



## TIGGE/S2S 기반 중장기 토양수분 예측 및 검증

### Verification of Mid-/Long-term Forecasted Soil Moisture Dynamics Using TIGGE/S2S

신용희<sup>a</sup> · 정임국<sup>b</sup> · 이현주<sup>c</sup> · 신용철<sup>d,†</sup>

Shin, Yonghee · Jung, Imgook · Lee, Hyunju · Shin, Yongchul

#### Abstract

Developing reliable soil moisture prediction techniques at agricultural regions is a pivotal issue for sustaining stable crop productions. In this study, a physically-based SWAP(Soil-Water-Atmosphere-Plant) model was suggested to estimate soil moisture dynamics at the study sites. ROSETTA was also integrated to derive the soil hydraulic properties( $\alpha$ ,  $n$ ,  $\Theta_r$ ,  $\Theta_s$ ,  $K_s$ ) as the input variables to SWAP based on the soil information(Sand, Silt and Clay-SSC, %). In order to predict the soil moisture dynamics in future, the mid-term TIGGE(THORPEX Interactive Grand Global Ensemble) and long-term S2S(Subseasonal to Seasonal) weather forecasts were used, respectively. Our proposed approach was tested at the six study sites of RDA(Rural Development Administration). The estimated soil moisture values based on the SWAP model matched the measured data with the statistics of Root Mean Square Error(RMSE: 0.034~0.069) and Temporal Correlation Coefficient(TCC: 0.735~0.869) for validation. When we predicted the mid-/long-term soil moisture values using the TIGGE(0~15 days)/S2S(16~46 days) weather forecasts, the soil moisture estimates showed less variations during the TIGGE period while uncertainties were increased for the S2S period. Although uncertainties were relatively increased based on the increased leading time of S2S compared to those of TIGGE, these results supported the potential use of TIGGE/S2S forecasts in evaluating agricultural drought. Our proposed approach can be useful for efficient water resources management plans in hydrology, agriculture, etc.

**Keywords:** Soil moisture; SWAP; ROSETTA; TIGGE; S2S

## 1. 서 론

기후변화의 영향으로 인한 홍수 및 가뭄과 같은 이상기후 현상의 빈번한 발생은 농업분야에서 작물 생육 및 생산량 감소에 직접적인 영향을 미친다. 농업가뭄은 작물이 성장하는 과정에서 요구되는 필요수량을 적시에 공급받지 못할 경우 발생하며 발작물의 경우 토양수분의 부족으로 정의된다(Choi and Jung, 1996). 토양수분은 농업과 식생에 중요한 연관관계가 있는 수문인자로 농경지 가뭄이 지속되면 토양수분 결핍이 발생하고 식생의 수분 스트레스를 증가시켜 작물 생산성이 저하된다(Kim et al., 2006). 안정적인 작물 생산을 위해

요구되는 토양 내 물의 양은 작물 재배 지역의 기상조건 및 토양특성에 따라 다르게 나타난다(Eom et al., 2010; Lee and Shin, 2016). 효율적인 농업용수 관리를 위해서는 작물의 생육 시기별 물 소비량 추정과 더불어 토양 내 수분 함량 변화에 대한 정확한 추정이 필요하지만 토양 내 물 소비구조가 복잡한 관계로 농경지 토양수분 함량 추정에 대한 연구가 상대적으로 미흡한 실정이다.

최근 쌀 소비 감소로 인한 공급량 과잉 현상이 지속적으로 발생하며 정부는 ‘논 소득기반 다양화 사업’을 통해 논에 대한 발작물 재배 전환을 유도하고 있다(Seo et al., 2012). 하지만 발작물은 논벼와 비교해 작물의 종류가 다양하고 토양 내 수분 조건에 민감하게 반응하기 때문에 적절한 토양수분 관리가 중요하다(Nam et al., 2014). Seo and Lee (2002)는 Penman-Monteith 방법과 작물의 생육단계별 작물계수를 이용한 농경지 증발산량 산정 방법과 물수지 모형 기반의 토양수분 추정 방법 제시를 통해 발작물 재배지역에 대한 필요수량을 추정하였다. 농경지 토양수분 함량 추정에 관한 기존 연구는 대부분 기상정보만을 고려한 토양수분 물수지 모형이 이용되고 있어 실제 농경지 관계계획 수립에 한계가 존재한다. Seo et al., (2012)은 토양특성과 기상정보 그리고 재배이력을 고려한 물 수지 모형 개발을 통해 일별 토양수분 함량 추정 기법을 제안했다. Jang (2009)은 기후특성과 지표특성(토양,

<sup>a</sup> Research Fellow, Climate Services and Research Department, APEC Climate Center

<sup>b</sup> Researcher, Climate Services and Research Department, APEC Climate Center

<sup>c</sup> Researcher, Climate Services and Research Department, APEC Climate Center

<sup>d</sup> Associate Professor, School of Agricultural Civil & Bio-Industrial Engineering, Kyungpook National University

† Corresponding author

Tel.: +82-53-950-5734 Fax.: +82-53-950-6752

E-mail: yeshin@knu.ac.kr

Received: December 4, 2018

Revised: December 11, 2018

Accepted: December 17, 2018

작물 등을 고려하는 물리적 특성 기반 모형인 SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant, van Dam et al., 1997; Belmans et al., 1983)을 이용해 농업용수 생산성과 그에 따른 환경영향을 분석하였다. SWAP 모형은 농경지 토양층에 대한 물 수지를 계산하는 농업수문학적 모형(Agro-hydrological model)으로 작물의 생육시기별 토양수분 함량의 변동을 모의할 수 있다.

본 연구에서는 농경지 토양에 대한 수리학적 매개변수, 기상 정보 및 작물 생육정보를 고려하는 토양수분 함량 추정 기법과 토양수분 관측 자료와의 비교를 통해 신뢰성을 검증하였으며, 검증된 토양수분 함량 추정 기법에 예측 기상 시나리오를 연계하여 중장기 토양수분 함량 예측 가능성을 평가하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 자료 수집

#### 가. 토양수분 관측 자료

토양수분 모형의 예측성 검증을 위해 농촌진흥청(Rural Development Administration, RDA) 기상관측망(Automatic Weather System, AWS)의 표토층 10 cm 깊이에 매설된 토양수분 센서로부터 측정되는 토양수분 관측 자료를 수집하였다. 농촌진흥청은 전국 100여개 농경지 토양수분 관측지점으로 부터 수집된 토양수분 정보를 농촌진흥청 농업기상정보서비스(<http://weather.rda.go.kr>)를 통해 실시간으로 제공한다. 본 연구에서는 토양층의 동결로 인한 관측 결측기간을 고려하여

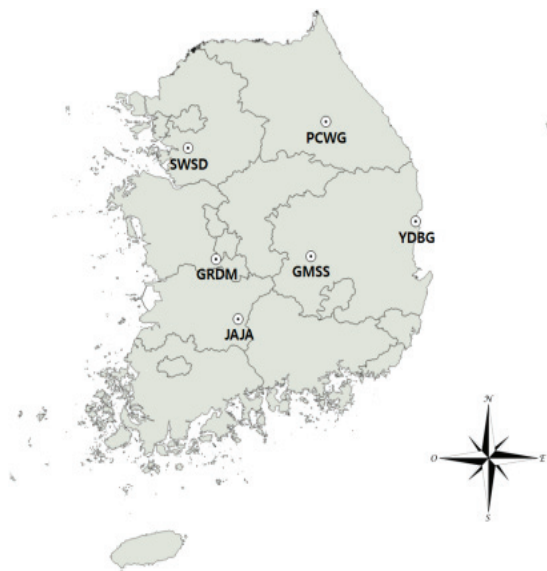


Fig. 1 Locations of the six Rural Development Administration (RDA) monitoring sites

4월부터 10월까지 측정된 토양수분 관측 자료를 수집하였다. 토양수분 및 기상 관측 자료의 결측이 없는 관측지점 중에서 Fig. 1과 같이 지역적 분포를 고려한 GMSS(구미선산), GRDM(계룡두마), JAJA(장수장수), PCWG(평창원곡), SWSD(수원서둔), YDBG(영덕병곡)의 6개 관측지점을 선정해 토양수분 모형 입력자료를 구축하였다.

#### 나. 토양 특성 자료

토양수분 모의에 필요한 토양의 수리학적 매개변수( $\alpha$ ,  $n$ ,  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $K_s$ )를 추정하기 위해 토양수분 관측지점 토양에 대한 Sand, Silt, Clay 비율(SSC, %) 자료를 수집하였다. 농촌진흥청에서는 전국 농업기상 AWS 관측지점에 대한 토양 시료 채취 및 입도분석 실험을 통해 수집한 토양의 물리적 특성 자료를 제공하고 있다. Fig. 2는 농촌진흥청의 6개 기상 관측지점 토양에 대한 SSC 비율 자료를 이용하여 USDA(United States Department of Agriculture) 삼각토양분류법으로 분류한 토성 결과를 나타내고 있으며 Sandy loam(사양토) 토양이 2 곳, Loam(양토) 토양이 1 곳, Loamy sand(양질사토) 토양이 3 곳으로 분류되었다.

#### 다. 기상 관측 자료

토양수분 모형의 기상 입력자료 구축을 위해 농촌진흥청의 농업기상 관측지점에 대한 기상 관측 자료를 수집하였다. 토양수분 모의를 위한 입력 기상변수로 일단위의 일사량(kJ/m<sup>2</sup>), 일최저기온(°C), 일최고기온(°C), 기압(kPa), 풍속(m/s), 강수량(mm) 자료가 요구된다. 농촌진흥청의 농업기상 관측지점

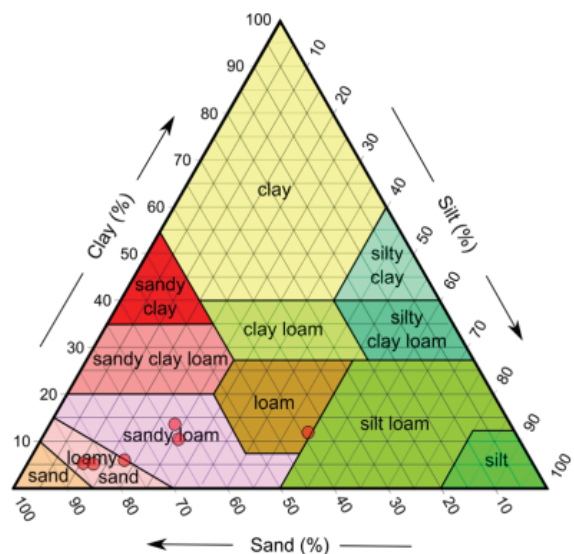


Fig. 2 Classification of soil characteristics for the AWS monitoring sites of Rural Development Administration (RDA) (6 sites)

에서는 기압이 관측되지 않는 관계로 FAO 56 보고서(Allen et al., 1998)의 식 (1), (2)를 이용해 기온과 상대습도 자료로부터 실제 기압을 산출하였다.

$$e^o(T) = 0.6108 \exp \left[ \frac{17.27 T}{T + 237.3} \right] \quad (1)$$

$$e_a = \frac{RH \cdot e^o(T)}{100} \quad (2)$$

여기서  $e^o(T)$ 는 일평균기온(T)에 대한 포화수증기압,  $e_a$ 는 실제 기압,  $RH$ 는 상대습도를 나타낸다.

라. 중장기 예측 기상 시나리오

토양수분 모형을 이용한 농경지의 중장기 토양수분 예측을 위해 중기 예측 기상 자료인 TIGGE(THORPEX Interactive Grand Global Ensemble)와 계절내 예측자료인 S2S (Subseasonal to Seasonal, WMO, 2005; WWRP, 2018)의 결합을 시도하였다. 전 세계 현업기관 중 검증을 통해 예측력이 우수하다고 판단된 ECMWF(European Centre for Medium- Range Weather Forecasts)의 TIGGE 및 S2S 예측자료를 한반도 지역을 중심으로 수집하였으며, 역거리 가중치법(IDW, Inverse Distance Weighted) 적용을 통해 각 농업기상 관측지점에 대한 예측 기상 시나리오를 생산하였다. TIGGE 자료는 매일 00UTC와 12UTC에 생산되며 S2S 자료는 일주일에 두 번(월요일, 목요일) 생산되고 있으며, 본 연구에서는 매주 월요일에 생산되는 TIGGE와 S2S 자료를 수집하였다. 중장기 토양수분 함량 예측을 위해 2017년 8월 15일을 예측 시점으로 하는 선행시간 0일부터 15일까지의 TIGGE 예측 자료(5개 앙상블 멤버)와 선행시간 16일부터 46일까지의 S2S 예측 자료(5개 앙상블 멤버)를 결합하였으며, 각 1~5번 앙상블(ensemble) 멤버를 결합한 Sim\_1, Sim\_2, Sim\_3, Sim\_4, Sim\_5와 단순 앙상블 평균한

Sim\_MME가 적용된 예측 기상 시나리오를 이용하였다.

2. 토양 수리학적 매개변수 추정

가. ROSETTA 모형

다양한 토양 실험자료(2,085개 샘플)를 바탕으로 하는 ROSETTA 모형은 인공신경망(Artificial neural network) 기반 PTFs(PedoTransfer functions) 기법을 이용하여 토양특성 (Sand, Silt, Clay-SSC, %), 용적밀도(Bulk density, BD), 33 kPa 또는 1500 kPa 부압에서의 토양수분함량 정보 중에서 이용 가능한 정보를 선택적으로 입력하여 대상 토양에 대한 수리학적 매개변수를 도출한다(Heo et al., 2006; Carlos et al., 2012). 본 연구에서는 입도분석 실험을 통해 얻어진 농업기상 관측지점 토양에 대한 SSC 비율 정보를 ROSETTA(Schaap et al., 2001) 모형에 적용하여 대상 관측지점 토양의 수리학적 매개변수를 추정하였다.

나. 토양 수리학적 매개변수

토양수분 모형을 이용한 토양수분 함량 추정을 위해서는 토양의 수리학적 매개변수에 대한 정보가 필요하다. ROSETTA 모형을 통해 추정되는 토양의 수리학적 매개변수에는 토양 잔류 수분함량인  $\theta_r$ ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )와 포화 수분함량  $\theta_s$ ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ), 토양의 포화 수리전도도인  $K_s$ ( $\text{cm}/\text{day}$ ), 토양수분 특성곡선의 형상 계수인  $\alpha$ (-)와  $n$ (-) 등이 있다. Table 1은 대상 관측지점 토양에 대한 SSC 비율 정보와 ROSETTA 모형 적용을 통해 추정된 5가지 토양의 수리학적 매개변수를 나타낸다.

3. 토양수분 모형

가. SWAP 모형 개요

1차원(1-dimensional) 기반의 물리적 특성 기반 SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) 모형은 토양, 물, 대기, 작물 사이의 물리적 상호작용에 대한 일 단위 예측을 통해 토양층의

Table 1 The soil texture and ROSETTA-driven soil hydraulic properties at the AWS monitoring sites of Rural Development Administration(RDA)

ID	Location		Soil Texture(%)			Soil hydraulic parameter				
	Lat.	Lon.	Sand	Silt	Clay	$\theta_r$ ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )	$\theta_s$ ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )	$\alpha$ (1/cm)	$n$ (-)	$K_s$ (cm/day)
GMSS	36.23	128.29	84.0	10.5	5.5	0.044	0.382	0.038	1.914	141.7
GRDM	36.20	127.28	82.2	12.5	5.3	0.042	0.384	0.040	1.804	118.1
JAJA	35.62	127.51	62.8	23.4	13.8	0.049	0.386	0.028	1.387	30.0
PCWG	37.54	128.45	38.6	49.3	12.1	0.049	0.403	0.006	1.591	27.5
SWSD	37.28	126.98	76.0	17.9	6.1	0.038	0.387	0.041	1.546	71.7
YDBG	36.57	129.40	63.7	25.7	10.6	0.043	0.386	0.029	1.400	37.4

토양수분을 산정한다(van Dam et al., 1997; Belmans et al., 1983). 포화 및 불포화 토양층에 대한 토양수분의 흐름은 Richard 방정식에 의해 설명되며 토양수 흐름 방정식은 식 (3) 과 같다.

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S_r(z) \quad (3)$$

여기서,  $C$ 는 토양수분용적 ( $\text{cm}^3$ ),  $h$ 는 토양수 압력수두 (cm),  $t$ 는 시간 (d),  $z$ 는 토양깊이 (cm, positive upward),  $K$ 는 불포화 수리전도도 ( $\text{cm/day}$ ),  $S_r$ 은 식물 뿌리에 의해 흡수되는 토양수분 흡수율( $\text{cm}^3/\text{cm}^3/\text{day}$ )이다. SWAP 모형은 지표 및 토양하부 경계조건과 토양의 수리학적 특성의 관계를 이용해 Richard 방정식을 수치적으로 계산한다. 토양의 수리학적 함수( $\theta(h)$  및  $K(h)$ )는 van Genuchten(1980)과 Mualem(1976)에 의해 제시된 공식 (4)와 (5)를 이용하여 해석된다.

$$S_e(h) = \frac{\theta(h) - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} = \left[ \frac{1}{1 + |\alpha h|^n} \right]^m \quad (4)$$

$$K(h) = K_{sat} S_e(h)^\lambda [1 - (1 - S_e(h)^{1/m})^m]^2 \quad (5)$$

여기서  $S_e$ 는 상대적 포화도(-),  $\theta$ 는 토양의 수리학적 수분 함량 함수 및  $K$ 는 토양의 수리학적 수리전도도 함수를 나타낸다.

#### 나. 토양수분 모의 및 예측

본 연구에서는 농촌진흥청에서 운영하고 있는 AWS 관측 지점중에서 결측값이 없는 6개 지점을 선정하여 SWAP 모형을 검증하였다. 토양층 0-10cm 깊이의 토양수분을 모의하여 실측 토양수분과 검증하였다. 또한 검증된 지점의 토양의 수리학적 매개변수와 ECMWF 기반 중장기 예측 기상 시나리오를 이용하여 토양수분을 예측하였다. 토양수분 함량 모의는 1년 단위로 실시되며 작물 생육시기를 고려해 분석 기간을 4월부터 10월까지로 설정하였다. 모의된 토양수분의 검증은 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)와 시계열상 관계수(Temporal Correlation Coefficient, TCC)를 이용하여 신뢰성을 평가하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (6)$$

$$TCC = \frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

여기서  $n$ 은 기간(일),  $y_i$ 는 예측 값,  $x_i$ 는 관측 값 및  $\bar{x}, \bar{y}$ 는 평균값이다.

### III. 결 과

#### 1. 토양수분 모형 검증

##### 가. RDA 토양수분 관측지점

농촌진흥청 농업기상 관측지점의 토양수분 관측 자료는 지표면 10 cm 깊이에 설치된 TDR(Time Domain Reflectometry) 토양수분 센서로 부터 1시간 간격으로 측정된다. 본 연구에서는 2017년 4월 1일부터 10월 31일까지 측정된 토양수분 함량과 SWAP 모형의 모의 결과를 비교하였다. 6개 농업기상 관측 지점에 대해 토양수분 관측 자료와 SWAP 모형의 모의 결과를 비교한 결과 Fig. 3과 같이 대부분의 관측지점에서 모의 결과가 관측 값에 비해 다소 과소산정되는 경향을 보이고 있으며, 특히 토양수분 함량 0.2~0.3 구간에서 이러한 경향이 강하게 나타났다. 이는 여름철 강우발생 후 다음 강우발생 전까지 SWAP 모형의 모의 결과가 관측 값에 비해 대체적으로 감소폭이 크기 때문으로 판단되었다. 농촌진흥청의 6개 기상 관측지점에 대해 실시한 SWAP 모형의 신뢰성 검증 결과로 RMSE가 0.034에서 0.069 사이, TCC가 0.735에서 0.869 사이로 나타나 SWAP 모형을 이용한 농업기상 관측지점에 대한 토양수분 함량 추정 기법의 현장 적용성이 만족할 만한 수준에서 검증되었다.

우리나라의 기후특성은 강수량이 여름철에 집중되는 경향을 보이며 봄, 가을 및 겨울에는 적은 강수량으로 인해 가뭄 발생 위험이 높아진다. Fig. 4는 농업기상 관측지점에 대한 2017년 4월부터 10월까지의 월별 강수량 자료와 토양수분 함량의 관측 및 모의 결과를 나타낸다. 관측 시작 월인 4월에는 YDBG를 제외한 대부분의 관측지점에서 토양수분 함량의 모의 결과가 관측 값보다 다소 낮게 추정되었지만 전반적으로 강수량의 계절 변동에 따른 토양수분 함량의 변동을 모의 결과가 잘 모의하는 것으로 나타났다. 또한 지역별 강수량의 차이가 상당히 크게 발생하는 것으로 나타나 지역적 특성을 고려한 가뭄 관측 및 대응책 수립이 필요한 것으로 판단된다.



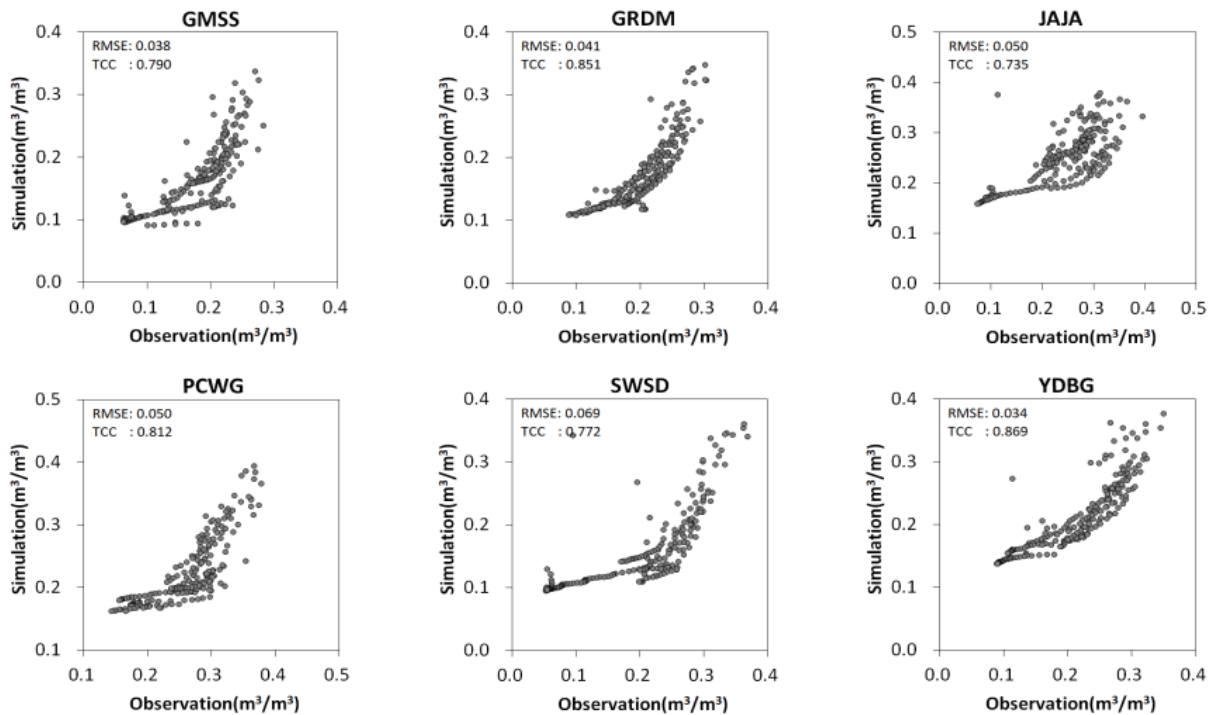


Fig. 3 Comparison of the observed and estimated soil moisture dynamics at the AWS monitoring sites of Rural Development Administration (RDA) in 2017

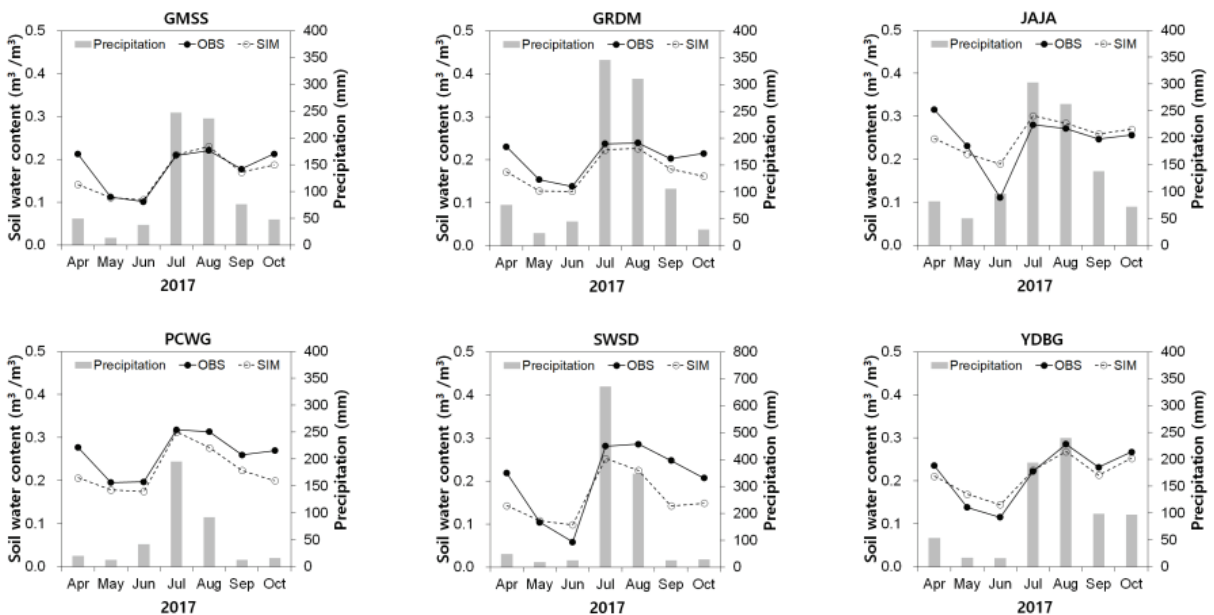


Fig. 4 Comparison of observation and model simulation results of soil water content from the AWS sites of Rural Development Administration (RDA) in 2017

## 2. 토양수분 증장기 예측

농업가뭄이 점진적 및 광역적으로 발생하는 특성을 고려할 경우, 농업가뭄에 선제적으로 대응하기 위해서는 토양수분

예측을 통한 관개수량 결정이 필요하다. 본 연구에서는 토양수분 함량의 변동을 예측하기 위하여 SWAP 모형과 ECMWF의 TIGGE(0~15일 예측)/S2S(16~46일 예측) 자료를 연계하

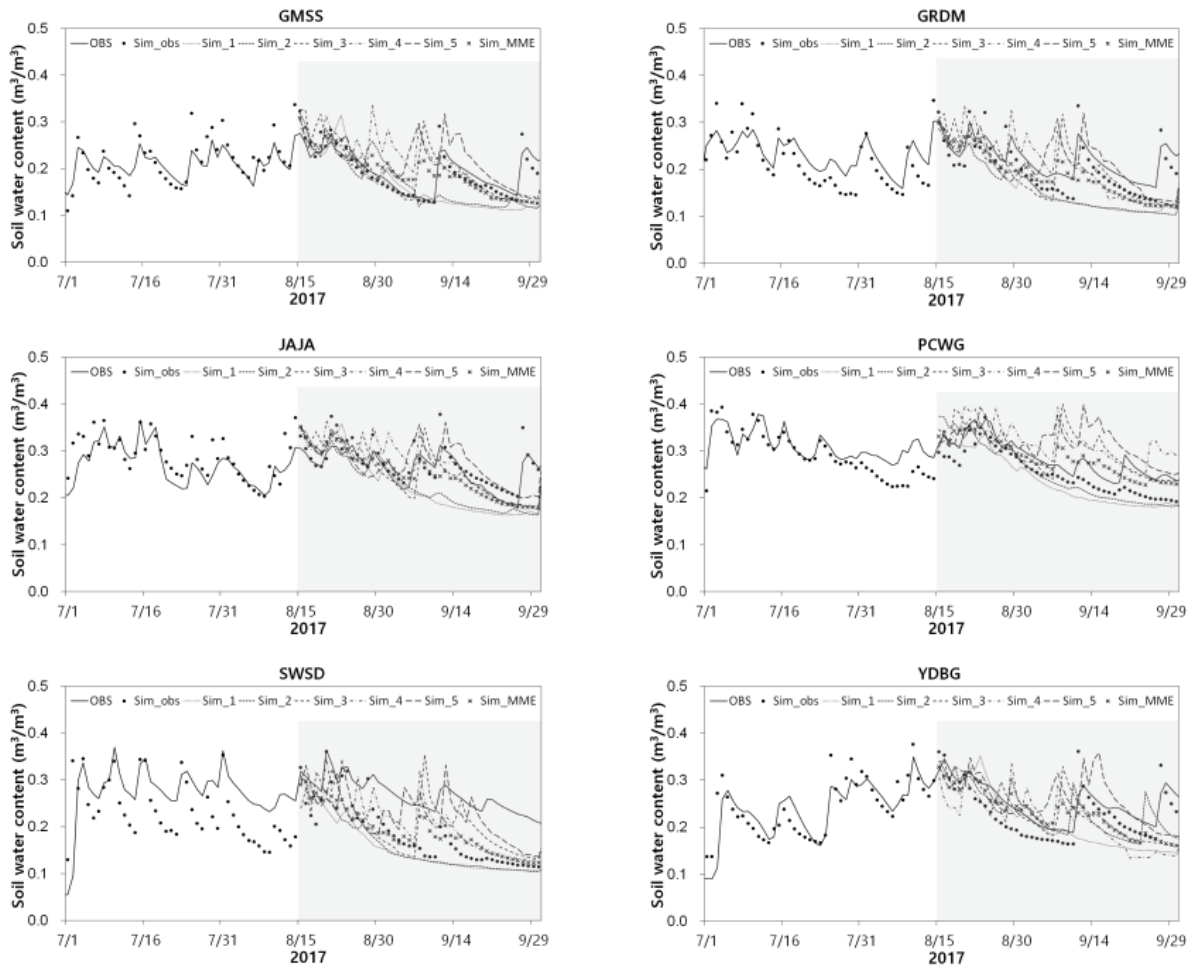


Fig. 5 Comparison of observation and model simulation results of soil water content from the AWS sites of Rural Development Administration (RDA) in 2017

여 중장기 토양수분을 예측하였다. Fig. 5는 2017년 8월 15일을 기준으로 각 관측지점에 대한 기상관측 자료와 5개 앙상블 예측 기상 시나리오만을 이용해 예측한 토양수분의 변동을 나타낸다. 연구기간동안 실측 기상자료를 이용하여 산정된 토양수분(Sim\_obs)은 TDR 기반 실측값을 잘 반영하는 것으

로 나타났다. 중장기 예측 기상 시나리오에 따른 토양수분의 일별 변동성은 1~2주의 짧은 선행예측 기간(TIGGE)에 관측과 비슷한 변동성을 보였지만 선행예측(S2S) 기간이 길어질수록 관측 자료와 비교해 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. Table 2는 TIGGE와 S2S의 각각의 예측기간에 따른 토양수분

Table 2 Statistics of the predicted soil water content, temperature and precipitation by TIGGE and S2S

ID	Soil water content				Temperature				Precipitation			
	TIGGE		S2S		TIGGE		S2S		TIGGE		S2S	
	RMSE	TCC	RMSE	TCC	RMSE	TCC	RMSE	TCC	RMSE	TCC	RMSE	TCC
GMSS	0,022	0,845	0,051	-0,192	2,283	0,243	2,129	0,475	13,084	0,467	10,487	-0,012
GRDM	0,026	0,629	0,058	0,199	2,133	0,253	2,469	0,328	18,988	0,305	14,856	-0,021
JAJA	0,026	0,469	0,042	0,500	2,406	0,130	3,409	0,394	15,894	0,281	15,997	-0,008
PCWG	0,020	0,427	0,023	0,487	2,271	0,096	3,512	0,469	10,676	0,242	7,639	-0,020
SWSD	0,067	0,288	0,090	0,596	2,100	0,281	2,625	0,301	33,986	0,221	9,679	0,006
YDBG	0,021	0,804	0,054	-0,224	2,260	0,274	2,308	0,377	11,416	0,444	13,861	-0,045

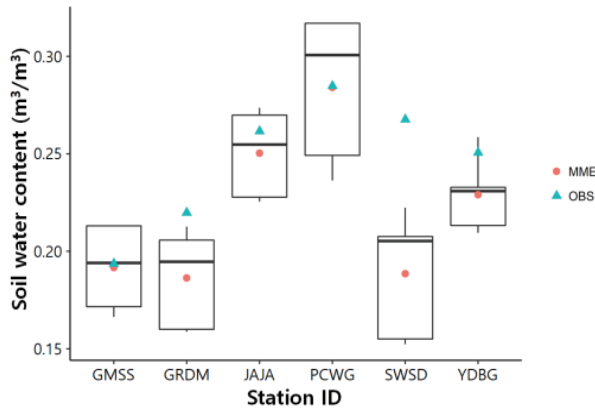


Fig. 6 Comparison of observation and model simulation results of soil water content from the AWS sites of Rural Development Administration(RDA) in 2017

함량, 기온, 강수량의 예측성을 RMSE와 TCC로 나타내고 있으며 앙상블 예측 시나리오의 평균(MME)을 비교하였다. 대상 관측지점별 토양수분 함량의 RMSE 분석 결과에서 TIGGE 모형이 S2S 모형보다 전체적으로 낮은 것으로 나타나 TIGGE 모형의 예측성이 S2S 모형보다 높은 것으로 나타났다. 토양수분 함량의 TCC 분석 결과에서는 GMSS와 YDBG 관측지점에서 TIGGE의 예측성이 S2S보다 상당히 높게 나타나고 있는 반면에 SWSO 관측지점에서 S2S의 예측성이 TIGGE보다 높게 나타났다. 중장기 기상 시나리오에 대한 예측성을 분석한 결과 기온의 경우 S2S의 예측성이 높게 나타났으며, 강수량의 경우 역시 TIGGE의 예측성이 높게 나타나고 있지만 하나의 예측지점에 대한 분석결과만으로 TIGGE와 S2S의 예측성을 평가하기에는 미흡한 것으로 판단된다. 예측기간인 8월 15일부터 9월 30일까지의 시나리오별 토양수분 함량의 평균을 비교한 결과 Fig. 6과 같이 예측 시나리오에 따른 토양수분 함량 예측의 불확실성이 나타났다. GMSS 관측지점의 경우 관측 값과 예측 시나리오의 MME 결과 그리고 중간 값이 상당히 유사하게 나타났으며, 예측의 불확실성 범위는 0.166~0.213으로 나타났다. 그러나 SWSO 관측지점의 경우에는 관측 값과 예측 시나리오의 MME 결과에 큰 차이가 나타났으며, 예측의 불확실성 범위 역시 크게 나타났다.

#### IV. 요약 및 결론

토양수분 함량 변동에 대한 정확성 높은 예측기술의 개발은 최근 이상기후 현상으로 인해 빈번히 발생되고 있는 농경지 가뭄 피해를 최소화 하는 동시에 지속가능하며 안정적인 작물 생산을 유지하는데 있어 그 중요성이 크다고 할 수 있다.

본 연구에서는 농경지 토양층에 대한 물리적 특성 기반의 SWAP 모형에 토양의 수리학적 매개변수와 기상관측 자료 그리고 작물 생육정보 등의 입력 자료를 적용함으로써 대상 지점의 토양수분 함량을 추정하는 기법을 제시하였다. 농촌진흥청의 농업기상 관측지점 중에서 지역적 분포를 고려한 6개 관측지점을 대상으로 실시한 토양수분 함량 추정 기법의 검증 결과에서도 RMSE가 0.034에서 0.069 사이, TCC가 0.735에서 0.869 사이로 나타나 현장 적용성이 만족할 만한 수준에서 검증되었다. 농경지 토양수분 함량 예측을 위해 전 세계 현업기관 중 예측성이 가장 좋은 ECMWF 모형의 TIGGE와 S2S 자료를 결합해 생산한 중장기 예측 기상 시나리오를 토양수분 함량 추정 기법에 적용해 본 결과 토양수분 함량의 일 변동성 예측은 짧은 선행 예측기간(TIGGE)에 대해서는 앙상블 평균 RMSE/TCC가 0.030/0.577로 어느 정도 관측 값과 비슷한 변동 패턴을 보였지만 긴 선행 예측기간(S2S)에 대해서는 앙상블 평균 RMSE/TCC가 0.053/0.228로 관측 값과의 차이가 큰 것으로 나타났다. 선행 예측기간을 평균해 비교한 결과에서는 대상 지점에 따라 관측 및 모의 결과가 상당히 유사하게 나타났으나, 예측 기상 시나리오에 따른 불확실성이 존재하고 있어 합리적인 관개 의사결정 지원을 위해서는 다중 앙상블 예측 기상 시나리오를 활용한 확률적 예측 정보를 생산하는 것이 중요하다고 판단된다.

본 연구에서 제시한 농경지 토양수분함량 추정 기법에 토양특성 정보와 이용 가능한 주변 기상관측 자료를 적용함으로써 미세측 농경지에 대한 토양수분 함량 추정이 가능해 질 것으로 판단되며, 지속적인 토양수분 모니터링을 통해 물 스트레스로 인한 농작물의 생산성 감소 피해에 선제적으로 대응해 나갈 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ012855022018)의 지원으로 수행되었음. 기상관측 자료 및 토양수분 자료 제공에 협조해 준 농촌진흥청 국립농업과학원에 감사의 말을 전함.

#### REFERENCES

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements, *Irrigation and Drainage Paper* No. 56, FAO, Rome, Italy.

2. Belmans, C., J. G. Wesseling, and R. A. Feddes, 1983. Simulation of the water balance of a cropped soil, SWATRE, *J. Hydrol.*, 63: 271-286. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90045-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90045-8).
3. Carlos, A. A., J. L. Robert, and S. Leo, 2012. Test of the ROSETTA pedotransfer function for saturated hydraulic conductivity. *Open Journal of Soil Science* 2: 203-212. doi:10.4236/ojss.2012.23025.
4. Choi, J. Y., and H. W. Jung, 1996. Irrigation scheduling with soil moisture simulation model, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 38(1): 98-106 (in Korean).
5. Eom, K. C., P. K. Jung, S. H. Choi, T. W. Kim, S. Y. Yoo, S. H. Park, and Y. K. Sonn, 2010. Water requirement of red pepper in different growth stages, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(6): 844-847 (in Korean).
6. Hur, S. O., K. H. Jung, C. W. Park, S. K. Ha, and G. G. Kim, 2006. Comparison of disk tension infiltrometer and van Genuchten-Mualem model on estimation of unsaturated hydraulic conductivity, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 39(5): 259-267 (in Korean).
7. Jang, T. I., 2009. Environmental effects of reclaimed wastewater irrigation on paddy fields, ph.D. diss., Seoul: Seoul National University.
8. Kim, O. K., J. Y. Choi, M. W. Jang, S. H. Yoo, W. H. Nam, J. H. Lee, and J. K. Noh, 2006. Watershed scale drought assessment using soil moisture index, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 48(6): 3-13 (in Korean).
9. Lee, T., and Y. Shin, 2016. Estimation of irrigation water amounts for farm products based on various soil physical properties and crops, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 58(6): 1-8 (in Korean).
10. Mualem, Y., 1976. A now model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 12(3), 513-522. doi:10.1029/WR012i003p00513.
11. Nam, W. H., E. M. Hong, M. W. Jang, and J. Y. Choi, 2014. Projection of consumptive use and irrigation water for major upland crops using soil moisture model under climate change, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(5): 77-87 (in Korean).
12. Schaap, M. G., F. J. Leij, and M. Th. van Genuchten, 2001. ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions, *Journal of Hydrology* 251 (3-4), 163-176. doi:10.1016/S0022-1694(01)00466-8.
13. Seo, M. C., S. O. Hur, Y. K. Sonn, H. S. Cho, W. T. Jeon, M. K. Kim, and M. T. Kim, 2012. The development of estimation model(AFKAE0.5) for water balance and soil water content using daily weather data, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(6): 1203-1210 (in Korean).
14. Seo, Y. J., and K. Y. Lee, 2002. Estimating upland crop water use, *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* 44(1): 25-34 (in Korean).
15. van Dam, J. C., J. Huygen, J. G. Wesseling, R. A. Feddes, P. Kabat, P. E. V. van Walsum, P. Groenendijk, and C. A. van Diepen, 1997. Theory of SWAP version 2.0: Simulation of water flow and plant growth in the soilwater-atmosphere-plant environment, Tech. Doc. 45, DLO Winand Staring Cent., Wageningen Agric. Univ., Wageningen, Netherlands.
16. van Genuchten, M. T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44(5), 892-898. doi:10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.
17. WMO, 2005. First Workshop on the THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE). WMO, TD-No.1237 [http://www.wmo.int/thorpex/pdf/tigge\\_first\\_workshop\\_report.pdf](http://www.wmo.int/thorpex/pdf/tigge_first_workshop_report.pdf).
18. WWRP, 2018. WWRP/WCRP Sub-seasonal to Seasonal Prediction Project (S2S) Phase I Final Report. WWRP, (WWRP 2018-2) (WCRP Report No. 6/2018) [http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/WWRP\\_2018\\_2\\_S2S\\_Phase\\_I\\_web.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/WWRP_2018_2_S2S_Phase_I_web.pdf).