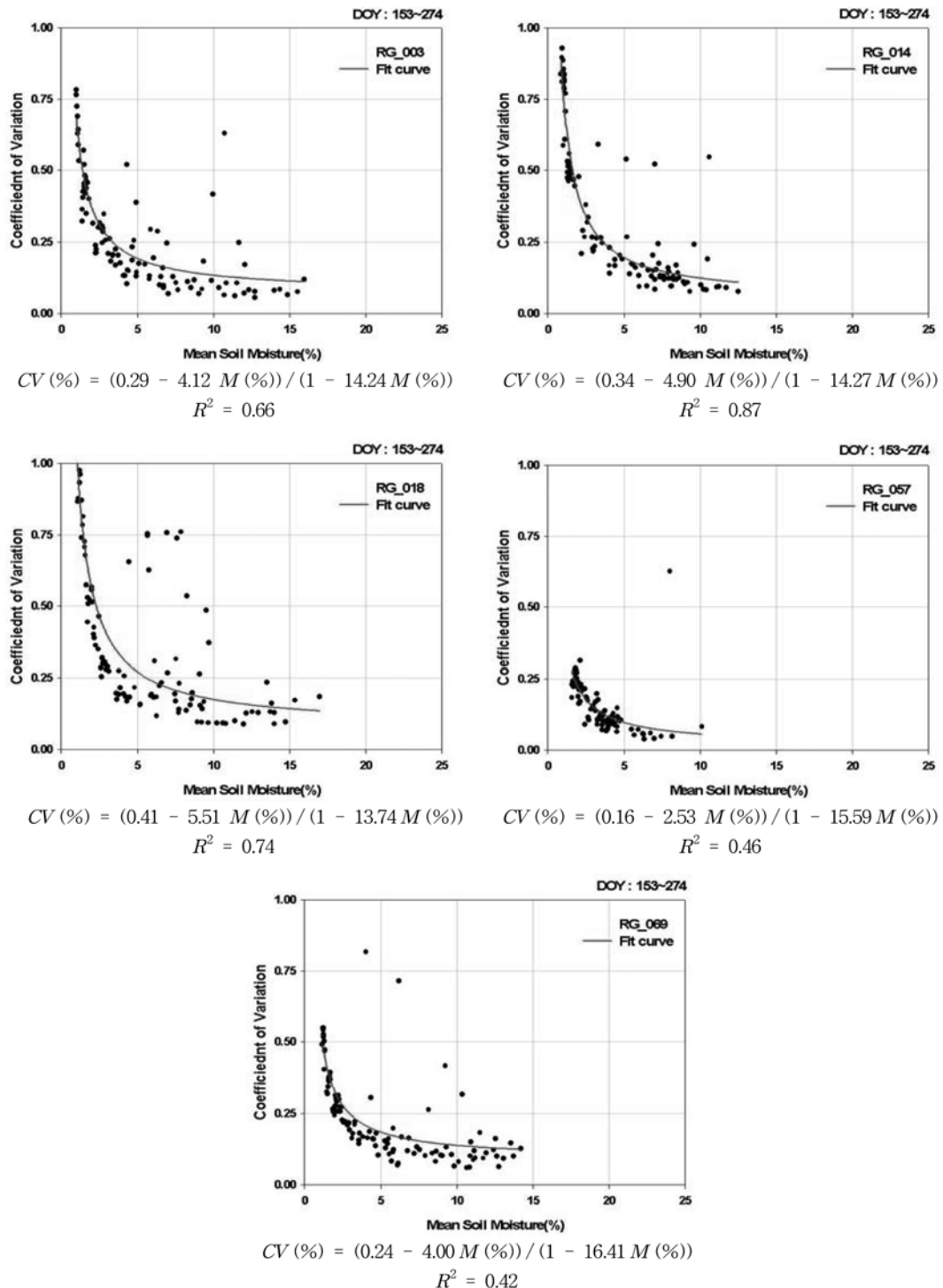


Fig. 3 Relation between coefficient of variation (CV) and mean soil moisture at each site

5% 미만에서의 매우 큰 변동계수는 RG_003, RG_014, RG_018 지점에서 더욱 커지고 그 경향이 뚜렷해지며 RG_057과 RG_069에서는 다소 작은 값을 보인다. 이와 같은 평균 토양수분과 변동계수와의 관계는 앞서 연구된 Famiglietti *et al.*(1999)와 Choi *et al.*(2007)의 연구결과와도 일치한다. 다만 Southern Great Plains 1997(SGP97) 프로젝트의 연구지역이었던 Central Oklahoma 지역의 토양수분 분포는 낮은 변동계수 값을 보이는 20~40%에 집중적으로 분포하여 Famiglietti *et al.*(1999)에서 그 경향을 뚜렷이 밝혀낼 수는 없었던 반면, Choi *et al.*(2007)에서 대상으로 삼았던 Soil Moisture Experiment 2002(SMEX02) 프로젝트의 Iowa 주 Walnut Creek Watershed 평균 토양수분-변

동계수 관계는 비교적 뚜렷한 경향을 드러내어 지수함수를 이용하여 추세하였다.

3.3 시간안정도 평가 (Temporal stability analysis)

시간안정도 평가는 지점 위치와 토양 특성에 대한 전형적인 통계 매개변수들 사이의 조합으로 시간에 대한 불변성을 원칙으로 정의하고 있다(Vachaud *et al.*, 1985). 토양수분량의 공간적인 분포 양상에 대한 시간 안정도를 평가하기 위해 적용하는 인자들은 각 지점에 대한 평균토양수분량 ($\bar{\theta}_{j,i}$)과 평균상대차 ($\bar{\delta}_{i,j}$), 상대차이의 편차 ($\sigma \delta_{i,j}^2$)가 있고, 각 인자들은 아래의 식 (1)로 각각 정의된다. 여기서 i 는 관측 일수를 의미하며 j 는 지점의 위치 번호, i 는 지점의 개수를

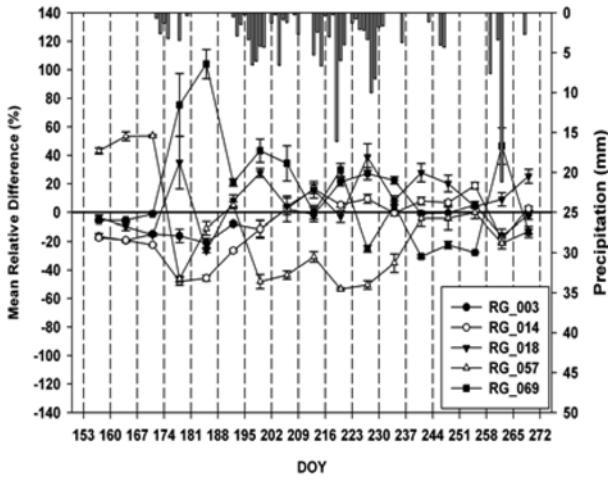


Fig. 4 Mean relative difference with standard deviation error bars of every week

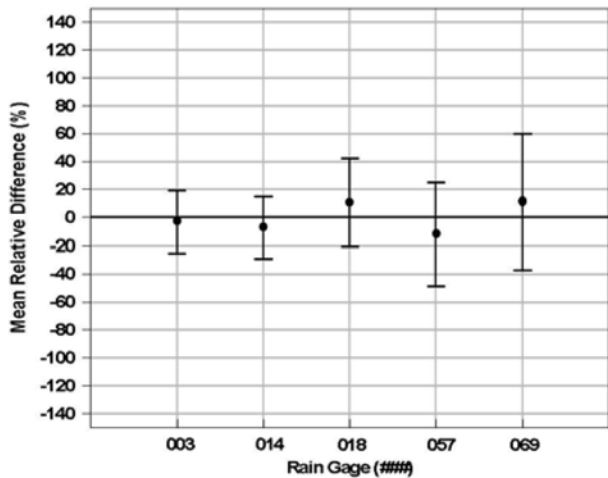


Fig. 5 Mean relative difference with standard deviation error bars in the whole period

의미한다. 여기서 상대차이의 편차 ($\sigma\delta_{i,j}^2$)가 시간안정도 평가의 지표로 사용되고 0에 가까운 값에 대하여 시간에 대하여 안정하다고 정의한다.

$$\bar{\theta}_{i,j} = \frac{1}{n_{j,t}} \sum_{t=1}^{n_{j,t}} \theta_{i,j,t}, \quad \bar{\delta}_{i,j} = \frac{1}{n_{j,t}} \sum_{t=1}^{n_{j,t}} \frac{\theta_{i,j,t} - \bar{\theta}_{i,j}}{\bar{\theta}_{i,j}}$$

$$\sigma(\delta)^{2i,j} = \frac{1}{n_{j,t}-1} \left(\sum_{t=1}^{n_{j,t}} \frac{\theta_{i,j,t} - \bar{\theta}_{i,j}}{\bar{\theta}_{i,j}} - \bar{\delta}_{i,j} \right)^2 \quad (1)$$

Fig. 4는 각 지점에 대한 시간안정도 분석을 1주일 단위로 수행한 것이며 Fig. 5는 시간안정도 평가를 전체 기간 122 일에 대하여 수행한 것이다. 시간안정도 분석 결과 RG_003 지점에서는 시간안정도가 -20~27%로 다소 고른 모습을 보였고 평균 -2.89%로 강우사상의 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. RG_014와 RG_018에서는 강우사상유무에 따라 변동성이 있음을 볼 수 있었지만 그 크기는 크지 않았다. 하지만 RG_057과 RG_069에서는 각각 -53~53%, -30~104%의 분포를 보여 강우사상에 대한 변동성이 크게 나타났으며, 평균치 또한 $\pm 10\%$ 이상으로 크게 나타나 강우사상에 민감하다는 것을 알 수 있었다. 하지만 전체적으로 강우사상이 없는 건조기간에서 시간에 대한 안정도가 높게 나왔으며 강우기간에는 안정성이 떨어지는 것으로 나타나 강우사상이 토양수

분의 변동성에 가장 크게 영향을 미치는 인자임을 재확인할 수 있었다.

이와 같은 결과는 Choi *et al.*(2007) 등 다른 연구결과를 토대로 한 관련연구가 필요하다. Choi *et al.*(2007)에서는 각 지역에 대한 시간안정도 그래프를 측정 깊이(0, 5, 15, 25, 31 cm)별로 도시하여 측정 깊이에 따른 시간 안정도를 서로 비교, 어느 지점이 0에 가까운 가장 안정된 값을 보이는가에 대한 분석을 실시하였으나, 본 연구에서 대상으로 한 토양수분 데이터는 측정 깊이가 5 cm인 데이터만을 대상으로 하였기 때문에 같은 지역에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 이를 위해서는 토양수분 데이터를 여러 깊이 범위에 대해 각각 분석하는 과정이 필요하고 연구지역인 WGEW 지역 총 19개 지점 모두에 대한 지점별 분석이 이루어져야 한다.

4. 결 론

WGEW 지역 내 양토로 이루어진 5개 지점에서의 토양수분 평균값은 RG_057을 제외한 4개 지점에서 강우사상 직후 5~15% 내외로 크게 증가하였다. 강우사상 종료 후 건조기간의 토양수분량 값으로 되돌아오는데 걸리는 시간은 2개 지역에서는 2~3일 내로 빠른 속도를 보였고 다른 2개 지역에서는 1주일 정도 소요하는 것으로 나타났다.

평균토양수분량의 분포 특성에서 살펴보면 왜곡도가 0보다 클 때 대수정규분포가 성립하였으며, 이 중 건조기간을 제외한 강우 사상 전후 기간에는 정규분포가 성립하였다. 시간에 대한 왜곡도의 분포와 정규성과의 관계는 앞서 연구된 Famiglietti *et al.*(1999)의 결과와는 다소 다른 모습을 보였다. 강우의 발생에 따라 왜곡도가 크게 감소하였다가 강우의 종결 후 회복하는 경향과 이에 따른 정규성 분포 경향은 전술한 바와 같이 대체로 동일한 모습을 보였지만, 강우가 일정 기간 이상 내리지 않아 왜곡도가 일정한 값을 유지하였던 기간에 대해서도 마찬가지로 정규성이 성립하였던 Famiglietti *et al.*(1999)의 결과와 달리 본 연구에서는 이 기간에 대한 정규성이 성립되지 않았으며, 이는 Fig. 3을 통해서 확인할 수 있다. Table 1에서 연구 대상지역의 토양수분량은 대부분 10% 이하를 기록하였으며, 특히 강우 전후 기간을 제외하고는 5% 이하의 매우 낮은 값을 가질 정도로 건조하여 이에 따라 공간적으로 큰 변동성을 가지게 되었다. 그러나 Famiglietti *et al.*(1999)에서의 연구지역은 토양수분이 20~40%를 유지하여 0.2 정도의 낮은 변동계수 값을 보일 정도로 변동성이 적었으며, 이는 건조지역만이 가지는 특징을 보여준다.

각 지점에 대한 평균토양수분량과 변동계수의 관계에 대해 강우집중기간 혹은 강우 후 건조기간만을 이용한 제한된 관계분석은 토양수분 범위의 제약으로 인해 적절하게 나타낼 수 없었다. 하지만 연강우가 집중되는 6~9월에 이르는 긴 시계열 자료를 이용하였을 때에는 3개의 변수를 가지는 유리함수로 나타낼 수 있었고, 특히 5% 미만의 평균토양수분량에 대해서는 추세곡선이 매우 정확한 양상을 보였다.

시간안정도 분석 결과 RG_003 지점이 시간에 대하여 가장 안정하게 나타났으며 토양 특성상 강우 사상에 영향을

가장 적게 받고 있는 것으로 나타났다. 또한 RG_057과 RG_069 지점에서는 토양 특성상 강우 사상에 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 건조지역 및 호우가 여름에 집중되는 기후특성을 가진 지역에서는 제한된 기간의 자료를 이용하기 보다는 긴 시간의 시계열 자료가 토양수분량의 변동성을 파악하는데 더욱 효과적임을 알 수 있었고, 토양특성상 강우사상이 변동성에 영향을 미치는 가장 큰 인자임을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구는 WGEW 지역과 같은 건조지역에 대한 토양수분량 측정 및 분석에 관한 기초자료로 활용하여 원격탐사 알고리즘을 검증하는데 유용하게 쓸 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대 홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T., and Morbidelli, R. (2009) Soil moisture temporal stability over experimental areas in Central Italy, *Geoderma, Elsevier*, Vol. 148, pp. 364-374.

Choi, M. and Jacobs, J.M. (2007) Soil moisture variability of root zone profiles within SMEX02 remote sensing footprints, *Remote Sensing of Environment, Elsevier*, Vol. 30, pp. 883-896.

Cosh, M.H., Jackson, T.J., Moran, S., and Bindlish, R. (2008) Temporal persistence and stability of surface soil moisture in a semi-arid watershed, *Remote Sensing of Environment, Elsevier*, Vol. 112, pp. 304-313.

Famiglietti, J.S., Devereaux, J.A., Laymon, C.A., Tsegaye, T., Houser, P.R., Jackson, T.J., Graham, S.T., Rodell, M., and van

Oevelen, P.J. (1999) Ground-based investigation of soil moisture variability within remote sensing footprints during the Southern Great Plains 1997 (SGP97) Hydrology Experiment, *Water Resources Research, AGU*, Vol. 35, No. 6, pp. 1839-1851.

Famiglietti, J.S., Rudnicki, J.W., and Rodell, M. (1998) Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas, *Journal of Hydrology, Elsevier*, Vol. 210, pp. 259-281.

Heathman, G.C., Larose, M., Cosh, M.H., and Bindlish, R. (2009) Surface and profile soil moisture spatio-temporal analysis during an excessive rainfall period in the Southern Great Plains, USA, *Catena, Elsevier*, Vol. 78, pp. 159-169.

Helsel, D.R. and Hirsch, R.M. (2002) *Statistical methods in water resources, U.S. Geological Survey; Book4: Hydrologic Analysis and Interpretation*, U.S. Geological Survey, Reston, VA.

Qiu, Y., Fu, B., Wang, J., and Chen, L. (2001) Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China, *Journal of Arid Environments, Academic Press*, Vol. 49, pp. 723-750.

Starks, P.J., Heathman, G.C., Ahuja, L.R., and Ma, L. (2003) Use of limited soil property data and modeling to estimate root zone soil water content. *Journal of Hydrology, Elsevier*, Vol. 272, pp. 131-147.

Vachaud, G., Passerat De Silans, A., Balabanis, P., and Vauclin, M. (1985) Temporal stability of spatially measured soil water probability density function, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 49, pp. 822-828.

Merriam-Webster's Online Dictionary. <http://www.merriam-webster.com/>

United States Department of Agriculture Agricultural Research Service (2004) Soil Moisture Experiments in 2004 (SMEX04) and the North American Monsoon Experiment (NAME). Experiment Plan Report. *United States Department of Agriculture Agricultural Research Service*.

(접수일: 2010.3.2/심사일: 2010.3.17/심사완료일: 2010.3.17)