

Temporal and Spatial Variation of Soil Moisture in Upland Soil using AMSR2 SMC

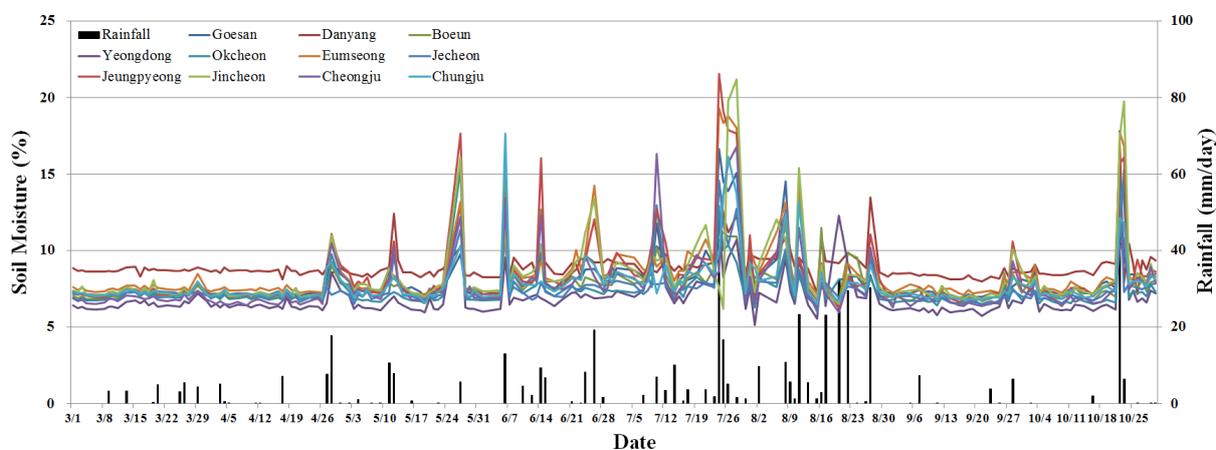
Sang-Il Na, Kyoung-Do Lee, Sook-Kyoung Kim, and Suk-Young Hong*

Climate Change and Agro-Ecology Division, National Academy of Agricultural Science, RDA, Wanju 55365, Korea

(Received: September 22 2015, Revised: November 25 2015, Accepted: November 25 2015)

Temporal and spatial variation of soil moisture is important for understanding patterns of climate change, for developing and evaluating land surface models, for designing surface soil moisture observation networks, and for determining the appropriate resolution for satellite-based remote sensing instruments for soil moisture. In this study, we measured several soil moistures in upland soil using Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) Soil Moisture Content (SMC) during eight-month period in Chungbuk province. The upland soil moisture properties were expressed by simple statistical methods (average, standard deviation and coefficient of variation) from the monthly context. Supplementary studies were also performed about the effect of top soil texture on the soil moisture responses. If the results from this study were utilized well in specific cities and counties in Korea, it would be helpful to establish the countermeasures and action plans for preventing disasters because it was possible to compare with the relationship between soil moisture and top soil texture of each region. And it would be the fundamental data for estimating the effect of future agricultural plan.

Key words: Temporal and spatial variation, Soil moisture, AMSR2 SMC, Chungbuk



Distribution of soil moisture and rainfall at each region.

*Corresponding author: Phone: +82632382510, Fax: +82632383823, E-mail: syhong67@korea.kr

§Acknowledgement: This study was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (PJ00936701)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

최근 잦은 기상재해와 더불어 토양수분에 관한 관심이 급증하면서 토양수분의 시공간적 특성을 이해하고자 하는 다양한 연구가 진행되고 있다. 토양수분의 변동특성은 주로 생태 수문학자들을 위주로 연구되고 있는데 (Eagleson, 1978), 이는 토양수분이 식생의 구조와 생리에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있기 때문이다 (Rodriguez-Iturbe et al., 2001). 이와 같이 토양수분의 시공간적 변동성을 파악하는 것은 농업과 환경 연구에 있어서 매우 중요하다. 하지만 토양수분은 토질, 강우, 토지 피복 상태, 고도 및 경사 등 수 많은 인자들의 영향을 받기 때문에 이를 단적으로 산출하기는 매우 어렵다. 이를 극복하고자 연구자들은 중량측정법, 원자력방법, 시간영역반사계 (Time Domain Reflectometry, TDR) 방법, 토양수분 장력측정법 등 다양한 방법으로 토양수분 관측을 시도하였으며, 관측 결과를 농업기상정보시스템 (<http://weather.rda.go.kr/>)을 통해 제공하고 있다. 그러나 관측기간이 짧고 보유한 관측 자료 역시 관측 장비의 노후화로 인하여 결측 지점이 많다. 또한 전통적인 토양수분 관측방법은 많은 시간과 인력 및 비용을 요구하는 작업으로 한반도 전체의 토양수분 변화를 분석하기에는 매우 비효율적인 방법으로 평가되고 있다. 따라서 이를 해결하기 위한 방법으로 토양수분의 시공간적 변화 모니터링에 마이크로파 (microwave)를 이용한 원격관측 방법이 대두되고 있다.

마이크로파를 이용한 토양수분 원격관측은 토양 내 수분 정도와 유전상수 (dielectric constant)와의 상관특성을 이용하여 광역 토양수분의 시공간적 변화를 모니터링하는 방법으로 현재 다양한 지표상태와 식생피복에 따른 광역 토양수분 관측이 수행되고 있다 (Kim and Kim, 2011). 특히, 2002년 AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth observing system) 센서가 AQUA 위성에 탑재되어 발사되면서 전 지구 규모의 C-band 토양수분 자료를 획득할 수 있게 되었으며, 2012년에는 GCOM-W1 (Global Change Observation Mission - Water) 위성에서 AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) 센서가 탑재되어 현재 까지 운영 중에 있다.

이에 따라 국내외에서 마이크로파 위성을 이용한 토양수분 모니터링 및 시공간 분포 특성 파악과 관련된 다양한 연구가 진행되어 오고 있다. 국내의 경우, Park et al. (2002)은 공간자료를 이용하여 토양수분 정보를 통해 가뭄현상을 분석하였고 Hong et al. (2009)은 위성영상을 이용하여 추출된 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)와 토양수분과의 상관성분석을 통하여 토양수분 관측자료를 대신할 수 있는 척도로 원격탐사의 사용가능성을 확인하였다. 국립기상연구소에서는 2009년 AMSR-E 센서 자료를 활용

하여 독자적인 위성 토양수분 알고리즘 개발을 시작으로 2010년에는 식생 효과를 고려하여 알고리즘을 개선하였다 (Oh et al., 2013). 또한, Park and Kim (2011)은 지상관측 토양수분과 기상자료, MODIS NDVI를 인공신경망모형에 적용하여 토양수분 공간분포 산정모형을 구축하고 대상유역에 대한 토양수분 공간분포를 산정하여 수립된 토양수분 산정모형의 적용성을 제시하였으며, Hur and Choi (2011)는 해남 플렉스 타워지점에서 관측된 2년간(2004, 2006년)의 토양수분자료를 이용하여 AMSR-E 토양수분자료의 시간적 변동성을 검증하였다. Oh et al. (2013)은 준 실시간 산출 및 감시 시스템을 구축하여 전지구 및 동아시아 영역에 대한 토양수분 변화를 모니터링 하였으며, Gwak et al. (2015)은 청미천 사면의 토양수분모니터링시스템으로부터 얻어진 토양수분 시계열에 대해 단면선 (Transect line)에 따른 수문학적 시각과 해석을 통해 토양수분의 계절적, 공간적 분포변동에 대하여 조사하였다.

국외에서는 Famiglietti et al. (1991)은 미국 Oklahoma 중부 지방을 대상으로 지점의 평균 토양수분 변화량은 토양과 식생의 종류, 강우의 변화에 따라 통계적으로 일정한 차이를 나타내며 토양수분 함유량이 감소함에 따라 표준편차, 변동계수, 왜곡도 및 첨도가 증가한다고 보고하였으며, Qiu et al. (2001)은 중국 Loess Plateau 건조 지역에 대한 공간 변동성 분석을 통해 강우강도가 높고 토양수분이 클수록 낮은 공간 변동성을 가지게 되는 것과 토지 이용과 지형 등 외부 환경 조건이 토양수분의 공간적 분포에 영향을 준다는 것을 확인하였다. Santanello Jr. et al. (2007)은 토양수분 보정을 통한 토성과 수경성 (hydraulicity)을 산정한 연구를 진행하였고 Wang et al. (2009)은 중국 남서부의 매우 건조한 지역을 대상으로 AMSR-E 토양수분을 검증한 결과, AMSR-E를 이용한 토양수분 관측은 현재 이용가능한 결과를 제시한다고 보고하였다. 또한, Brocca et al. (2009)은 이탈리아 중부 지역에서 각 지점의 시간안정도를 평가하여 시공간적 거동에 영향을 주는 인자를 해석하였으며, 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 토양수분은 시간적으로 안정된 경향을 나타내지 않는다는 것을 확인하였다. 그 외 Pierdicca et al. (2010)은 식생지역을 포함하는 광역의 토양수분 자료를 획득하고자 하였으며, Ye et al. (2014)은 AMSR2 휘도온도 및 토양수분을 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometers) 지표면 온도 자료를 이용하여 상세화하여 토양수분량을 산정하였다.

그러나 지금까지의 선행 연구들은 대부분 토지피복에 따른 토양수분의 변화보다는 지역 전반을 대상으로 토양수분의 시공간적 분포를 파악하고 평가하는데 주목적이 있었으며, 작은 규모로 발생하는 농경지의 토양수분 변화 모니터

링 사례는 거의 없었다. 따라서 본 논문에서는 2014년 3월부터 10월까지 일별 AMSR2 SMC (Soil Moisture Content)를 대상으로 스마트 팜 맵을 이용하여 충청북도 시군별 밭을 대상으로 통계적인 기법을 이용하여 토양수분의 시공간적 변동 특성을 파악하고자 하였다.

Materials and Methods

AMSR2 토양수분 자료 및 연구 대상 지역 본 연구에서는 2014년 3월부터 10월까지의 일별 AMSR2 SMC를 사용하였다. AMSR2는 전 지구의 기후변화에 유용한 데이터를 제공하고 2012년 5월 발사되었으며, 2012년 7월부터 데이터를 제공하고 있다 (<http://gcomw1.jaxa.jp>). 관측시간은 매일 현지시간으로 상승경로 (Ascending Path)에 대한 관측이 1:30 P.M.에 이루어지고, 하강경로 (Descending Path)에 대한 관측은 1:30 A.M.에 수행된다.

연구 대상 지역은 한반도의 중심인 충청북도로써 바다와 접하지 않는 유일한 내륙지방이다. 동경 128°38'~127°16'와 북위 37°15'~36°00'에 위치하였으며, 면적은 7,433.01 km²이다 (Fig. 1). 행정구역으로는 3개 시와 8개 군으로 이루어져 있으며, 지리적으로 동남쪽의 소백산맥과 서북쪽의 차령산맥으로 둘러싸인 중부 내륙 지역으로 구릉성 산지가 많고 넓은 평야 지대로 이루어져 있어 벼농사가 발달하여 쌀, 보리, 콩 같은 곡식과 고구마, 고추, 배추, 버섯 등이 많이 생산된다. 기후특성은 바다에서 떨어져 내륙에 위치하고 동쪽으로는 태백산맥, 소백산맥에 의해 막혀 있기 때문에 대륙성 기후의 특징을 뚜렷이 보이고 있다. 또한, 시군별 연강수

량 분포는 제천 등의 북부지역에 연강수량이 많고 영동 등의 남부지역은 강수량이 적으며 중부지역은 점이적인 성격을 가지고 있다. 농경지 분포는 소백산맥 일대 동부와 북부의 산지 및 중앙의 구릉지에 주를 이루며 청주를 중심으로 미호평야 등 너른 평야 지대를 이루고 있다. 특산물로는 진천의 쌀과 고추, 제천의 약초와 사과, 괴산의 고추와 인삼, 보은의 대추, 영동의 포도와 감, 단양의 마늘과 앞담배, 음성의 고추와 인삼, 충주의 사과 그리고 증평의 인삼 등이 있다.

스마트 팜 맵을 이용한 밭토양 토양수분 추출 스마트 팜 맵 (Smart Farm Map)은 현장과 일치하는 고품질의 농경지 정보를 구축하기 위하여 현장과 일치하지 않는 지적 정보를 농업환경에 맞게 제작한 전자지도이다 (Hong et al., 2015). 농림축산식품부에서는 정책 추진의 기초자료인 경지에 대한 정확한 공간정보 확보로 필지별로 시행되는 정책의 효율성 증대 및 예산을 절감하기 위하여 2014년 충청북도, 전라남도, 전라북도 3개도와 대전광역시를 대상으로 스마트 팜 맵 구축사업을 진행하였으며, 지속적인 확대구축을 계획하고 있다. 스마트 팜 맵은 국가지리정보 중 연속지적도와 수치지형도가 기초자료로, 지형도 기반으로 구축된 환경부의 토지피복도를 참조자료로 활용한다. 또한, 농업분야 현장정보로 한국농어촌공사의 농지이용현황도와 농업경영체 등록정보, 각종 직불제 관련 자료도 종합하여 활용한다. 본 연구에서는 스마트 팜 맵을 이용하여 AMSR2 SMC를 대상으로 충청북도 시군별 밭토양만을 추출하여 토양수분의 시공간적 변동특성을 파악하였다.

통계적 기법에 의한 시공간적 특성 평가 본 연구에서는 토양수분의 평균, 표준편차 그리고 변동계수와 같은 기본적인 통계적 방법들을 이용하여 토양수분의 시공간적 특성들을 분석하고자 하였다. 먼저 토양수분의 평균 (Mean)은 토양 습윤도 (Soil Wetness Index)의 변동특성을 파악할 수 있으며, 표준편차 (Standard Deviation, S.D.)는 토양수분의 변동성을 의미한다. 또한, 변동계수 (Coefficient of Variation, C.V.)는 평균과 표준편차를 이용하며 다음 식을 통해 각각 계산된다.

$$\bar{\theta}_i = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \theta_{it} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N (\theta_{it} - \bar{\theta}_i)^2} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$C.V. = \frac{\sigma_i}{\bar{\theta}_i} \quad (\text{Eq. 3})$$

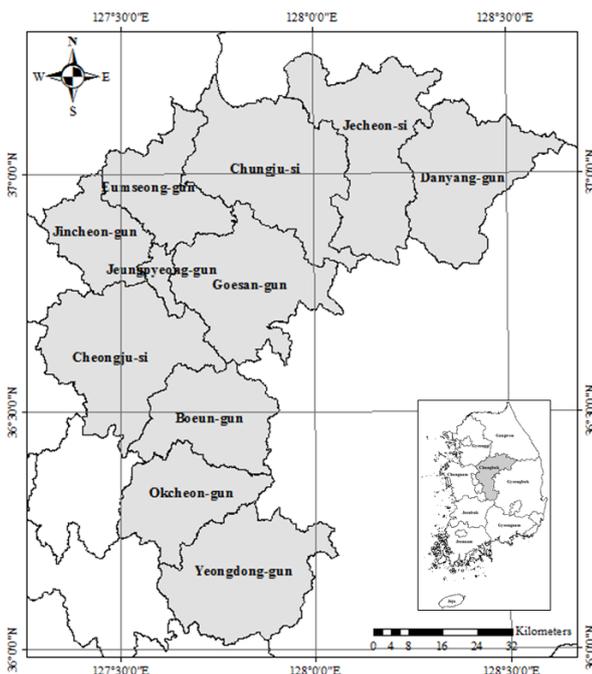


Fig. 1. Locations of -si and -gun in Chungbuk.

여기서, θ_{it} 는 측정지점 i 에서 t 번째 시간에서 측정된 토양수분을 의미하며, N 은 어떤 기간 동안에 측정된 토양 자료의 개수, $\bar{\theta}_i$ 는 시간 동안에 대해 측정된 토양수분의 평균값, σ_i 는 어떤 기간 동안에 측정된 토양수분의 표준편차를 나타내며, $C.V.$ 는 변동계수를 나타낸다.

Results and Discussion

AMSR2 SMC에 의한 충청북도 밭토양의 토양수분 변화 AMSR2 SMC는 2014년 3월 1일부터 10월 31일까지 1일 간격으로 수집되었으며, 스마트 팜 맵을 이용하여 충청북도 밭토양을 대상으로 총 2,695개의 토양수분 관측자료를 추출하였다. Fig. 2는 충청북도 11개 시군별 관측기간에 따른 토양수분량과 강우량의 분포를 나타낸 시계열 그래프이다. 총 245일의 관측기간 중 75일 내외의 강우사상이 관측되었으며, 7월 상순에서 8월 하순까지 강우가 집중적으로 이어졌고 10월 22일에 가장 큰 강우량을 기록하였다. 전반적으로 AMSR2 SMC에 의한 충청북도 밭토양의 토양수분은 5.13 ~ 21.78%의 범위를 나타내었으며, 강우에 따라 반응하기도 하지만 무강우시에도 크게 떨어지지 않는 경향을 나타냈다. 이는 마이크로파를 이용한 원격관측 방법의 특성으로 판단된다. 일반적으로 건조지역에서의 토양수분은 강우시에 민감하게 반응하고 무강우시에 서서히 감소하다가 5% 미만에서 평균토양수분량이 유지되는 특성을 나타낸다 (Hwang et al., 2010). 물론 밭토양의 경우에도 건조기에 일평균 토양수분함량이 지속적으로 감소하는 경향을 나타내기는 하지만 (Seo et al., 2012), AMSR2 SMC의 경우에는 전지구를 대상으로 경로에 따라 1일 1회 관측을 하고 있기 때문에 일평균 토양수분함량이 아닌 관측시점 (1:30 P.M.)의 순간 토양수분이 관측된다. 따라서 Fig. 2와 같이 무강우시에도 토양수분이 감소하지 않고 8% 수준을 유지하는 것은 밭 관개의 영향으로 판단되며, 대상지역인 충청북도는

관개시설이 비교적 잘 이루어진 것으로 판단된다.

시군별 토양수분 통계분포 분석 충청북도의 11개 시군별 토양수분에 대한 공간 통계 분석 결과를 정리하면 Fig. 3과 같다. 시간 및 공간에 따른 평균 토양수분 변동을 보기 위하여 기온과 강우의 변동 특성을 고려하여 월별로 계산하였으며, 각 시군별로 정리하여 비교하였다. 그 결과, 충청북도 시군별 월평균 토양수분 변화는 7.1 ~ 9.5%로 지역에 따른 월별 평균 토양수분은 7월을 제외하고 큰 차이가 없었다. 또한, 모든 시군에서 7월의 토양수분이 가장 높게 나타났고 9월의 토양수분이 가장 낮은 것으로 나타나 변동패턴도 크게 변하지 않았다 (Fig. 3(a)). 그러나 월별 누적 강우량을 살펴보면, 9월의 누적 강우량은 17.8 mm로 가장 낮게 나타났으나 7월보다는 8월의 누적강우량이 176.6 mm로 가장 높게 나타났다 (Table 1). 이는 강우패턴의 차이가 원인인 것으로 판단된다. 관측기간에 따른 강우량 분포를 살펴보면, 7월에는 간헐적으로 20 mm 미만의 강우사상이 계속되다가 40 mm 이상의 큰 강우사상이 일시적으로 발생하지만, 8월에는 장마, 태풍 등의 영향으로 20 mm 이상의 강우사상이 지속적으로 발생한다 (Fig. 2). 즉 8월은 농경지 침수예방을 위한 배수가 중점적으로 이루어지는 시기이기 때문에 밭의 토양수분이 7월에 비하여 낮게 나타나는 것으로 해석된다. 따라서 밭의 토양수분 변화는 강우사상도 영향을 주지만 작물의 생육시기에 따른 영농방법 및 농경지 물관리도 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

시군별 토양수분의 월별 표준편차 변화는 Fig. 3(b)와 같다. 월별 토양수분 표준편차 변동을 살펴보면, 전반적으로 일시적으로 큰 강우사상이 발생한 7월과 10월의 표준편차 값이 높게 나타났다. 그러나 3월은 9월보다 누적강우량이 کم에도 불구하고 상대적으로 낮은 표준편차를 나타내고 있다. 이는 9월의 경우 적은 강우량과 긴 건조기간으로 인해 높은 변동성을 나타내는 반면에 3월의 경우 지난 겨울 얼어

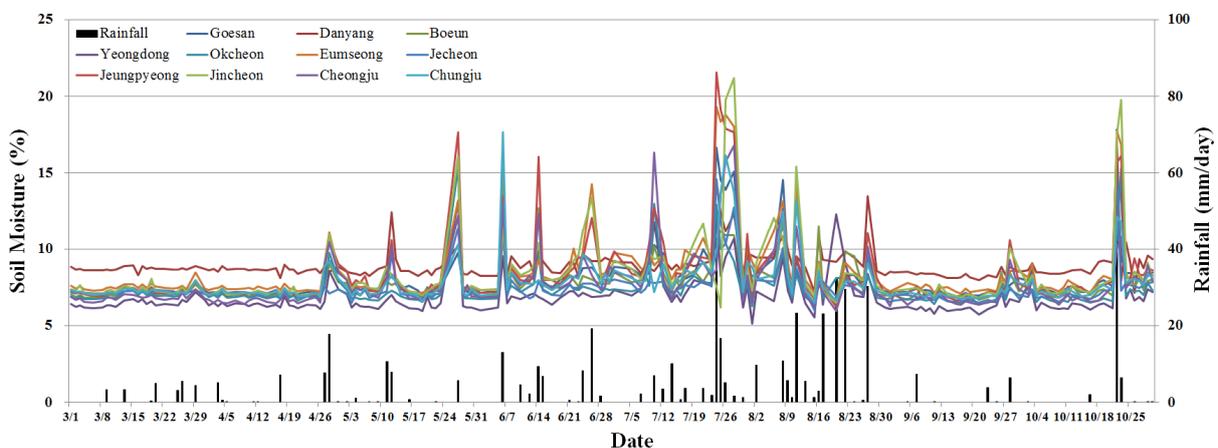


Fig. 2. Distribution of soil moisture and rainfall at each region.

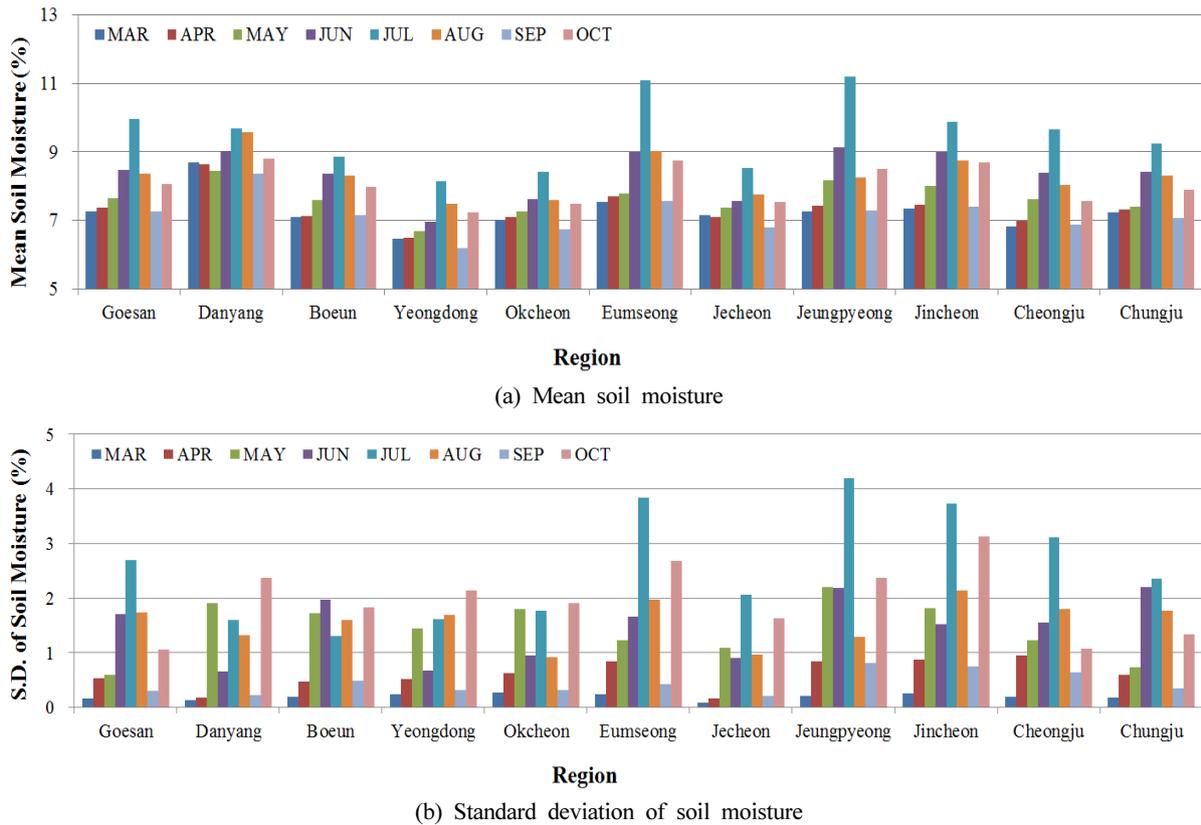


Fig. 3. Monthly variation of soil moisture statistics at each region.

Table 1. Monthly variation of mean soil moisture (%) and cumulative rainfall (mm/month) at each region.

Region	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT
Goesan	7.3	7.4	7.6	8.5	10	8.4	7.3	8.0
Danyang	8.7	8.6	8.4	9.0	9.7	9.6	8.4	8.8
Boeun	7.1	7.1	7.6	8.4	8.8	8.3	7.1	8.0
Yeongdong	6.5	6.5	6.7	7.0	8.1	7.5	6.2	7.2
Okcheon	7.0	7.1	7.3	7.6	8.4	7.6	6.7	7.5
Eumseong	7.5	7.7	7.8	9.0	11.1	9.0	7.6	8.7
Jecheon	7.1	7.1	7.4	7.6	8.5	7.7	6.8	7.5
Jeungpyeong	7.3	7.4	8.2	9.1	11.2	8.2	7.3	8.5
Jincheon	7.3	7.5	8.0	9.0	9.9	8.7	7.4	8.7
Cheongju	6.8	7.0	7.6	8.4	9.7	8.0	6.9	7.6
Chungju	7.2	7.3	7.4	8.4	9.3	8.3	7.1	7.9
Rainfall	24.8	39.1	26.2	66.1	100.1	176.6	17.8	80.4

있던 토양 층이 서서히 녹기 시작하고 작물의 활력도가 미비한 시기로 낮은 변동성을 보이는 것으로 판단된다. 이 결과는 Gwak et al. (2015)의 연구결과와 일치하는데, Gwak et al. (2015)은 청미천 사면을 대상으로 단면선의 깊이에 따른 계절별 토양수분 변동성을 분석한 결과, 봄철과 같이 식생의 활동이 미비할 경우 토양의 수리학적 활동 및 연결성이 저하되어 토양수분의 변동성이 정제되는 경향을 나타낸다고 하였다.

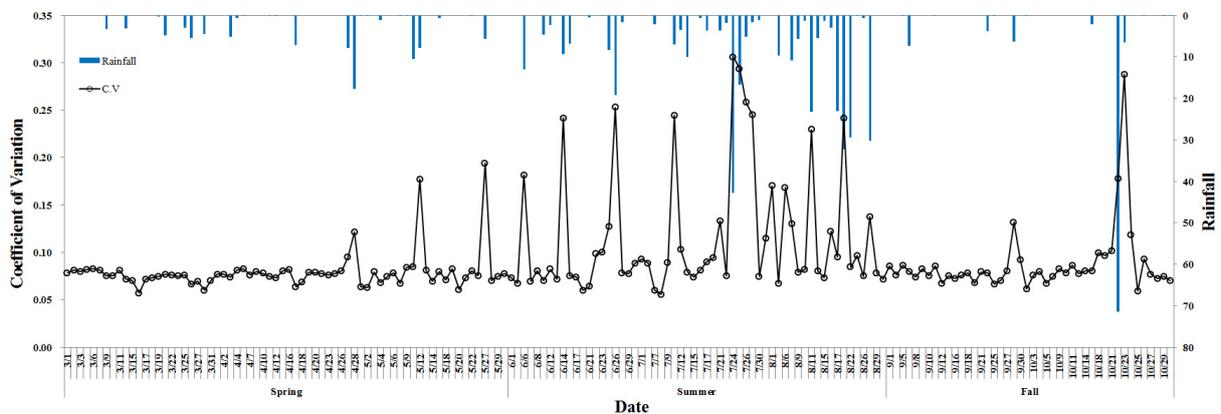
또한, 시군별 월평균 토양수분 표준편차를 살펴보면, 진

천군 (1.78) > 증평군 (1.76) > 음성군 (1.61) > 청주시 (1.32) > 보은군 (1.20) > 충주시 (1.19) > 괴산군 (1.10) > 영동군 (1.08) > 옥천군 (1.07) > 단양군 (1.05) > 제천시 (0.89)의 순으로 나타났다. 즉 진천군 및 증평군, 음성군은 상대적으로 토양수분의 변동성이 큰 지역으로 분류되었고, 제천시, 단양군, 옥천군 등은 변동성이 낮은 지역으로 분류되었다. 이는 지역별 밭토양을 구성하고 있는 토성의 차이로 인한 결과로 판단된다. 실제로 충청북도의 시군별 밭의 표토토성을 살펴보면, 토양수분 표준편차가 높은 진천군, 증평군, 음

Table 2. Top soil texture distribution ratio (%) according to topography of upland soils in Chungbuk.

Type	Goesan	Danyang	Boeun	Yeong-dong	Okcheon	Eumseong	Jecheon	Jeung-pyeong	Jincheon	Cheongju	Chungju
A	39.80	8.67	40.37	17.07	32.60	2.68	6.78	7.43	6.40	21.18	13.36
B	23.43	81.47	21.12	52.14	19.84	46.15	51.60	34.00	41.06	24.13	43.34
C	36.04	8.89	37.34	30.13	46.76	50.49	39.62	57.98	51.30	50.75	41.29
D	0.10	0.12	0.26	0.19	0.19	0.00	0.03	0.31	0.04	2.41	0.34
E	0.63	0.85	0.91	0.46	0.61	0.68	1.97	0.27	1.21	1.52	1.66
A+B	63.23	90.14	61.49	69.22	52.44	48.83	58.37	41.43	47.46	45.32	56.70
C+D	36.14	9.02	37.60	30.33	46.94	50.49	39.65	58.30	51.34	53.16	41.64
A+B+C+D+E	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

※ A : Silt loam, B : Loam, C : Sandy loam, D : Loamy sand, E : others

**Fig. 4. Seasonal variation of coefficient of variation (C.V.) of soil water contents.****Table 3. Coefficient of variation (C.V.) of soil water contents of top soils in different season in a region.**

Season	Goesan	Danyang	Boeun	Yeong-dong	Okcheon	Eumseong	Jecheon	Jeung-pyeong	Jincheon	Cheongju	Chungju
Spring	0.067	0.061	0.144	0.136	0.155	0.113	0.087	0.185	0.157	0.134	0.076
Summer	0.250	0.136	0.196	0.196	0.171	0.295	0.187	0.326	0.292	0.274	0.251
Fall	0.115	0.153	0.189	0.244	0.203	0.250	0.174	0.240	0.298	0.133	0.143

성균 및 청주시의 경우 모래함량이 높은 사양토와 양질사토의 비율이 50% 이상으로 높게 나타났으나, 표준편차가 낮은 제천시, 단양군, 영동군, 괴산군 등은 점토와 실트 함량이 높은 미사질 양토 또는 양토의 비율이 높게 나타났다 (Table 2). 따라서 토양수분 변동특성은 토성이 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

변동계수를 이용한 발토양 토양수분 변동 특성 평가
계절 변화와 강수 등에 의해 변하는 토양수분의 시공간 변동 특성 파악을 위해서는 긴 기간을 대상으로 토양수분을 관측하여야 한다. 본 연구에서는 통계적 신뢰성을 높이기 위하여 마이크로파에 의한 위성관측을 통해 8개월 (3월~10월) 동안 일별 토양수분 데이터를 이용하여 충청북도 시군별 발토양을 대상으로 계절에 따른 변동계수 분포 특성을

파악하였다 (Fig. 4). 그 결과, 전반적으로 많은 강우로 인해 여름철의 변동계수 값이 가장 불안정한 패턴을 나타내었다. 또한, 봄철은 가을철보다 많은 강우량이 내렸음도 불구하고 상대적으로 안정적인 패턴을 보이는 반면, 가을철은 다른 계절에 비해 적은 강우량이 내렸음에도 불구하고, 변동계수가 크게 나타났다. 그러나 증평군, 음성군 및 청주시와 같이 토양수분의 변동성이 큰 지역의 경우 여름철보다 가을철에 변동계수가 높게 나타난 반면, 단양군, 옥천군 및 영동군과 같이 변동성이 낮은 지역은 여름철의 변동계수가 가장 높게 나타났다 (Table 3). 즉, 모래 함량이 높은 지역일수록 여름철보다는 가을철의 토양수분 변동성이 크고, 실트 함량이 높은 지역은 여름철의 토양수분 변동성이 높은 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 모래 함량이 높은 토양이 실트질 토양보다 투수성이 높아 가을철에 토양수분의 이

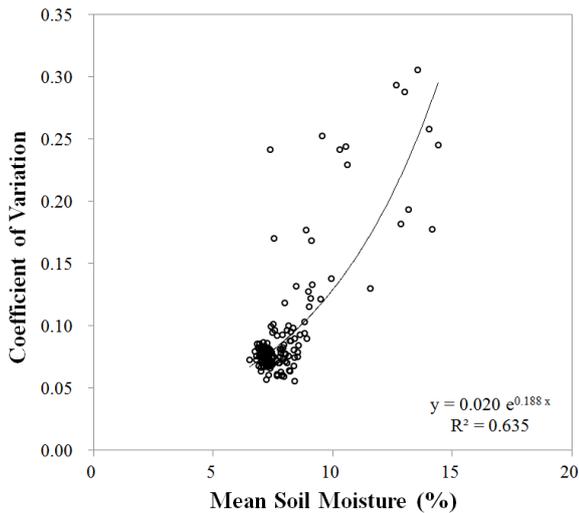


Fig. 5. Relation between coefficient of variation (C.V.) and mean soil moisture.

동이 용이하기 때문인 것으로 판단된다.

또한, 충청북도 시군별 밭토양을 대상으로 일단위 토양수분 평균값과 변동계수와의 분포를 나타내면 Fig. 5와 같다. 토양수분 평균값과 변동계수와의 관계식을 통해 토양의 건조상태에 따라 토양수분량의 변동성이 급격히 증가 또는 감소하는 것을 알 수 있다. 그 결과, 밭토양의 토양수분 평균값과 변동계수는 지수식으로 표현되며, 결정계수 (R^2)는 0.635로 나타났다. 일반적으로 토양수분 평균값과 변동계수와의 관계는 반비례 그래프의 형태를 가지며, 평균토양수분량이 5% 미만일 때에 더 잘 맞는 경향을 나타낸다고 보고되고 있다. Choi et al. (2007)은 Iowa 주의 Walnut Creek 유역의 평균 토양수분과 변동계수 관계는 토양수분량이 적을수록 변동성이 커지는 경향을 나타내며 그 관계는 지수함수의 형태로 표현된다고 보고하였다. 그러나 Fig. 4와 같이 밭토양의 토양수분 평균값과 변동계수는 지수식으로 표현되지만 일반 건조지역과는 달리 토양수분이 클수록 변동성이 급격히 증가하였으며 토양수분 평균값이 7% 이하일 경우 더 잘 맞는 경향을 나타냈다. 이러한 현상도 AMSR2 SMC의 기계적 관측한계와 인위적인 배수 조건에 의한 밭토양의 특성 때문인 것으로 판단된다. 따라서 영농활동이 활발한 밭토양의 토양수분 변동 특성은 자연상태의 토양수분 변동 특성과는 다른 양상을 보이는 것으로 판단된다.

Conclusion

본 연구에서는 2014년 3월부터 10월까지 일별 AMSR2 SMC를 대상으로 스마트 팜 맵을 이용하여 충청북도 시군별 밭을 대상으로 통계적인 기법을 이용하여 토양수분의 시공간적 변동특성을 파악하고자 하였다. 그 결과, AMSR2 SMC에 의한 충청북도 밭토양의 토양수분은 5.13 ~ 21.78%의 범

위를 나타내었으며, 강우에 따라 반응을 하기는 하지만 무강우시에도 크게 떨어지지 않는 경향을 나타내었다. 충청북도 밭토양 토양수분의 시간적 변동 특성은 모든 시군에서 7월의 토양수분이 가장 높게 나타났고 9월의 토양수분이 가장 낮은 것으로 나타났으며, 공간적 변동 특성으로는 진천군 및 증평군, 음성군 등이 토양수분의 변동성이 큰 지역으로, 제천시, 단양군, 옥천군 등은 변동성이 낮은 지역으로 나타났다. 또한, 모래 함량이 높은 지역일수록 여름철보다는 가을철의 토양수분 변동성이 크고, 실트 함량이 높은 지역은 여름철의 토양수분 변동성이 높은 것으로 나타났으며, 일단위 토양수분 평균값과 변동계수와의 관계는 지수식으로 나타났다. 그러나 일반적인 건조지역에서의 토양수분 변동 특성과 비교해 볼 때, 밭토양의 토양수분 변동 특성은 다른 양상을 나타내었다. 물론 강우사상과 토성에 큰 영향을 받는다는 점은 동일하게 나타났지만 무강우시에도 토양수분이 감소하지 않고 토양수분이 클수록 변동성이 급격히 증가한다는 특성에서 차이를 나타낸 것으로 보인다. 따라서 밭의 토양수분 변화는 강우사상과 토성이 영향을 주지만 작물의 생육시기에 따른 영농방법 및 인위적인 배수 조건에 의한 농경지 물관리도 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한, 실측치 기반의 기존 연구와는 달리 AMSR2 SMC에 의한 토양수분 자료는 심토의 토양수분 및 시간단위 측정이 불가능하고 추정 오차를 내포하고 있다는 점에서 본 연구의 한계가 있지만 향후 실측치를 이용한 AMSR2 SMC의 보정방안에 대한 연구 등이 진행된다면 위성관측을 이용하여 공간의 제약이 없이 효율적인 토양수분 모니터링이 가능할 것으로 판단된다.

References

- Brocca, L., F. Melone, T. Moramarco, and R. Morbidelli, 2009. Soil moisture temporal stability over experimental areas in Central Italy, *Geoderma*, 148:364-374.
- Choi, M.H., and J.M. Jacobs, 2007. Soil moisture variability of root zone profiles within SMEX02 remote sensing footprint, *Remote Sens. Environ.*, 30:883-896.
- Eagleson, P., 1978. Climate, soil and vegetation: 1. Introduction to water balance dynamics, *Water Resour. Res.*, 14(5):705-712.
- Famiglietti, J.S., J.A. Devereaux, C.A. Laymon, T. Tsegaye, P.R. Houser, T.J. Jackson, S.T. Graham, M. Rodell, and P.J. van Oevelen, 1999. Ground-based investigation of soil moisture variability within remote sensing footprints during the Southern Great Plains 1997 (SGP97) Hydrology Experiment, *Water Resour. Res.*, 35(6):1839-1851.
- GCOM Data Providing Service Homepage : <https://gcom-w1.jaxa.jp>
- Gwak Y.S., S.H. Kim, S.W. Jung, Y.G. Lee, J.H. Lee, and

- S.J. Kim, 2015. Spatial and seasonal variability of soil moisture properties along transect line on a forest hillslope in the Cheong-Mi Catchment, Korean J. Agric. For. Meteorol., 17(1):45-57 (in Korean).
- Heathman, G.C., M. Larose, M.H. Cosh, and R. Bindlish, 2009. Surface and profile soil moisture spatio-temporal analysis during an excessive rainfall period in the Southern Great Plains, USA, *Catena*, 78:159-169.
- Hong, S.C., B.H. Lee, S.J. Jang, and Y.H. Park, 2015. Improve the quality of farm map using unmanned aerial photogrammetry, 2015 Conference of The Korean Society for GeoSpatial Information Science
- Hong, W.Y., M.J. Park, J.Y. Park, G.A. Park, and S.J. Kim, 2009. The correlation analysis between SWAT predicted forest soil moisture and MODIS NDVI image, Korean Soci. Remote Sens. 2009 spring Conference, 111-115 (in Korean).
- Hur, Y.M., and M.H. Choi, 2011. Advanced microwave scanning radiometer E soil moisture evaluation for Haenam flux monitoring network site, Korean J. Remote Sens., 27(2):131-140 (in Korean).
- Hwang, K.T., H.S. Cho, S.O. Lee, and M.H. Choi, 2010. Spatio-temporal variability of soil moisture within remote sensing footprints in semi-arid area, J. Korean Soc. Civil Eng., 30(3B):285-293 (in Korean).
- Kim, G.S., and J.P. Kim, 2011. Correlation analysis between soil moisture retrieved from satellite images and ground network measurements, J. Korean Associ. Geo. Inform. Studies, 14(2):69-81 (in Korean).
- Korean Soil Information System Homepage : <http://soil.rda.go.kr>
- Oh, M.R., T.Y., Gu, Y.M. Kim, G.H. Ryu, M.J. Kim, H.J. Lee, S.M. Kim, H.J. Han, S.J. Park, A.R. Kim, J.S. Jo, and S.J. Shin, 2013. Research for the meteorological and earthquake observation technology and its application (II) - Development of satellite technologies to monitor global environment changes and to apply global precipitation measurement, National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration, 29-42 (in Korean).
- Park, E.J., C.S. Hwang, and J.C. Seong, 2002. The analysis of drought susceptibility using soil moisture information and spatial factors involved in satellite imagery, J. GIS Associ. Korea, 10(3):481-492 (in Korean).
- Park, J.A., and G.S. Kim, 2011. Estimation of spatial distribution of soil moisture at Yongdam Dam watershed using artificial neural networks, J. Korean Geo. Soci., 46(3): 319-330 (in Korean).
- Pierdicca, N., Pulvirenti, L., and Bignami, C., 2010. Soil moisture estimation over vegetated terrains using multi-temporal remote sensing data, *Remote Sens. Environ.*, 114(2):440-448.
- Qiu, Y., B. Fu, J. Wang, and L. Chen, 2001. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China, *J. Arid Environ.*, 49:723-750.
- Rodriguez-Iturbe, I., A. Porporato, F. Laio, and L. Ridolfi, 2001. Plants in water-controlled ecosystems: Active role in hydrologic processes and response to water stress. I: scope and general outline, *Adv. Water Resour.*, 24(7):697-705.
- Santanello Jr., J. A., C.D. Peters-Lidard, M.E. Garcia, D.M. Mocko, M.A. Tischler, M.S. Moran, and D.P. Thoma, 2007. Using remotely-sensed estimates of soil moisture to infer soil texture and hydraulic properties across a semi-arid watershed, *Remote Sens. Environ.*, 110(1):79-97.
- Seo, M.C., H.S. Cho, W.T. Jeon, M.T. Kim, T.S. Park, K.Y. Seong, and Y.K. Sonn, 2012. Interpretation of water in upland soil using profile soil moisture sensors, Korean Soci. Soil Sci. Fert. Conference: 71 (in Korean).
- Wang, L., J. Wen, T. Zhang, Y. Tian, X. Shi, X. Wang, R. Liu, J. Zhang and S. Lu, 2009. Surface soil moisture estimates from AMSR-E observations over an arid area, Northwest China, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 6:1055-1087.
- Ye, Q., L. Chai, L. Jiang, and S. Zhao, 2014. A downscaling approach of phase transition water content using AMSR2 and MODIS products, In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International*:3323-3326.