

밭작물 재배지역의 생육시기별 토양수분 및 소비수량 추정기법 개발

Estimation of Soil Moisture Content and Water Consumption at Different Growth Stages in Upland Crop

신용희

밭작물 재배지역의 생육시기별 토양수분 및 소비수량 추정기법 개발

Estimation of Soil Moisture Content and Water Consumption at Different Growth Stages in Upland Crop

신용희

발간사

최근 들어 기후변화의 영향으로 인해 한반도 지역에서 다양한 이상기후 현상들이 발생되고 있으며 장기간에 걸친 강수량 부족으로 인한 가뭄 발생은 특히 농업분야의 생산량 감소에 직접적인 영향을 미치고 있다. 과거 기상관측 자료를 분석해 본 결과 한반도 지역에서는 어느 정도 주기성을 가지고 가뭄이 나타난 것으로 확인되었으나 최근에는 거의 매년 가뭄이 발생하고 있는 실정이다. 본 센터에서는 기상학적 가뭄과 사회적 가뭄 그리고 농업적 가뭄에 대한 연구를 지속적으로 수행해 오고 있으며 계절예측 자료를 이용한 가뭄 예측과 RS 자료를 이용한 가뭄 모니터링 연구를 통해 가뭄 발생에 선제적으로 대응해 나갈 수 있도록 다양한 접근을 시도하고 있다. 농업가뭄은 작물 생육기간 동안에 작물이 필요로 하는 물 소비량을 적시에 공급하지 못했을 때 발생하는 현상으로 관개설비가 잘 구축되어있는 논 보다는 대부분이 천수농업인 밭작물 재배지역에서 심각한 피해가 발생하고 있기 때문에 토양수분 함량 추정기법 개발을 통해 밭작물 재배지역의 토양수분 상태를 모니터링 해 나갈 필요가 있다.

본 연구보고서 “밭작물 재배지역의 생육시기별 토양수분 및 소비수량 추정 기법 개발”은 농경지 토양층에 대한 작물 생육시기별 토양수분 함량 추정 기법을 개발하여 토양수분 미계측 농경지로 확대 적용할 수 있는 방법을 제안하고자 기획되었다. 검증된 토양수분 함량 추정 기법을 이용해 미계측 농경지에 대한 토양수분 함량의 변동을 추정함으로써 작물의 물 스트레스 위험에 선제적 대응 방안을 마련할 수 있을 것이다. 본 연구를 통해 개발 검증된 토양수분 함량 추정 기법 및 작물 소비수량 추정 기법은 관개설비가 제대로 구축되어 있지 않은 아태

지역의 개도국 또는 태평양 도서국의 농업 분야에 효율적인 물 관리 방안을 제시하는데 있어 그 활용 가능성이 크다는 점에서 더욱 의의를 갖는다.

본 연구보고서가 발간되기까지는 연구를 맡아 수행해 주신 본 센터의 신용희 박사와 김미아 연구원의 노고에 감사드리고 연구의 기획 단계부터 자문위원으로서 아낌없는 조언과 격려를 해 주신 경희대학교 윤진일 교수와 농촌진흥청 국립농업과학원 박찬원 연구관에게 깊은 감사를 표하는 바이다. 또한 농업기상 관측자료와 토양수분 관측자료 그리고 전국 토양통의 토양특성 자료를 제공해 주시고 아낌없는 조언을 주신 농촌진흥청 국립농업과학원의 이경도 박사와 손연규 박사, 그리고 해남KoFlux 관측지점의 자료를 제공해 주신 국가농림기상센터의 강민석 박사에게도 감사의 뜻을 전한다. 본 연구보고서가 밑거름이 되어 향후 관련 연구들이 지속되고 부족한 부분들을 계속 채워나가길 바란다.

2017년 1월
APEC 기후센터
원장 정 홍 상

ABSTRACT

Continuous water stress conditions such as floods and agricultural drought have a decisive effect on reduced crop growth and production in the agricultural sector, processes that are sensitive to climate change. Agricultural drought occurs when crops do not receive timely water requirements in the process of crop growth. In the case of upland crops, it is defined as the lack of soil moisture. Reasonable agricultural water management plans are necessary to build timely and appropriate water supply systems for the proper management of agricultural water. According to statistics, Korea's rice consumption has been steadily decreasing over the past 30 years. The Korean government has recently been promoting a transition to the cultivation of upland crops. Several studies have been carried out to estimate water demand impacts, in terms of consumptive water use of upland crops by growing stages for pepper, potatoes, and maize in open fields. Since previous studies mainly use soil water balance models considering climate characteristics, there are limitations in establishing irrigation plans for actual upland crops. In this study, we have developed a soil moisture content estimation method for growing season of upland crops using the Soil-Water-Atmosphere-Plant (SWAP) model which is a process-based agro-hydrological model that can take into consideration climate characteristics and land surface characteristics (soil, terrain, crops, etc.). Also we proposed a method for estimating the actual crop evapotranspiration over the growing season of upland crops using crop growth information (crop growth stage, crop coefficient) and meteorological observations. Soil hydraulic parameters (θ_{res} , θ_{sat} , K_{sat} , a , n) that represent the retention curve and the unsaturated hydraulic

conductivity–pressure head relationships (van Genuchten et al., 1991) were estimated using the Rosetta model for 55 agricultural weather stations's soils being operated by the Korean National Institute of Agricultural Sciences, 277 soil series, Haenam Farmland KoFlux (HFK) station's soil, Maize and Soybean cultivation area's soils. As a result of analyzing the correlation coefficient (r), root-mean square error (RMSE), and temporal correlation coefficient (TCC) between the estimated soil moisture content and the observed values for the HFK station, it is concluded that the proposed soil moisture content estimation method is reliable. A serious error occurred in the simulation results at four observation points (ID: JCBY, JEJE, SJDG, YCYC) that are sand soil. For sand soil where simulation error occurs, soil hydraulic parameter adjustment is necessary. We estimated the variation in soil moisture content over the growing season in maize cultivation area in Pyeongchang, Gangwon province and in soybean cultivation area in Youngju, Gyeongbuk province. The actual evapotranspiration of upland crops was calculated in order to estimate the consumptive water use of upland crops at each growth stage.

목 차

1. 서론	1
1.1 연구 배경 및 필요성	1
1.2 연구 목적	2
2. 연구 방법	4
2.1 SWAP 모형을 이용한 토양수분 함량 추정 방법	4
2.1.1 SWAP 모형 개요	4
2.1.2 SWAP 모형 입력 자료	7
2.1.3 SWAP 모형 시뮬레이션	8
2.2 SWAP 모형의 수리학적 매개변수 추정모형 ROSETTA	10
2.2.1 ROSETTA 모형 개요	10
2.2.2 토양 수리학적 매개변수	12
2.3 발작물 소비수량 추정 방법	14
2.3.1 잠재증발산량 추정	14
2.3.2 작물 소비수량 추정	14
3. 연구 결과	16

3.1 SWAP 모형 검증	16
3.1.1 해남 KoFlux 관측지점	16
3.1.1.1 해남 KoFlux 관측지점 토양 자료 및 수리학적 매개변수	16
3.1.1.2 해남 KoFlux 관측지점 기상 자료	19
3.1.1.3 해남 KoFlux 관측지점 토양수분 자료	21
3.1.1.4 해남 KoFlux 관측지점 비교 검증	22
3.1.2 농촌진흥청 기상 관측지점	26
3.1.2.1 농촌진흥청 기상 관측지점 토양 및 토양통 자료	26
3.1.2.2 농촌진흥청 기상 관측지점 기상 자료	35
3.1.2.3 농촌진흥청 기상 관측지점 토양수분 자료	38
3.1.2.4 농촌진흥청 기상 관측지점 비교 검증	40
3.2 발작물 재배지역 적용	44
3.2.1 옥수수 재배지역	45
3.2.1.1 옥수수 재배지역 토양 자료 및 수리학적 매개변수	45
3.2.1.2 옥수수 재배지역 기상 자료	47
3.2.1.3 옥수수 생육 정보	48
3.2.1.4 옥수수 재배지역 토양수분 함량 추정	49
3.2.2 콩 재배지역	50
3.2.2.1 콩 재배지역 토양 자료 및 수리학적 매개변수	50
3.2.2.2 콩 재배지역 기상 자료	52
3.2.2.3 콩 생육 정보	53
3.2.2.4 콩 재배지역 토양수분 함량 추정	54
3.3 작물 소비수량 추정	55

3.3.1 잠재증발산량 추정-----	55
3.3.2 발작물 재배지역 작물 소비수량 추정-----	56
4. 결론-----	60
Ⅰ 감사의 글-----	64
Ⅰ REFERENCE-----	65
Ⅰ 부 록	
1. 토양 수리학적 매개변수-----	68
2. 기상 관측지점 시뮬레이션 검증-----	79

1. 서론

1.1 연구 배경 및 필요성

최근 기후변화의 영향으로 인한 이상기후 현상의 빈번한 발생은 세계 곳곳에서 사회경제적 피해를 야기하고 있으며, 특히 기후조건과 변화에 민감한 농업분야에서 홍수 및 농업가뭄과 같은 물 스트레스 상태의 지속은 작물 생육 및 생산량 감소에 직접적인 영향을 미친다. 과거 기상관측 자료에 따르면 우리나라에서는 2-3년을 주기로 국지적인 가뭄이, 5-7년을 주기로 극심한 가뭄이 발생해 왔으나 최근 10 동안은 거의 매년 가뭄이 발생하고 있는 상황이다(배덕효 등, 2013). 농업가뭄은 작물이 성장하는 과정에서 요구되는 필요수량을 적시에 공급받지 못할 경우 발생하며 발작물의 경우 토양수분의 부족으로 정의된다(최진용과 정하우, 1995). 작물은 재배되는 지역의 기상조건 및 토양조건에 따라 증발산량에 차이를 보이며 생육시기별로 작물체내에서 발생하는 생리작용들이 다르기 때문에 안정적인 생산을 위해 요구되는 생육시기별 물의 양은 재배 상황에 따라 다르게 나타난다(엄기철 등, 2010). 작물에 의해 소비되는 물은 증발산에 의한 소비와 식물 조직내부에서의 소비로 나눌 수 있지만 조직내부에서의 물 소비는 전체 물 소비량의 0.1%에 불과하기 때문에 작물의 물 소비량은 증발산량과 같다고 볼 수 있다(농촌진흥청 농업과학기술원, 2007). 농업용수의 적절한 관리를 위해서는 작물에 대한 생육시기별 물 소비량과 토양수분 변화에 대한 정확한 산정을 통해 물 스트레스를 최소화 할 수 있는 적시적량의 물 공급 시스템을 구축하는 합리적인 농업용수 관리 방안이 필요하다.

우리나라 쌀 소비량은 지난 30년 동안 지속적으로 감소해 오고 있는 실정이며 최근 공급량 과잉 현상이 지속적으로 발생하자 정부는 ‘논 소득기반 다양화 사업’을 통해 발작물 재배로의 전환을 유도하고 있다(서명철 등, 2012). 그러나 발작물은 논벼와 비교해 작물의 종류가 다양하고 토양 내 수분 조건에 민감하게 반응하기 때문에 적절한 토양수분 관리가 중요하지만 토양 내 물 소비구조가 복잡한 관계로 작물별, 토양별, 생육시기별 소비수량 추정에 관한 연구가 상대적으로 부족한 실정이다(남원호 등, 2014). 발작물에 대한 생육시기별 소비수량 연구로는 노지에서 재배되는 고추, 감자, 옥수수 등에 대해 생육시기별 물 요구량을 산정하는 연구가 수행되었다(엄기철 등, 2010; 엄기철 등, 2012; 엄기철 등, 2013). 남원호 등(2014)은 토양수분 물수

지 모형에 남한상세 기후변화 시나리오를 적용해 식량작물인 콩, 옥수수, 감자와 채소작물인 고추, 봄배추, 가을배추에 대해 기후변화에 따른 생육시기별 소비수량 및 관개용수량의 변화를 추정하였다. 서영재와 이광야(2002)는 FAO와 ICID등 세계 농업관련 기구에서 추천하고 있는 Penman-Monteith 방법과 작물계수를 이용하여 작물증발산량을 산정하였고 물수지 모형을 기반으로 밭 지역에서의 토양수분을 추적하는 방식으로 유효수량 및 관개수량을 산정하여 밭용수 수요량을 추정하였다. 하지만 밭작물 소비수량 추정에 관한 기존 연구들은 대부분 기후특성만을 고려한 토양수분 물수지 모형을 이용하고 있어 실제 밭작물에 대한 관개계획을 수립하는데 있어 한계가 있다. 서명철 등(2012)은 토양특성과 기상정보 그리고 재배이력만을 고려해 지표면으로부터 토양으로 투입되는 물의 양과 계의 밖으로 빠져나가는 물의 양을 산출하는 물 수지 모형을 개발해 일별 토양수분 함량을 추정했다. SWAP(Soil-Water-Atmosphere-Plant) 모형은 농경지 토양층에 대한 물 수지를 계산하는 결정론적이며 기후특성과 지표특성(토양, 작물 등)을 고려할 수 있는 물리 기반형인 농업수문학적 모형(Agro-hydrological model)으로 작물의 생육시기별 토양수분 함량을 모의할 수 있다(장태일, 2009). 밭작물 재배지역에 대한 토양수분 함량의 변동을 파악함으로써 작물이 물 스트레스 상황에 놓이지 않도록 작물별 효율적인 관개시점과 관개량에 대한 정보 제공이 가능하다. 작물별 적정 관개법 선정에 의한 관개효율 제고는 가용수자원의 효율적 배분으로 인한 수자원 절약 차원에서 매우 중요하다(엄기철 등, 2009). 작물별 적정 관개 수량은 토양 내 수분상태를 기준으로 결정되며 작물 생육단계별 소비수량에 영향을 받는다. 밭작물 재배지역에 대한 작물 소비수량을 추정하기 위해 작물 생육정보와 기상관측 자료를 이용한 작물 생육시기별 실제 증발산량 산정 방법의 제안이 요구된다.

1.2 연구 목적

논에 비해 상대적으로 관개시설의 구축이 부족한 밭작물 재배지역에 대한 효율적인 물 관리 방안 제시를 위해서는 작물 생육단계별 토양수분 함량 상태 파악 및 안정적인 작물 생산량 확보를 위해 요구되는 소비수량에 대한 파악이 필요하기 때문에 다양한 밭작물 재배지역에 대한 토양수분 함량 추정 기법 및 작물 소비수량 추정 기법

을 개발하고자 한다. 또한 장기간에 걸쳐 관측된 토양수분 함량 자료와 비교를 통해 토양수분 함량 추정 기법의 정확성 및 신뢰성을 검증하고자 한다. 본 연구에서는 토양수분 함량 추정에 대한 검증 결과를 바탕으로 실제 밭작물 재배지역에 대한 수리학적 매개변수 추정 및 기상 관측자료, 작물 생육정보 등의 적용을 통해 대상 밭작물 재배지역에 대한 토양수분 함량의 변화를 추정하고 생육시기별 소비수량 추정을 통해 효율적인 물 관리 정보를 제공할 수 있도록 아래와 같은 연구 목적을 갖는다.

- 1) 기후특성과 지표특성을 고려한 밭작물(옥수수, 콩) 재배지역에 대한 생육시기별 토양수분 함량 추정 기법 적용 방안 제시
- 2) 장기 토양수분 함량 관측 자료와의 비교를 통한 토양수분 함량 추정 기법의 정확성 및 신뢰성 평가
- 3) 작물 생육정보와 기상관측 자료의 조합을 통한 밭작물 재배지역의 생육시기별 증발산량 및 작물 소비수량 추정 기법 적용 방안 제시

2. 연구 방법

본 연구에서는 농촌진흥청의 토양환경정보시스템(흙토람, <http://soil.rda.go.kr>)에서 제공하고 있는 토양성분도 자료로부터 대상 발작물 재배지역에 대한 토양성분 정보(Sand, Silt, Clay의 비율)를 추출한 다음 Pedotransfer Functions(PTF)을 기반으로 하는 ROSETTA(Schaap et al., 1999) 모형에 이를 적용하여 대상 발작물 재배지역 토양에 대한 수리학적 매개변수(θ_{res} , θ_{sat} , K_{sat} , a , n)를 추정한다. 여기서 추정된 매개변수와 기상관측 자료(강수량, 일최고기온, 일최저기온, 일사량, 상대습도, 풍속)를 수문모형인 SWAP(Soil-Water-Atmosphere-Plant) 모형에 입력하여 작물 종류 및 생육 특성이 고려된 발작물 재배지역의 토양수분 함량 변화를 산정하고 토양수분 센서로부터 관측된 토양수분 함량 자료와 비교를 통해 모형의 정확성 및 신뢰성을 검증하고자 한다. SWAP(van Dam et al., 1997) 모형은 프로세스 기반의 수문학적 모형으로 기후특성과 지표특성(토양, 작물 등)을 동시에 고려함으로써 현장 모니터링이 어려운 발작물 재배지역에서의 생육시기별 토양 내 수분 거동에 대한 모의를 보다 용이하게 해준다. 관측지점을 대상으로 한 토양수분 함량 추정 모형의 검증에서 만족스러운 결과가 얻어지면 토양환경정보시스템의 다양한 토양통별 토양성분 자료를 바탕으로 발작물 재배지역의 토양통별 수리학적 매개변수 정보를 구축해 두고 기상관측 자료와 함께 SWAP 모형에 적용하여 대상 발작물 재배지역에 대한 토양수분 함량의 변화를 추정하고자 한다. 발작물이 생육하는 기간 동안 토양수분 부족으로 인한 물 스트레스를 받지 않게 하기 위해서는 관개시점과 관개량에 대한 판단이 필요하다. 여기서는 발작물의 생육시기별 토양수분 함량의 변화로부터 적정 관개시점을 추정하는 방법을 개발하고 발작물의 생육시기별 증발산량 계산을 통해 발작물의 물 소비량을 추정함으로써 적정 관개량 추정 방법을 개발하고자 한다.

2.1 SWAP 모형을 이용한 토양수분 함량 추정 방법

2.1.1 SWAP 모형 개요

불포화 토양층에 대한 토양수분의 변동을 추정하기 위해서는 토양층 내의 서로 다른 토양수분 흐름에 대한 이해가 필요하다. 불포화 토양층에서의 물 흐름은 그림 2.1과 같

이 대부분 수직으로 이루어지며 1차원 흐름 모형을 통해 시뮬레이션 될 수 있다(Romano et al., 1998). 불포화 토양층 내의 물수지는 식 (2.1)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta W_u}{\Delta t} = I_{cw} + I_{tw} + P_n - ET_a + q^\uparrow - q^\downarrow \quad (2.1)$$

여기서, ΔW_u 는 불포화 토양층에서의 시간 Δt 동안의 토양수분 변화량을 나타내며 I_{cw} 는 외부 농업용 개수로 혹은 관수로로부터의 관개수, I_{tw} 는 펌핑을 통한 지하수 관정으로로부터의 관개수, P_n 은 토양으로 흡수되는 강수량으로 차단강수량과 유출강수량을 제외한 순 흡수강수량, ET_a 는 지표면으로부터의 실제 증발산량, $q^\uparrow$ 는 포화 토양층에서 불포화 토양층으로의 모세관 상승량, $q^\downarrow$ 는 토양층에서 지하수로의 침투수량을 나타낸다. 포화 토양층으로부터의 모세관 상승은 지하수위와 식물 근권역 사이의 거리 그리고 토양 공극 밀도와 같은 다양한 요인에 영향을 받으며 지하수위가 깊은 곳에 위치할 경우 식물 근권역에 대한 모세관 상승의 영향은 작아진다.

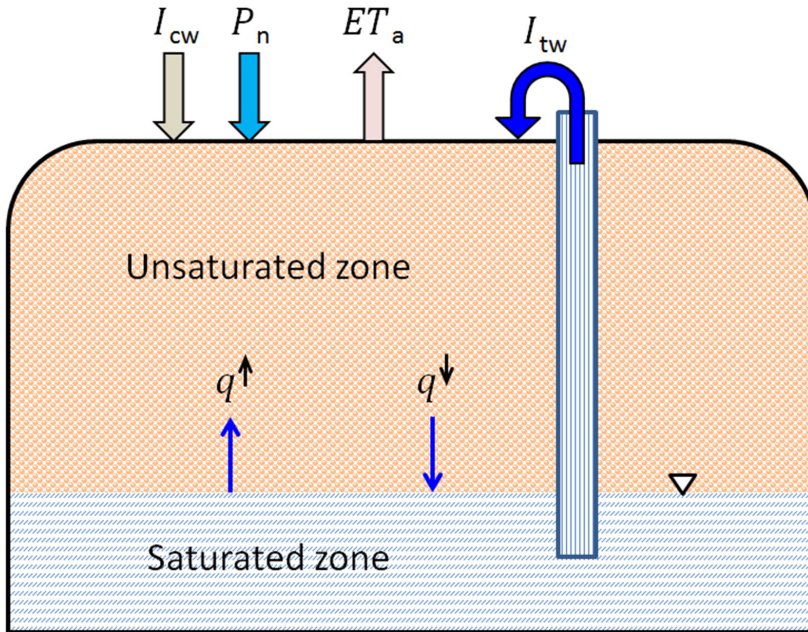


그림 2.1 지하 대수층에서의 서로 다른 토양수분 흐름도

SWAP(Soil-Water-Atmosphere-Plant) 모형은 물리 기반의 다양한 기능을 갖는 농업 수문학적 모형(Agro-hydrological model)으로 경작지에 대한 물 수지와 관개 관리에 적용 가능한 도구로 활용되고 있으며 반건조 지역의 다양한 기후와 농업 시스템에 대해 검증이 이루어졌다(van Dam et al., 1997; Sarwar et al., 2000; Droogers et al., 2001; Ma et al., 2011; Huo et al., 2012). 그림 2.2는 SWAP 모형의 개요를 도식화 한 것이다. 기상 관측지점 및 밭작물 재배지역에 대한 토양수분함량의 변화를 추정하기 위해 SWAP 모형이 이용되었고 토양, 물, 대기, 작물 사이의 물리적 상호작용을 일 단위로 예측한다. 포화 및 불포화 토양에 대한 토양수분의 흐름은 Richard 방정식에 의해 설명되며 일 반적인 토양수 흐름방정식은 식 (2.2)와 같다.

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S_r(z) \quad (2.2)$$

여기서, C 는 토양용수량의 차이 (cm^{-1}), h 는 토양수 압력수두 (cm), t 는 시간 (d), z 는 수직 흐름의 좌표 (cm, positive upward), K 는 불포화 수리전도도 (cm d^{-1}), S_r 은 식물 뿌리에 의한 토양수 추출율 ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$)이다. SWAP 모형은 특정한 경계조건과 토양 수리 특성인 θ , h , K 의 관계를 알고 있을 때 Richard 방정식을 수치적으로 계산한다(장태일 등, 2009). 토양 수리학적 함수는 van Genuchten-Mualem(VGM) 모형으로 정의된다(van Genuchten et al., 1991). 본 연구에서는 SWAP 모형에 포함되어 있는 Doorenbos와 Kassam(1979)의 단순 작물 생육 모듈이 이용된다. 작물 생육 특성은 발아에서 수확까지의 생육단계별($0 < \text{DVS} < 2$) 엽면적지수(LAI), 작물 높이(CH), 뿌리 깊이(RD)로 나타낸다.

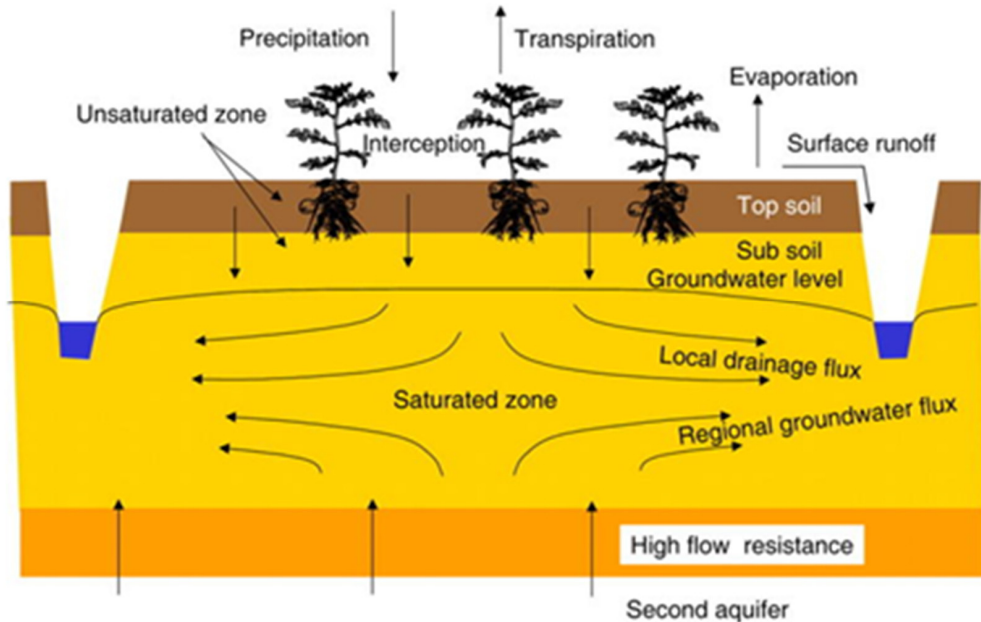


그림 2.2 SWAP 모형의 수문학적 프로세스 (van Dam et al., 2008)

2.1.2 SWAP 모형 입력 자료

SWAP 모형을 구동해 토양층별 수분함량을 계산하기 위해서는 표 2.1에 정리한 것과 같은 주요 3 가지 입력 자료에 대한 수집이 요구된다. 먼저 토양에 대한 토양성분 자료로 대상지점 토양의 Sand, Silt, Clay 비율(%)에 대한 정보가 필요하며 토양의 수리학적 매개변수로 토양이 완전히 배수된 상태에서도 남아있는 수분을 나타내는 잔류 수분함량(θ_r)와 토양이 완전히 포화된 상태의 포화수분함량(θ_s), 포화수리전도도(K_s), 수분함량과 수리전도도의 형상계수(α , n)에 대한 정보가 요구된다. 다음으로 기상관측 자료에는 기본적으로 일 단위의 일사량(RAD), 일최저기온(Tmin), 일최고기온(Tmax), 기압(HUM), 풍속(WIND), 강수량(RAIN)에 대한 정보가 요구되며 유출량의 모의를 위해 시간 단위의 강수량 자료가 입력되기도 한다. 마지막으로 대상지점을 피복하고 있는 작물에 대한 생육정보가 요구되는데 작물에 따른 생육기간, 생육단계(DVS), 엽면적지수(LAI), 작물의 높이(CH), 뿌리 깊이(RD) 등에 대한 실험 관측자료가 입력된다.

표 2.1 SWAP 모형 입력 자료

입력 자료	항목
토양조사	토양성분(Sand, Silt, Clay %) 토양 수리학적 매개변수(θ_r , θ_s , K_s , α , n)
기상관측	일사량(RAD), 일최저기온(Tmin), 일최고기온(Tmax), 기압(HUM), 풍속(WIND), 강수량(RAIN)
작물정보	작물생육단계(DVS), 엽면적지수(LAI), 작물높이(CH), 뿌리깊이(RD)

Source: Kroes et al., 2002

2.1.3 SWAP 모형 시뮬레이션

작물의 생육시기별 토양수분 함량의 변화를 추정하기 위해 토양의 물리적 특성을 고려하는 1-Dimensional 기반의 SWAP 모형이 이용된다. SWAP 모형에는 불포화 토양층의 수분 흐름에 직접적인 영향을 미치는 토양의 수리학적 매개변수와 작물의 생육시기별 증발산 특성이 적용된다. 대체적으로 천수농경지인 밭작물 재배지역에서 강수량 부족으로 인해 발생하는 작물의 생육시기별 물 스트레스 정도를 파악하는데 토양수분 함량의 변동을 추정한다. 작물의 뿌리에 의해 흡수되는 토양 내 수분의 양은 토양을 구성하는 토양성분에 의해 크게 좌우되며 비록 토양성분이 같아도 지표면에 심겨진 작물의 종류 또는 작물의 생육시기에 따라 차이를 보이게 된다. 본 연구에서는 작물 재배지역에 대한 토양의 수리학적 매개변수와 기상관측 자료, 작물 생육정보 등을 SWAP 모형에 적용함으로써 작물의 생육시기별 토양수분 함량을 추정한다. 그림 2.3은 SWAP 모형을 이용한 토양수분 함량 추정 시뮬레이션에 필요한 주요 입력 자료에 대한 개요를 나타낸다. AWS로부터 관측된 기상자료, ROSETTA 모형으로부터 추정된 토양 수리학적 매개변수, 작물 생육조사로부터 얻어진 작물정보는 SWAP 모형으로부터 토양수분 함량을 시뮬레이션 하는데 있어 반드시 필요한 입력 자료가 된다.

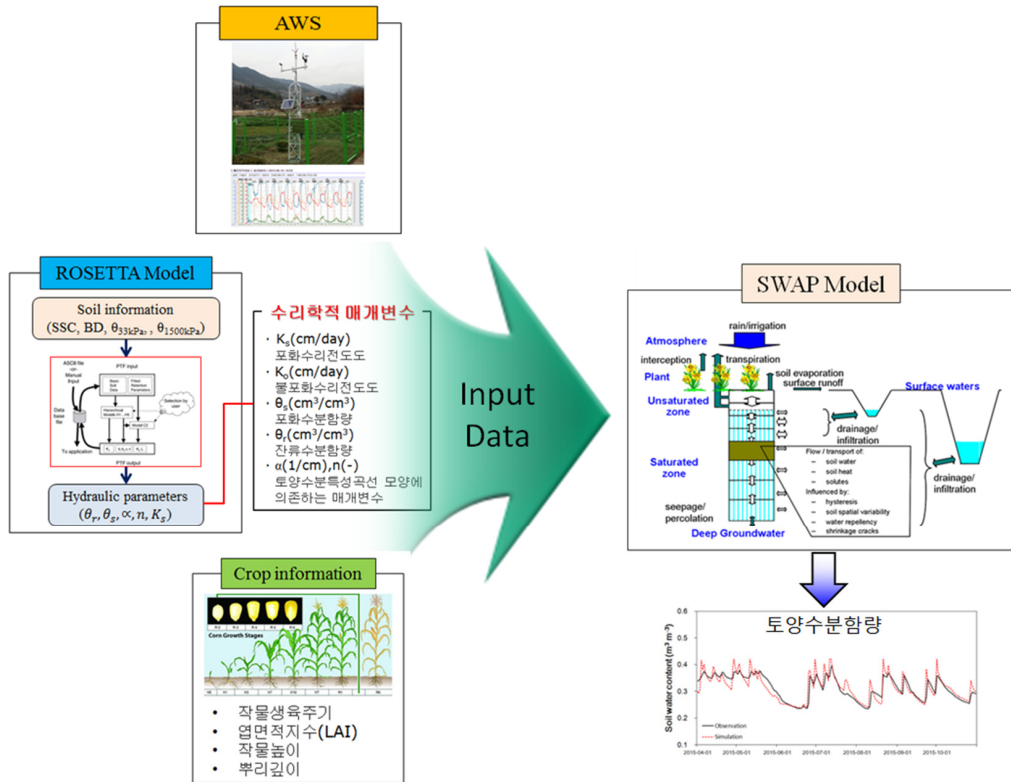


그림 2.3 SWAP 모형을 이용한 토양수분 함량 추정 시뮬레이션 개요

본 연구에서는 크게 3가지 유형으로 나누어 SWAP 모형을 이용해 토양수분 함량 추정 시뮬레이션을 실시했다. 1) 먼저 SWAP 모형의 신뢰성 검증을 위해 관측지점 주변이 농경지로 둘러싸여 있으며 장기간에 걸쳐 플럭스 관측이 이루어지고 있는 해남 KoFlux 관측지점을 선정해 이용 가능한 토양수분 관측 자료가 존재하는 2009년부터 2015년까지(2014년은 장기간 결측으로 인해 제외)에 대한 토양수분 함량 변동을 시뮬레이션 했다. 2) 다음으로 농촌진흥청 국립농업과학원에서 운영하고 있는 전국 177개 자동기상관측지점(AWS) 중 토양수분 함량에 대한 관측이 이루어지고 있으며 기본적인 토양성분 실험 자료와 기상관측 자료에 대한 결측이 없는 55개 관측 지점을 선정해 모형 검증을 목적으로 각 지점에 대한 토양수분 함량 변동을 시뮬레이션 했다. 3) 또한 우리나라 주요 밭작물인 옥수수와 콩에 대한 주요 재배지역(옥수수: 강원도 평창군, 콩: 경상북도 영주시)을 선정해 모형 적용을 목적으로 실제 작물이 재배되고 있는 지역에 대한 토양수분 함량 시뮬레이션을 실시했다.

SWAP 모형을 이용한 토양수분 함량 시뮬레이션은 1년 단위로 실시되었으며 작물 생육시기를 고려해 토양수분 함량 예측 결과에 대한 분석 기간은 4월부터 10월까지로 설정했다. 농촌진흥청 국립농업과학원에서 운용중인 토양수분 함량 관측 센서는 동절기 지표면 온도가 영하로 떨어짐으로 인해 센서 관측 결과에 큰 에러가 발생하는 것으로 조사되어 실제 토양수분 함량 관측은 4월부터 10월까지 실시하고 있다. SWAP 모형을 구동하기 위해서는 다양한 환경변수에 대한 설정이 필요하다. 예를 들어 시뮬레이션 기간이라든지 대상지역에 대한 위치정보(위도, 경도), 토양수분 함량의 변동에 직접적인 영향을 미치는 지하수위의 위치, 토양층 두께, 작물 뿌리의 한계 깊이, 이력(履歴, Hysteresis)현상의 고려, 작물별 출아일(Emergence), 관개여부 등 다양한 환경 설정이 이루어진다. 토양수분 함량 시뮬레이션의 결과는 일 단위로 출력되며 토양층별로 결과 값을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 관측 대상지점인 해남 KoFlux 관측지점과 농촌진흥청 국립농업과학원의 55개 토양수분 관측지점의 토양수분센서 매설 위치가 10cm 깊이로 되어 있어 10cm 깊이의 토양층에 해당하는 시뮬레이션 결과만을 정리해 분석했다.

2.2 SWAP 모형의 수리학적 매개변수 추정모형: ROSETTA

2.2.1 ROSETTA 모형 개요

ROSETTA 모형은 인공신경그물 열개(Artificial neural network)를 기반으로 한 일종의 통계분석 모형으로 Pedotransfer functions(PTFs) 기법이 적용된다. ROSETTA 모형은 토성(TXT) 자료나 Sand, Silt, Clay 비율(SSC,%), 용적밀도(Bulk density, BD), 33kPa 또는 1500kPa에서의 토양수분함량(TH33, TH1500) 자료를 입력 자료로 이용해 토양의 수리학적 매개변수(θ_r , θ_s , K_s , K_o , α , n , L)를 산출해주는 프로그램으로 미국 농무성의 농업연구소(USDA/ARS)에 의해 개발되었다. 대상 토양에 대한 실험을 통해 토양의 수리학적 매개변수를 얻는 것은 많은 시간과 비용이 들기 때문에 사전에 다양한 토양(2,085개 샘플)의 실험정보를 바탕으로 쉽게 매개변수를 생산할 수 있는 장점을 갖는 ROSETTA 모형은 다양한 수리전도도 추정 연구에 이용되어 왔다(허승오 등, 2006; Carlos et al., 2012). 그림 2.4는 ROSETTA 모형의 토양 수리학적 매개변수 추정에 대한 흐름도를 나타내고 있다. 모형은 크게

‘Hierarchical ANN Models’과 ‘Model C2’로 구분되어 수리학적 매개변수들이 추정되는데 먼저 계층적 인공신경망(Artificial neural networks, ANN) 모형인 ‘Hierarchical ANN Models’에서는 TXT, SSC, BD, TH33, TH1500과 같은 토양정보 중에서 이용 가능한 정보를 선택적으로 입력해 θ_r , θ_s , α , n , K_s 와 같은 수리학적 매개변수를 추정한다. 그림 2.5는 Sand, Silt, Clay 함량 정보만을 가지고 대상지역에 대한 토양 수리학적 매개변수를 추정한 ROSETTA 프로그램 실행 화면으로 입력 자료의 구축 정도에 따라 모형 예측 결과의 불확실성에 차이가 존재한다. 불포화 수리전도도 추정 모형인 ‘Model C2’에서는 ‘Hierarchical ANN Models’에서 추정된 수리학적 매개변수 θ_r , θ_s , α , n 을 입력 자료로 재이용함으로 불포화 수리전도도 K_0 와 van Genuchten-Mualem 모형의 매개변수 L 을 추정한다.

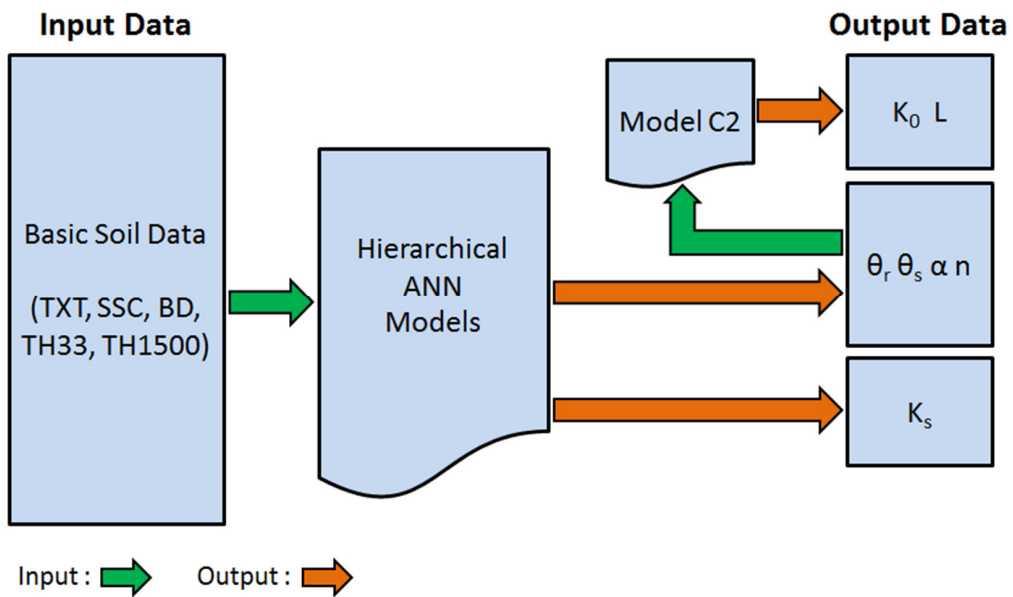


그림 2.4 ROSETTA 모형의 토양 수리학적 매개변수 추정 흐름도

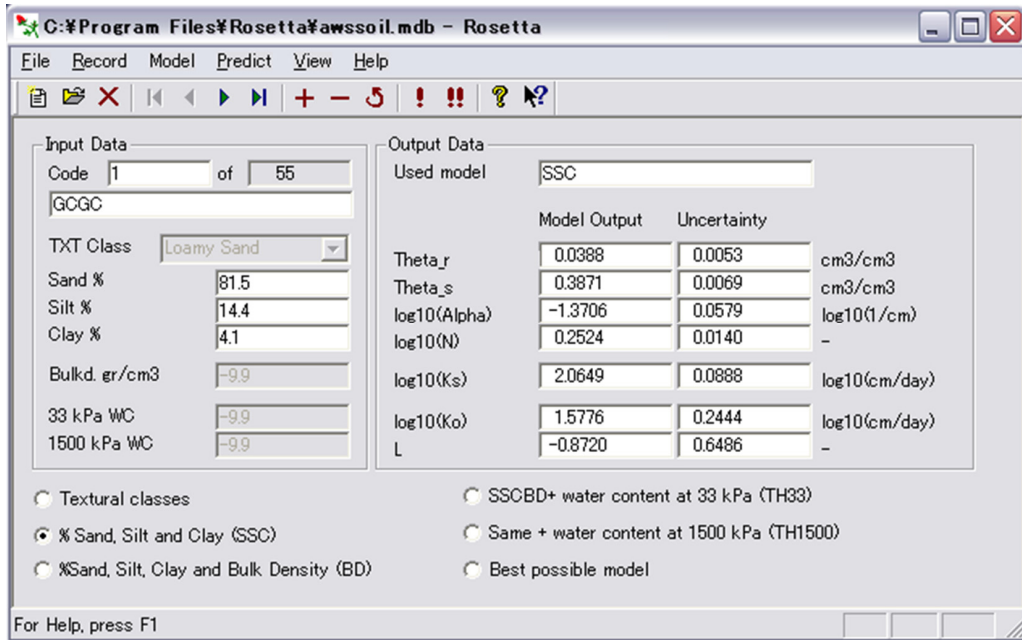


그림 2.5 ROSETTA 프로그램의 실행 화면

2.2.2 토양 수리학적 매개변수

ROSETTA 모형은 토양의 포화 수리전도도 K_s 를 추정해 줄 뿐만 아니라 토양의 수분보유량과 불포화 수리전도도를 추정하기 위한 다양한 수리학적 매개변수들을 예측할 수 있다. VGM(van Genuchten Mualem) 모형은 토양의 불포화 수리전도도 추정에 이용되고 있는 대표적 모형으로 식 (2.3)과 같이 현재 토양수분 함량을 추정하는 van Genuchten (1980) 모형과 Mualem (1976) 모형이 결합되어 식 (2.5)로 표현된다.

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^{1-1/n}} \quad (2.3)$$

여기서, $\theta(h)$ 는 토양수 압력수두 h 에 대한 토양수분 함량(cm^3/cm^3), θ_r 은 잔류수분 함량(cm^3/cm^3), θ_s 는 포화수분함량(cm^3/cm^3), α (1/cm)와 n 은 토양수분특성곡선의 형상 계수를 나타낸다. 식 (2.3)은 상대적 포화도 S_e 로 아래와 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{(\theta_s - \theta_r)} = [1 + (\alpha h)^n]^{1/n-1} \quad (2.4)$$

이 방정식은 Mualem(1976)의 이론과의 결합을 통해 van Genuchten-Mualem 모형으로 아래와 같이 나타낼 수 있다(van Genuchten, 1980).

$$K(S_e) = K_s S_e^L \left\{ 1 - [1 - S_e^{n/(n-1)}]^{1-1/n} \right\}^2 \quad (2.5)$$

여기서, $K(S_e)$ 는 불포화 수리전도도(cm/day), K_s 는 포화 수리전도도(cm/day), L 은 경험적 매개변수(-)를 나타내며 ROSETTA 모형에서는 대부분의 경우 음수(-)로 나타난다.

표 2.2 ROSETTA 모형 입력 자료

항목	설명	단위
TXT	Soil textural class (Clay, Clay Loam, Loam, Loamy Sand, Sand, Sandy Clay, Sandy Clay Loam, Sandy Loam, Silt, Silty Clay, Silty Clay Loam, Silty Loam)	-
SSC	Sand, Silt and Clay percentages	%
BD	Bulk density	g/cm ³
TH33	Water contents at 33 kPa	cm ³ /cm ³
TH1500	Water contents at 1500 kPa	cm ³ /cm ³

Source: <https://www.ars.usda.gov/pacific-west-area/riverside-ca/us-salinity-laboratory/docs/ROSETTA-model/>

표 2.3 ROSETTA 모형 출력 자료

항목	설명	단위
θ_r	Residual water content	cm ³ /cm ³
θ_s	Saturated water content	cm ³ /cm ³
α	Curve shape parameter	1/cm
n	Curve shape parameter	-
K_s	Saturated hydraulic conductivity	cm/day
K_o	Unsaturated hydraulic conductivity	cm/day
L	Tortuosity/connectivity parameter	-

Source: <https://www.ars.usda.gov/pacific-west-area/riverside-ca/us-salinity-laboratory/docs/ROSETTA-model/>

2.3 발작물 소비수량 추정 방법

2.3.1 잠재증발산량 추정

발작물의 생육시기별 증발산량 추정을 위해서는 먼저 잠재증발산량 추정의 표준방법인 아래 FAO-56 Penman-Monteith 식을 이용한 일단위 잠재증발산량의 산정이 실시된다 (Allen et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (2.6)$$

여기서, ET_0 는 기준잠재증발산량($mm \ day^{-1}$), R_n 은 작물표면에서의 순 태양복사량 (Net radiation, $MJ \ m^{-2} \ day^{-1}$), G 는 토양 열 유속 밀도(Soil heat flux density, $MJ \ m^{-2} \ day^{-1}$), T 는 표고 2m에서의 일평균기온($^{\circ}C$), e_s 는 포화수증기압(kPa), e_a 는 실제 수증기압(kPa), u_2 는 표고 2m에서의 풍속($m \ s^{-1}$), Δ 는 포화수증기압 곡선의 기울기($kPa \ ^{\circ}C^{-1}$), γ 는 건습계 계수($kPa \ ^{\circ}C^{-1}$)를 나타낸다. 잠재증발산량에 추정 방법에 대한 설명은 신용희(2014)에서 보다 자세하게 다루고 있으므로 참조하길 바란다.

2.3.2 작물 소비수량 추정

작물이 성장하는 과정에 필요한 물량은 생육시기별 기상조건과 생육단계별 작물체내에서 이루어지는 생리작용의 차이에 의해 다르게 나타나며 작물 재배지역에서 소비되는 물은 주로 증발산 작용을 통해 대기 중으로 이동한다(엄기철 등, 2013). 작물 재배 지역에서 실제 발생하는 증발산량은 토양내 수분 상태와 기온조건, 토양의 성질에 따라 변하는데 작물 생육시기별 실제 작물증발산량은 일반적으로 기준작물증발산량에 생육시기별 작물계수(Crop coefficient, K_c)를 고려해 추정한다. 작물계수는 작물의 생육시기별 기상조건 아래서 잠재증발산량 대비 작물의 최대 증발산량을 말하며 식(2.7)와 같이 나타낸다.

$$K_c = \frac{ET_m}{ET_o} \quad (2.7)$$

작물의 생육시기별 작물계수는 시험포장에서 Lysimeter 실험을 통해 산출할 수 있는데 우리나라 농촌진흥청 농업과학원에서는 다년간에 걸친 실험을 통해 주요 발작물에 대한 생육시기별 작물계수를 산출했다(엄기철 등 2007). 작물에 의한 소비수량(Water consumption, WC)은 실제 작물증발산량을 의미하며 잠재증발산량에 작물계수를 곱해 산정한다.

$$WC = ET_a = ET_o \times K_c \quad (2.8)$$

여기서, ET_a 는 실제 작물증발산량, ET_o 는 기준작물증발산량, K_c 는 생육시기별 작물계수를 나타낸다. 작물의 생육기간은 크게 5단계로 나누어지며 G-1(생육초기), G-2(신장기), G-3(생육중기), G-4(생육후기), G-5(생육말기)로 구분해 각 생육기간별 작물계수를 산출한다(엄기철 등, 2013). 본 연구에서는 주요 발작물인 옥수수과 콩의 생육기간별 작물계수를 이용해 일 단위 소비수량을 구하고 작물 생육기간에 해당되는 소비수량(Growth stage water consumption, GWC)을 아래와 같이 합산해 산정한다.

$$GWC = \sum_{i=1}^n WC_i \quad (2.9)$$

또한, 작물 생육기간별 평균 소비수량(Mean water consumption, MWC)과 전체 작물 생육기간 동안의 총 소비수량(Total water consumption, TWC)을 아래 두 식을 이용해 산정한다. 식(2.9)의 i 는 생육기간별 일수를 나타내고 g 는 작물의 생육단계를 나타낸다.

$$MWC = \frac{\sum_{i=1}^n WC_i}{n} \quad (2.10)$$

$$TWC = \sum_{g=1}^5 GWC_g \quad (2.11)$$

3. 연구 결과

3.1 SWAP 모형 검증

Pedotransfer Functions(PTF) 기반의 ROSETTA 모형으로부터 대상지역 샘플링 토양의 수리학적 매개변수가 추정되고 추정된 수리학적 매개변수와 기상 관측지점으로부터 관측된 기상 자료 그리고 작물 생육정보 등을 농업수문모형인 SWAP 모형에 입력해 대상지역의 토양수분 함량을 추정하는 기법을 제안했다. 제안된 토양수분 함량 추정 기법을 검증하기 위해 장기간 토양수분 함량을 관측해 온 해남 KoFlux 관측지점의 토양수분 관측 자료와 비교해 SWAP 모형의 토양수분 함량 추정에 대한 신뢰성을 검증했다. 또한 농촌진흥청 국립농업과학원에서 운영하고 있는 기상 관측지점의 토양수분 관측 자료와도 비교를 통해 SWAP 모형을 이용한 토양수분 함량 추정 기법을 검증했다.

3.1.1 해남 KoFlux 관측지점

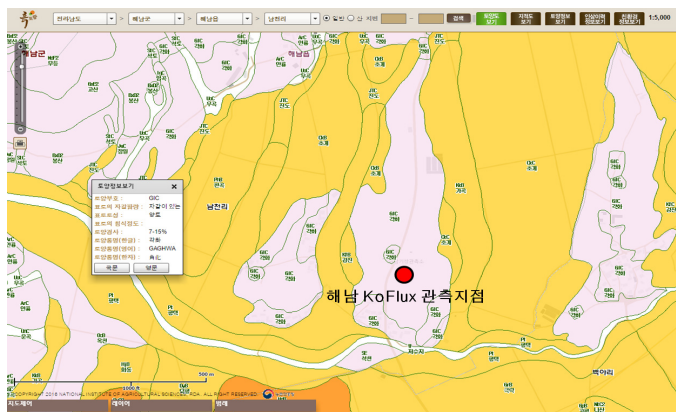
국가농림기상센터(NCAM)에서 운용 관리하고 있는 해남 KoFlux 관측 타워는 2002년 7월 전라남도 해남군 해남읍 남천리에 설치되었고 순복사, 기온, 풍향, 풍속, 잠열, 현열, CO₂/H₂O 농도, 토양온도, 토양습도, 토양열 등에 대한 관측이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 NCAM으로부터 2003년부터 2015년까지의 토양수분 함량 관측 자료를 비롯한 기상 관측자료를 제공 받아 토양수분 예측 모형에 대한 신뢰성 검증에 이용했다.

3.1.1.1 해남 KoFlux 관측지점 토양 자료 및 수리학적 매개변수

해남 KoFlux 관측지점은 주변이 대부분 밭으로 둘러싸여 있으며 관측타워 주변의 표토 층을 걷어내면 황토색의 토양층이 나타난다. 그림 3.1은 해남 KoFlux 관측지점의 위치와 전경을 나타내고 있으며 관측타워 주변 토양을 샘플링해 분석한 결과 표 3.1과 같이 Sand, Silt, Clay의 비율이 각각 38.5%, 31.5%, 30.0%로 나타났으며 USDA 삼각토양분류법에 따라 Clay loam 토양으로 밝혀졌다. 또한 해남 KoFlux 관

측지점 주변에 대한 토양통 정보를 ‘흙도람’의 토양환경지도로부터 추출한 결과 관측지점이 포함되는 곳의 토양은 ‘각화토’로 나타났으며 각화토의 일반적인 토성은 Clay loam으로 해남 KoFlux 관측지점의 토성과 같았다. 해남 KoFlux 관측지점의 각화토 토양 분포 지역을 둘러싸고 있는 토양통에는 표 3.2에 정리한 것과 같이 ‘강진토’와 ‘초계토’가 있는데 이 두 토양통은 각화토와는 달리 Silt 성분이 많이 포함된 것으로 나타났다. 특히 33kPa 압력에서의 잔류 수분함량이 0.44와 0.40으로 각화토의 0.25에 비해 높다.

a) 해남 KoFlux 관측지 토양 정보



b) 해남 KoFlux 관측지 전경



그림 3.1 해남 KoFlux 관측지점의 위치 및 전경과 해당지역 토양 정보

표 3.1 해남 KoFlux 관측지점 위치정보 및 토양 특성

ID	지점명	토양성분(%)			토성	위치	
		Sand	Silt	Clay		위도	경도
HFK	해남남천	38.5	31.5	30.0	Clay Loam	34.55	126.57

표 3.2 해남 KoFlux 관측지점 주변 토양통 토양 특성

토양통	토양성분(%)			토성	용적밀도 (g/cm ³)	수분함량 (m ³ /m ³)	
	Sand	Silt	Clay			33kPa	1500kPa
각화	35.6	36.9	27.5	Clay Loam	1.23	0.25	0.13
강진	9.3	65.0	25.7	Silty Loam	1.09	0.44	0.16
초계	12.5	56.3	31.2	Silty Clay Loam	1.21	0.40	0.15

해남 KoFlux 관측지점에 대한 샘플링 토양의 Sand, Silt, Clay 비율(SSC,%) 정보를 ROSETTA 모형에 입력해 관측지점 토양의 수리학적 매개변수(θ_r , θ_s , K_s , K_o , α , n , L)를 추정했다. 또한 해남 KoFlux 관측지점 주변 토양통인 ‘각화통’, ‘강진통’, ‘초계통’에 대한 Sand, Silt, Clay 비율(SSC)과 용적밀도(BD), 33kPa 또는 1500kPa에서의 토양수분함량(TH33, TH1500) 정보를 ROSETTA 모형에 입력해 토양 수리학적 매개변수를 추정한 결과를 표 3.3에 정리했다. 샘플링 토양에 대한 물리적 특성 정보는 Sand, Silt, Clay 비율(SSC) 값만 수집된 관계로 ROSETTA 모형에 최소한의 입력 자료인 SSC 값만을 입력하여 토양의 수리학적 매개변수를 추정했다. Clay 성분(30.0%) 이 많은 샘플링 토양에 대한 포화 수리전도도(K_s)는 5.63 cm/day, 불포화 수리전도도(K_o)는 4.1 cm/day로 낮게 나타났으며 잔류 수분함량(θ_r)은 0.077cm³/cm³, 포화 수분함량(θ_s)은 0.422cm³/cm³로 나타났다. 해남 KoFlux 관측타워가 위치한 지점을 둘러싸고 있는 토양통은 ‘각화통’으로 표 3.1과 표 3.2에서 나타났듯이 ‘각화통’은 샘플링 토양의 SSC와 근사한 비율을 보이고 있으나 포화 수리전도도(K_s)가 35.2 cm/day, 불포화 수리전도도(K_o)가 13.6 cm/day로 높게 나타났으며 포화 수분함량(θ_s)과 토양수분곡 특성곡선의 형상계수 인 α 와 n 값은 다른 ‘강진통’이나 ‘초계통’ 보다 근사한 값을 나타냈다.

표 3.3 해남 KoFlux 관측지점 샘플링 토양 및 주변 토양통 토양 수리학적 매개변수

ID	토양	토양 수리학적 매개변수						
		θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	K_s (cm/day)	K_o (cm/day)	L
HKF	샘플링	0.077	0.422	0.015	1.391	5.63	4.1	-0.791
	각화통	0.055	0.457	0.025	1.340	35.2	13.6	-0.983
	강진통	0.092	0.523	0.002	1.982	53.8	0.8	0.651
	초계통	0.079	0.489	0.002	1.805	25.3	0.9	0.777

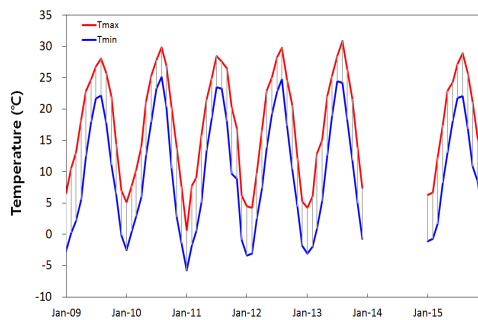
3.1.1.2 해남 KoFlux 관측지점 기상 자료

해남 KoFlux 관측지점에서는 토양수분 함량을 시뮬레이션하는데 필요한 다양한 기상관측 자료를 수집하고 있다. 본 연구에서는 NCAM으로부터 2009년부터 2015년까지의 기상관측 자료를 제공 받았지만 2014년 기상관측 자료는 결측이 많이 발생한 관계로 제공 받지 못했다. 표 3.4는 해남 KoFlux 관측타워에서 수집되고 있는 주요 관측항목과 관측장비에 대한 재원을 나타내고 있다. 주요 관측항목을 살펴보면 먼저 일사량을 나타내는 $RSDN(W/m^2)$, 풍속을 나타내는 $WS(m/s)$, 기온을 나타내는 $T_{AIR}(^{\circ}C)$, 상대습도를 나타내는 $RH(\%)$, 공기압을 나타내는 $Press(hPa)$, 강수량을 나타내는 $PPT(mm)$ 그리고 토양수분 함량을 나타내는 $SWC(m^3/m^3)$ 가 있다. 풍속의 경우 20m 높이에서 측정 되고 있어 지표면(2 m)의 풍속으로 보정을 실시했다. 또한 일사량의 경우 단위를 W에서 MJ로 변환했다. 그림 3.2는 해남 KoFlux 관측지점에 대한 2009년부터 2015년까지(2014년 제외)의 월평균 최대기온($^{\circ}C$), 월평균 최소기온($^{\circ}C$), 월 강수량(mm), 월평균 풍속(m/s), 월 일사량(MJ/m^2) 변동을 나타내고 있다. 관측기간에 대한 해남 KoFlux 관측지점의 연평균 기온은 $13.7^{\circ}C$ 로 나타났고 2013년 7월 $30.8^{\circ}C$ 를 넘는 고온현상이 발생했으며 2011년 1월 $-5.7^{\circ}C$ 로 관측기간 내 가장 낮은 기온을 기록했다. 2009년 7월 강수량이 543mm를 기록하고 있는데 이는 남부지방을 중심으로 발생했던 집중호우의 영향이었던 것으로 확인되었다. 강수량과 일사량의 경우 그래프 안에 연평균 변동 값을 나타내고 있는데 2013년과 2015년에는 상대적으로 강수량이 적었고 일사량의 경우 다른 해와 비교해 2010년에 상당히 적은 것으로 나타났으나 상대적으로 강수량이 적었던 2013년에 일사량이 상당히 많았던 것으로 나타났다.

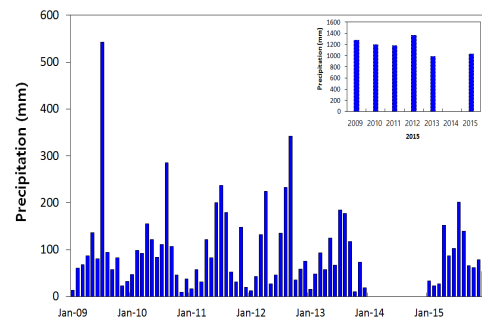
표 3.4 해남 KoFlux 주요 관측항목 및 자원

관측항목	ID	단위	높이/깊이 (m)	장비
Downward shortwave radiation	RSDN(1)	W/m ²	10	Net radiometer, CNR1, Kipp and zonen
Wind speed	WS(1)	m/s	20	CSAT3, Campbell
Air temperature	T_AIR(1)	deg C	20	HUMICAP sensor, HMP45C
Relative humidity	RH(1)	%	20	HUMICAP sensor, HMP45C
Barometric pressure	Press(1)	hPa	20	LI7500, LI-COR
Precipitation	PPT(1)	mm	0.5	Tipping bucket
Soil water content	SWC(1)	m ³ /m ³	0~0.1	TDR CS615/616, Campbell
Soil water content	SWC(2)	m ³ /m ³	0~0.1	TDR CS615/616, Campbell
Soil water content	SWC(3)	m ³ /m ³	0~0.1	TDR CS615/616, Campbell

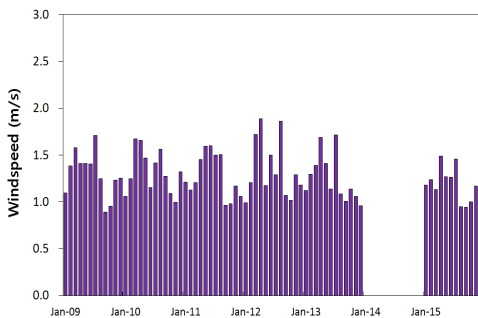
a) 기온



b) 강수량



c) 풍속



d) 일사량

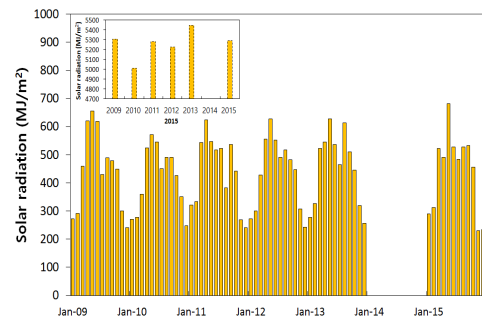


그림 3.2 해남 KoFlux 관측지점의 기상관측 자료 분석 결과

3.1.1.3 해남 KoFlux 관측지점 토양수분 자료

해남 KoFlux 관측지점에서는 2002년 7월부터 2006년 12월까지 2개의 토양수분 센서 TDR 1과 TDR 2로부터 30분 간격으로 토양수분 함량을 측정해오다 2008년 4월 업그레이드 버전의 토양수분 센서로 교체가 이루어졌고 2008년 9월 TDR 3 센서가 추가되어 현재 까지 총 3개의 토양수분 센서를 통해 토양수분 함량 변동을 측정하고 있다. 토양수분 센서는 지표면으로부터 10cm 깊이의 위치에 매설되어 있다. 본 연구에서는 그림 3.3과 같이 2009년부터 2015년까지(2014년 제외)의 관측자료를 이용했다.

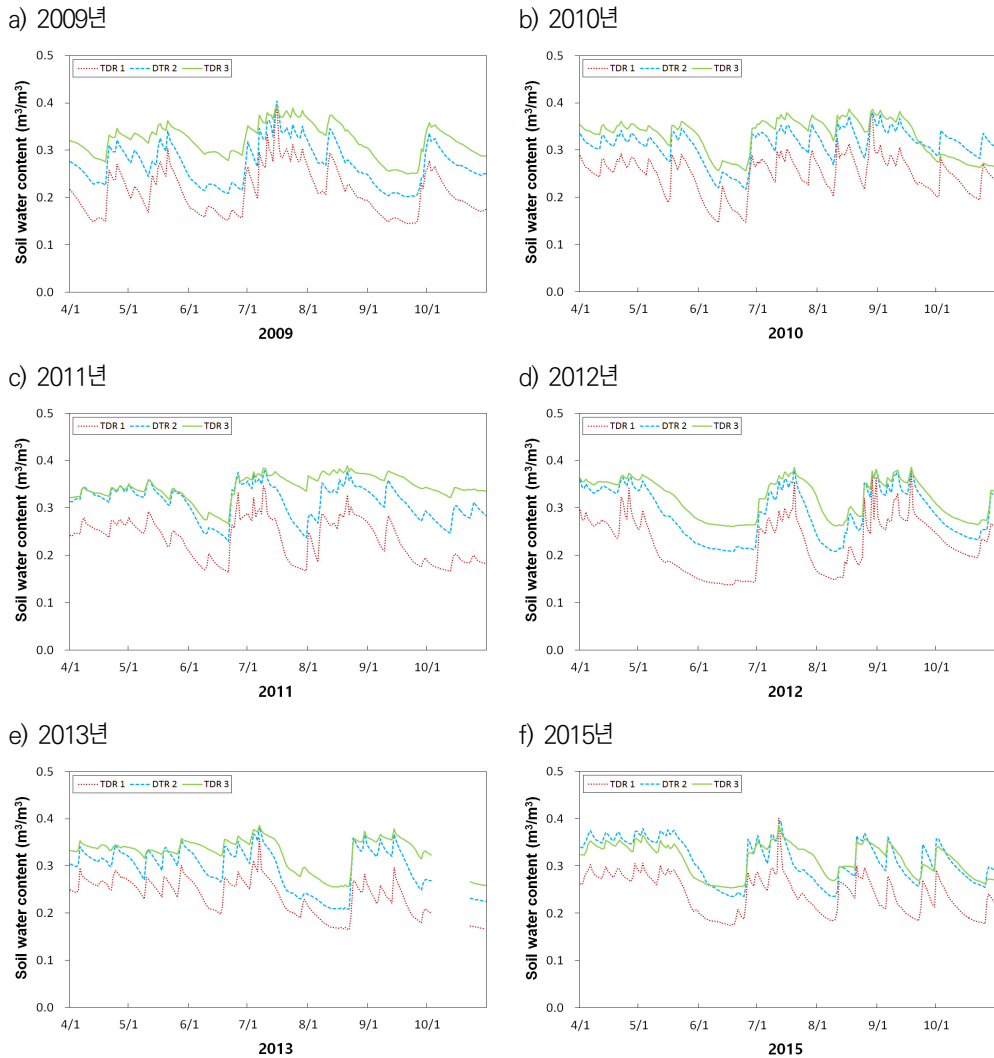


그림 3.3 해남 KoFlux 관측지점의 토양수분 함량 관측 자료 (TDR 1, TDR 2, TDR 3)

3.1.1.4 해남 KoFlux 관측지점 비교 검증

해남 KoFlux 관측지점에서는 지표면 10 cm 깊이에 토양수분 센서를 설치해 2002년 7월부터 현재까지 30분 간격으로 토양수분 함량의 변동을 관측해왔다. 하지만 관측 초기부터 2006년 12월까지 TDR 1과 TDR 2 센서로부터 관측된 자료에 에러가 포함되어 있어 2008년 4월에 두 센서를 교체했고 2008년 9월부터 TDR 3 센서가 추가되어 현재까지 총 3개 센서로부터 토양수분 함량이 관측되고 있다. SWAP 모형을 이용한 토양수분 함량 추정 결과에 대한 검증을 위해 2009년부터 2015년까지(2014년 장기간 결측으로 제외) 관측된 토양수분 함량 값과 SWAP 모형을 통해 추정된 토양수분 함량 값을 비교했다. 그림 3.4는 샘플링 토양의 수리학적 매개변수 정보를 이용한 SWAP 모형의 시뮬레이션 결과와 3개 관측센서의 값을 나타낸 그래프로 전체적으로 TDR 1의 관측 값(평균: 0.233)이 TDR 2(평균: 0.299)와 TDR 3(평균: 0.326)의 관측 값과 비교해 작게 나타나고 있는 것으로 확인 됐다.

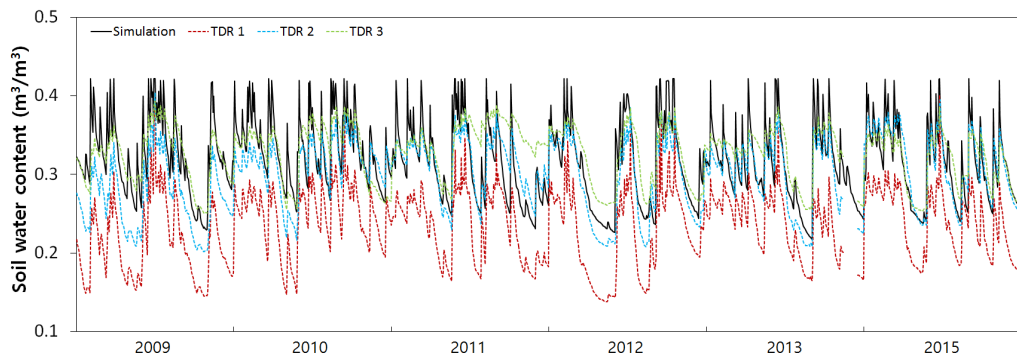


그림 3.4 해남 KoFlux 관측지점 토양수분 관측 자료와 SWAP 시뮬레이션 결과

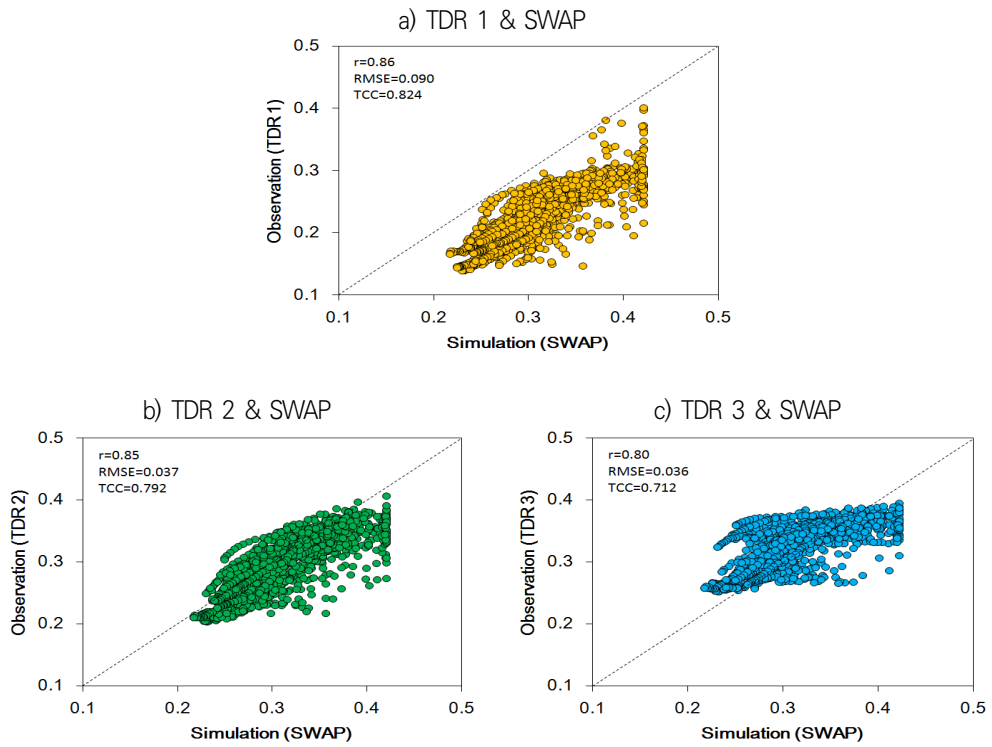


그림 3.5 해남 KoFlux 관측지점 센서 관측 값과 시뮬레이션 값의 상관성

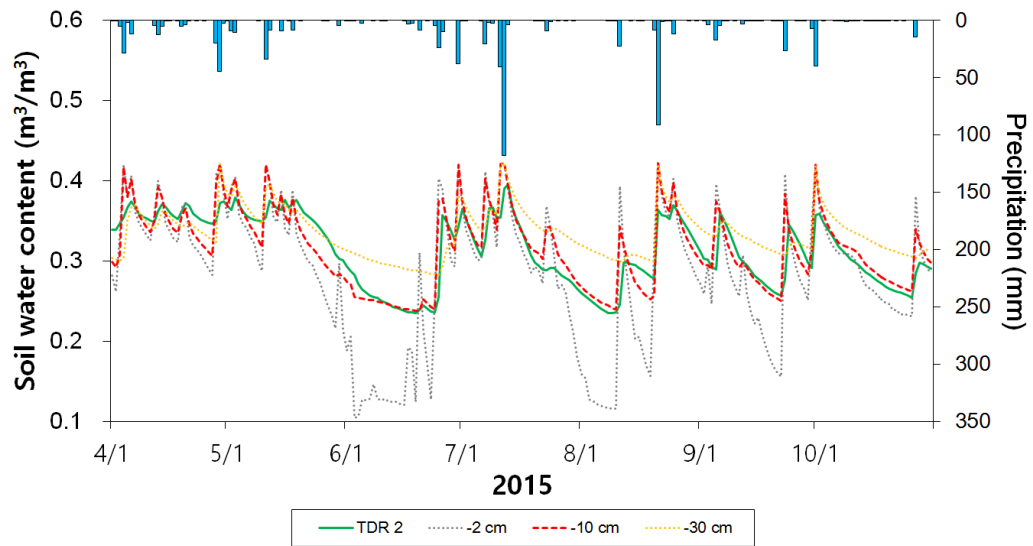


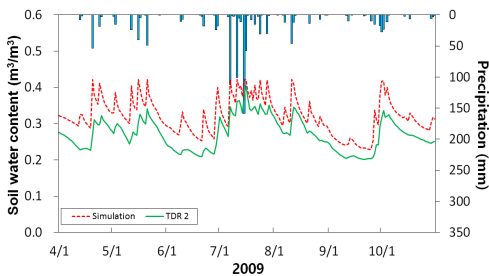
그림 3.6 해남 KoFlux 관측지점 토양수분 관측 자료와 토양층별 시뮬레이션 결과

해남 KoFlux 관측지점에 대한 TDR 1, TDR 2, TDR 3 센서의 관측 값과 SWAP 모형으로부터 추정된 토양수분 함량 값의 상관성을 분석하기 위해 그림 3.4의 각각의 토양수분 함량 자료로부터 TDR 1과 SWAP의 상관성, TDR 2와 SWAP의 상관성, TDR 3과 SWAP의 관계에 대해 상관계수(r)와 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE), 시계열상관계수(Temporal Correlation Coefficient, TCC)를 이용해 그림 3.5와 같이 나타냈다. TDR 1과 SWAP 간의 경우 $r=0.86$, $RMSE=0.090$, $TCC=0.824$ 로 나타났으며 TDR 2와 SWAP 간의 경우 $r=0.85$, $RMSE=0.037$, $TCC=0.792$ 그리고 TDR 3과 SWAP 간의 경우 $r=0.80$, $RMSE=0.036$, $TCC=0.712$ 로 나타났다. 본 연구에서는 상관계수(r)와 RMSE, TCC의 결과를 종합적으로 고려해 TDR 2 센서의 관측 값과 SWAP 모형의 시뮬레이션 값이 가장 근사하다고 판단했다. TDR 2 센서의 관측 값이 TDR 3 센서의 관측 값보다 정확한지에 대해서는 현장의 토양을 샘플링해 직접 실험을 통해 토양수분을 측정해 확인해야하지만 별도로 현장 샘플링 실험을 실시하지는 않았다. SWAP 모형을 이용한 토양수분 시뮬레이션 결과는 토양층 깊이별로 추정할 수 있다. 그림 3.6은 2015년 4월부터 10월까지의 지표면으로부터 10 cm 깊이에 설치된 TDR 2 센서의 관측 값과 SWAP 모형에 의해 추정된 토양층 깊이별(-2 cm, -10 cm, -30 cm) 토양수분 함량을 나타내고 있다. 지표면으로부터 2 cm 깊이에 대한 토양수분 함량 추정 값은 강수량의 유무에 크게 좌우되는 경향을 보이고 있는데 강수량이 적은 기간에는 지표면 증발산의 영향으로 토양수분 함량이 크게 감소하는 것으로 나타났으며 강우시에는 토양수분 함량이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 지표면으로부터 30 cm 깊이에 대한 토양수분 함량 추정 값은 강수량이 적은 기간에 토양수분 함량의 감소 속도가 상대적으로 느리게 나타났다. 이는 지표면으로부터 깊은 토양층일수록 지표면 증발산의 영향이 덜하다는 것을 의미한다고 볼 수 있다. 또한 지표면으로부터 10 cm 깊이에 대한 토양수분 함량 추정 값은 같은 깊이의 토양층에 설치되어 관측되고 있는 TDR 2 센서의 관측 값과 매우 유사한 변동 특성을 나타내고 있어 토양층 깊이에 따른 모형의 재현성이 좋은 것으로 나타났다.

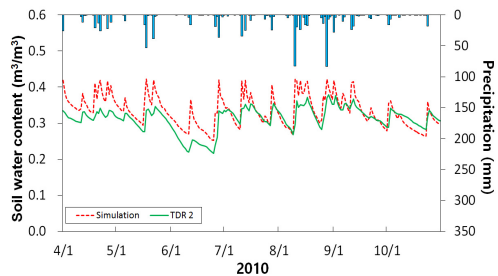
해남 KoFlux 관측지점에 적용된 SWAP 모형의 토양수분 함량 추정 기법을 검증하기 위해 그림 3.7과 같이 연도별로 토양수분 관측 자료와 토양수분 시뮬레이션 결과를 비교했다. 2009년의 경우 토양수분 변동 패턴은 $TCC=0.878$ 로 상당히 유사하게 나타났으나 전체적으로 시뮬레이션 값이 평균 0.051 높게 추정되었다. 2010년에도 4

월부터 6월까지 대체적으로 시뮬레이션 값이 높게 추정되었지만 7월부터는 유사하게 나타났다. 2011년, 2012년, 2013년, 2015년에 대한 토양수분 함량 시뮬레이션 결과는 전체적으로 관측 값과 상당히 잘 일치하는 것으로 나타났으며 특히 장기간에 걸쳐 강수량이 적었던 2012년도와 2015년도의 토양수분 함량 감소 패턴을 잘 재현한 것으로 나타났다. 표 3.5는 SWAP 모형을 이용한 토양수분 함량 추정 기법의 신뢰성을 RMSE와 TCC를 이용해 연도별로 분석한 결과로 본 연구에서 제안한 SWAP 모형을 이용한 토양수분 함량 추정 기법의 신뢰성이 높다고 판단되었다.

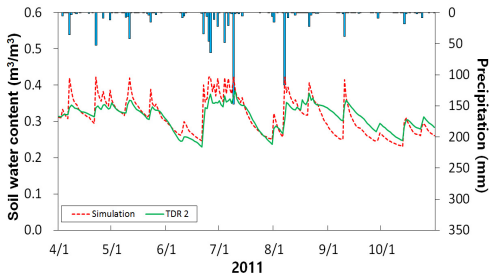
a) 2009년



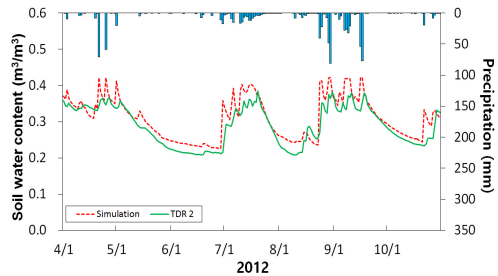
b) 2010년



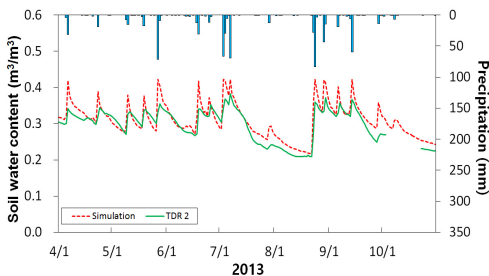
c) 2011년



d) 2012년



e) 2013년



f) 2015년

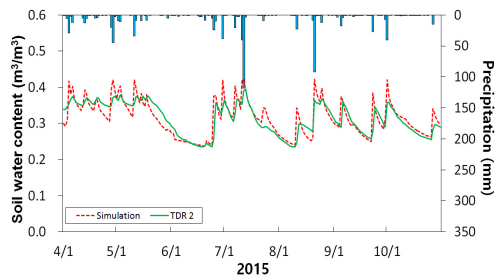


그림 3.7 해남 KoFlux 관측지점의 연도별 토양수분 관측 자료와 SWAP 모형 시뮬레이션 결과 비교 (2009년부터 2015년까지, 2014년 결측으로 제외)

표 3.5 해남 KoFlux 관측지점의 토양수분 함량 추정 기법 신뢰성 분석 결과

항목	관측년도					
	2009	2010	2011	2012	2013	2015
RMSE	0.056	0.037	0.029	0.034	0.028	0.026
TCC	0.878	0.717	0.821	0.888	0.882	0.849

3.1.2 농촌진흥청 기상 관측지점

농촌진흥청은 농업분야에서 기상재해로 인한 작물 생산량 감소 피해를 최소화하고 다양한 기상정보를 영농활동에 직접 활용할 수 있도록 홈페이지를 통해 기상정보서비스를 실시하고 있다. 농업기상정보서비스에서는 2016년 9월 1일 기준으로 전국 175 곳의 기상 관측 지점으로부터 취득한 실시간 정보를 제공하고 있다. 기상 관측 자료는 전국 농업기술센터에 설치되어 있는 자동기상관측장비로부터 수집되어 실시간으로 농업기상정보서비스에 제공되거나 기상청의 자동기상관측장비로부터 수집된 실시간 관측 자료가 모여져 방제기상 정보로 제공된다. 자동기상관측장비로부터 관측되는 기상요소에는 기본적으로 기온(°C), 습도(%), 풍향, 풍속(m/s), 강수량(mm), 일조시간(HH:MM)이 있으며 최근 가뭄 발생으로 인한 피해가 증가하고 있어 이에 대한 대응책 마련의 일환으로 토양수분(%)에 대한 관측을 실시하기 시작했다. 본 연구에서는 2015년 4월 1일부터 2015년 10월 31일까지 토양수분 관측이 이루어진 96개 기상 관측지점 중에서 토양수분과 기상 관측 자료에 결측이 없는 55개 관측지점을 선정했다.

3.1.2.1 농촌진흥청 기상 관측지점 토양 및 토양통 자료

농촌진흥청 국립농업과학원에서는 토양 샘플링 실험을 통해 전국 기상 관측지점에 대한 기본적인 토양 물리적 특성 정보를 수집했다. 본 연구에서는 분석 조건에 맞게 선정된 55개 기상 관측지점에 대한 토양 물리적 특성 정보를 분석했다. 표 3.6은 토양수분 관측이 이루어진 55개 기상 관측지점에 대한 관측지점명과 모형 시물레이션을 위해 설정한 ID 명 그리고 각 관측지점 토양에 대한 Sand, Silt, Clay의 비율(%)과 함께 토성 정보를 나타내고 있다. 또한 표에 정리된 각 관측지점의 위치정보(위도, 경도)를 QGIS에 적용해 그림 3.8과 같이 55개 기상 관측지점에 대한 토성 정보 분포

도를 작성했다. 각 관측지점에 대한 토성 정보는 USDA 토양삼각분류법에 따라 분류했으며 삼각분류도 작성 프로그램을 이용해 그림 3.9와 같이 삼각분류도를 작성했다. 선정된 55개 기상 관측지점의 토양은 크게 6개 토성으로 분류되며 Sandy loam(사양토) 토양이 22 곳으로 가장 많았고 Loam(양토) 토양과 Loamy sand(양질사토) 토양이 각각 13곳, Sand(사토) 토양이 4곳, Silt loam(미사질양토) 토양이 2곳, Silty clay loam(미사질식양토) 토양이 1곳 순으로 나타났다.

표 3.6 농진청 기상 관측지점 위치정보 및 토양 특성

ID	지점명	토양성분(%)			토성	위치	
		Sand	Silt	Clay		위도	경도
ASSR	안산상록	66.2	23.9	9.9	Sandy Loam	37.30	126.85
ASYC	아산염치	49.6	35.6	14.8	Loam	36.82	126.98
BHSP	봉화석포	68.8	25.3	6.0	Sandy Loam	37.06	128.77
BSGS	부산강서	74.6	18.4	7.0	Sandy Loam	35.21	128.96
BYGA	부여규암	72.0	21.4	6.6	Sandy Loam	36.26	126.84
CGYM	철곡약목	74.2	19.4	6.3	Sandy Loam	36.04	128.38
CJNI	청주남일	82.3	12.6	5.1	Loamy Sand	36.59	127.51
ESSI	음성소이	73.7	20.9	5.4	Sandy Loam	36.91	127.76
GCGC	거창거창	81.5	14.4	4.1	Loamy Sand	35.68	127.92
GMSS	구미선산	84.0	10.5	5.5	Loamy Sand	36.23	128.29
GRDM	계룡두마	82.2	12.5	5.3	Loamy Sand	36.20	127.28
GRGR	구례구례	45.8	39.4	14.8	Loam	35.20	127.46
GSGS	금산금성	77.7	17.6	4.7	Loamy Sand	36.13	127.49
GSJI	경산자인	18.9	46.6	34.5	Silty Clay Loam	35.82	128.81
GYGS	고양구산	66.6	27.2	6.2	Sandy Loam	37.65	126.87
HDJR	하동적량	49.9	36.7	13.4	Loam	35.13	128.28
HPHG	함평학교	50.1	37.7	12.2	Loam	35.05	126.54
HSGG	황성공근	70.1	24.1	5.7	Sandy Loam	37.53	127.96
IJIJ	인제인제	69.9	25.5	4.6	Sandy Loam	38.06	128.17
JAJA	장수장수	62.8	23.4	13.8	Sandy Loam	35.62	127.51
JCBY	제천봉양	91.1	7.8	1.0	Sand	37.16	128.18
JDGN	진도군내	40.2	43.0	16.7	Loam	34.51	126.30
JEJE	정선정선	87.9	10.4	1.7	Sand	37.42	128.65
JHJH	장흥장흥	75.5	19.0	5.5	Loamy Sand	34.67	126.91
JIIJ	진안진안	85.6	10.5	3.9	Loamy Sand	35.76	127.44

ID	지점명	토양성분(%)			토성	위치	
		Sand	Silt	Clay		위도	경도
JJCJ	진주초전	27.0	57.8	15.2	Silt Loam	35.20	128.12
JSJS	장성장성	61.1	28.4	10.5	Sandy Loam	35.32	126.80
JWJW	정읍정우	69.7	24.0	6.3	Sandy Loam	35.62	126.90
MAHG	무안환경	46.2	37.0	16.7	Loam	35.04	126.45
MGHD	문경흥덕	72.6	22.0	5.4	Sandy Loam	36.61	128.21
MJMJ	무주무주	83.1	7.7	9.2	Loamy Sand	36.01	127.68
MYSN	밀양상남	66.3	24.4	9.3	Sandy Loam	35.44	128.75

표 3.6 (계속) 농진청 기상 관측지점 위치정보 및 토양 특성

ID	지점명	토양성분(%)			토성	위치	
		Sand	Silt	Clay		위도	경도
OCOC	옥천옥천	85.0	11.5	3.5	Loamy Sand	36.30	127.60
PCJB	평창진부	68.0	30.1	1.8	Sandy Loam	37.67	128.59
PCWG	평창운교	38.6	49.3	12.1	Loam	37.54	128.45
PHBG	포항북구	59.9	23.7	16.5	Sandy Loam	36.11	129.31
SCYH	사천용현	42.0	39.4	18.5	Loam	35.04	128.07
SJCS	상주초산	62.9	23.7	13.4	Sandy Loam	36.45	128.17
SJDG	성주대가	90.3	6.8	2.9	Sand	35.91	128.25
SWSD	수원서둔	76.0	17.9	6.1	Sandy Loam	37.28	126.98
TATA	태안태안	61.6	32.2	6.1	Sandy Loam	36.73	126.31
TBGN	태백귀네	25.4	50.9	23.7	Silt Loam	37.18	128.98
TYGD	통영광도	48.9	39.0	12.1	Loam	34.90	128.40
WJMH	울진매화	79.3	15.5	5.2	Loamy Sand	36.92	129.38
WSBD	화성봉담	52.6	41.6	5.7	Sandy Loam	37.22	126.95
WSHC	화순한천	41.4	46.1	12.5	Loam	34.97	127.07
YADJ	영암덕진	56.4	30.1	13.5	Sandy Loam	34.83	126.67
YCOM	영천오미	50.4	36.3	13.4	Loam	35.99	128.93
YCYC	예천예천	91.5	6.8	1.7	Sand	36.68	128.46
YDBG	영덕병곡	63.7	25.7	10.6	Sandy Loam	36.57	129.40
YDSC	영동삼천	78.9	16.4	4.6	Loamy Sand	36.21	127.72
YJAJ	영주안정	78.9	16.7	4.5	Loamy Sand	36.85	128.56
YSJS	여수주삼	46.9	37.1	16.0	Loam	34.79	127.65
YSSA	예산신암	39.7	39.7	20.6	Loam	36.74	126.81
YWWW	영월영월	80.3	15.5	4.2	Loamy Sand	37.17	128.48

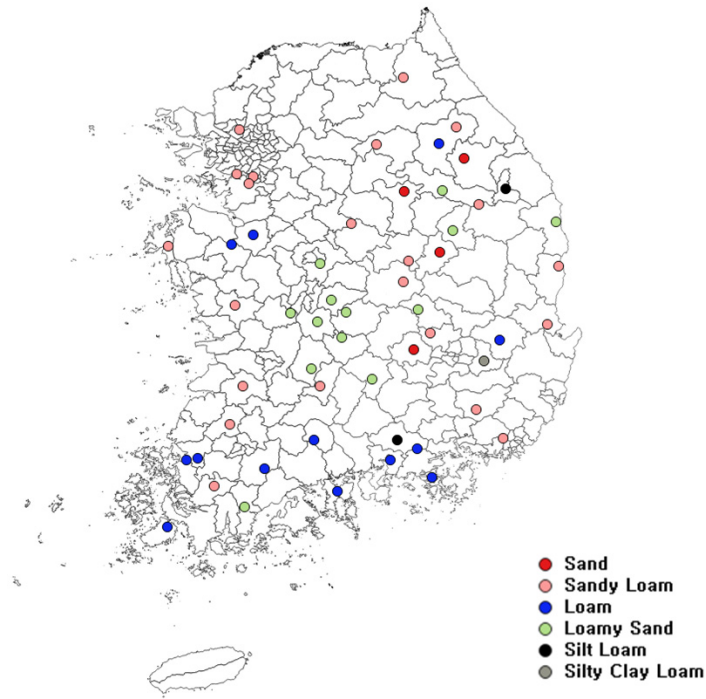
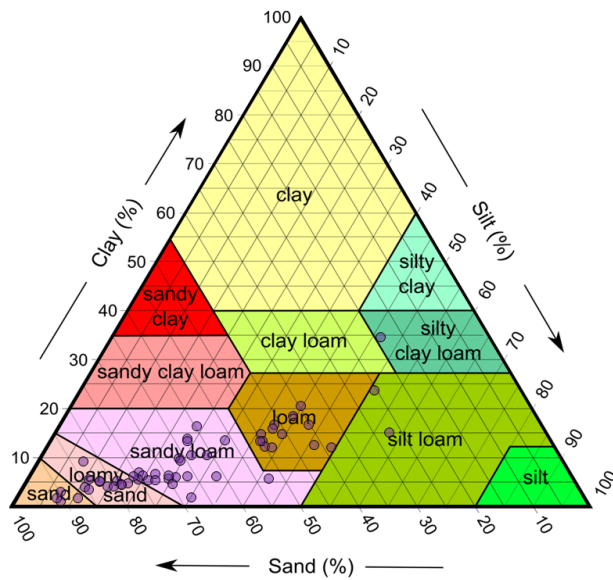


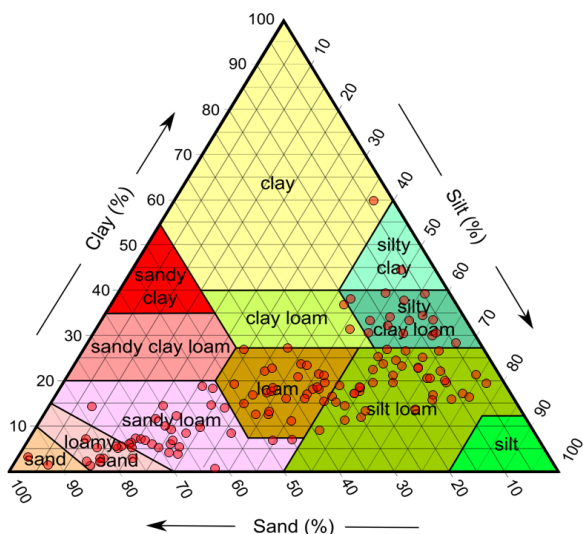
그림 3.8 농진청 기상 관측지점 및 토성 분포도 (55개 지점)



토성	개수
Sand	4
Sandy Loam	22
Loam	13
Loamy Sand	13
Silt Loam	2
Silty Clay Loam	1
Total	55

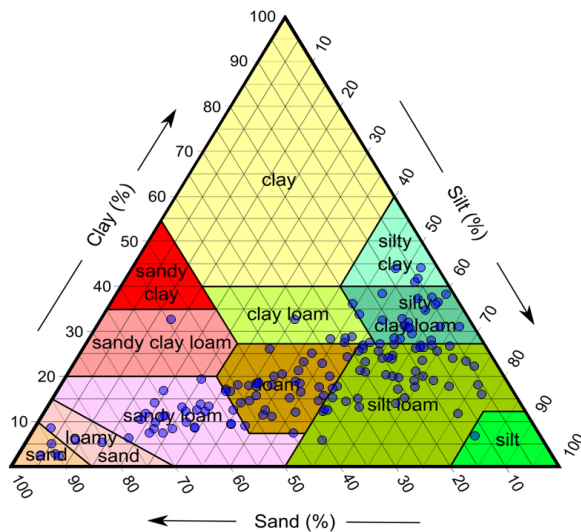
그림 3.9 농진청 기상 관측지점 토성 분류 (55개 지점)

우리나라는 미국의 토양분류법(Soil taxonomy)을 따라 토양을 분류할 때 토양생성발달 정도와 종류에 따른 10목(Order), 기후와 수분상태에 따른 아목(Suborder)으로 크게 분류되며 대군(Great group), 아군(Subgroup), 패밀리(Texture family), 토양통(Soil series)로 세분된다(<http://www.doopedia.co.kr/mv.do?id=101013000706314>). 토양통은 동일한 토양모재로부터 발달된 유사한 토양을 묶은 토양분류체계의 최하위 분류 단위를 말하며 본 연구에서는 농촌진흥청 국립농업과학원으로부터 총 405개의 토양통 자료를 제공받아 분석에 이용했다. 전체 토양통 자료 중에서 주로 밭 지역으로 이용되는 토양통과 논 지역으로 이용되는 토양통을 분류해 그림 3.10과 그림 3.11 같이 토양삼각분류법으로 분석을 실시했다. 먼저 전체 405개 토양통 자료 중에서 밭 지역으로 분류되는 토양통은 128개 였고 이들에 대한 토성을 USDA 토양삼각분류법을 통해 분석해 본 결과 총 12 종류의 토성 중에서 9개 토성으로 분류되었다. 밭 지역 128개 토양통 중에서 Silt loam 토양이 39개로 가장 많았고 Sandy loam 토양이 28개, Loam 토양이 27개, Silty caly loam 토양이 17개, Loamy sand 토양이 10개, Clay loam 토양이 3개, Sand 토양이 2개, Clay와 Silty clay 토양이 각각 1개 순으로 나타났다. 다음으로 논 지역으로 분류되는 토양통은 149개 였고 Silt loam 토양이 50개로 가장 많았고 Loam 토양이 31개, Sandy loam 토양이 29개, Silty clay loam 토양이 19개, Clay loam 토양이 7개, Sand와 Silty clay 토양이 각각 4개, Loamy sand 토양이 3개, Sandy clay loam과 Silt 토양이 각각 1개 순으로 나타났다.



토성	개수
Sand	2
Sandy Loam	28
Loam	27
Loamy Sand	10
Silt Loam	39
Silty Clay	1
Silty Clay Loam	17
Clay	1
Clay Loam	3
Total	128

그림 3.10 정밀토양도 밭 지역 토양통 토성 분류 (128개 토양통)



토성	개수
Sand	4
Sandy Loam	29
Sandy Clay Loam	1
Loam	31
Loamy Sand	3
Silt	1
Silt Loam	50
Silty Clay	4
Silty Clay Loam	19
Clay Loam	7
Total	149

그림 3.11 정밀토양도 논 지역 토양통 토성 분류 (149개 토양통)

농진청 기상 관측지점에 대한 토양통 정보는 농촌진흥청 국립농업과학원에서 운영하고 있는 토양환경정보시스템(SIS) 일명 '흙도람'(<http://soil.rda.go.kr/soil/index.jsp>)의 토양환경지도로부터 추출했다. 표 3.7은 선정된 6개 기상 관측지점이 위치한 곳의 토양통 정보로 표층에 대한 Sand, Silt, Clay 비율(%)과 토성, 용적밀도(g/cm^3) 그리고 33kPa, 1500kPa 압력에서의 잔류 수분함량(m^3/m^3)을 나타낸다. 각 농진청 기상 관측지점의 토양성분 실험 결과(표 3.6)와 토양환경지도로부터 추출된 토양통의 토양 특성을 비교해본 결과 관측지점 토양과 토양통의 토양 특성이 완전히 일치하지는 않았지만 어느 정도 비슷한 토양 특성을 나타내는 것으로 판단된다.

표 3.7 농진청 기상 관측지점의 토양통 정보(지역적 분포를 고려한 6개 지점)

토양통	AWS	토양성분(%)			토성	용적밀도(g/cm^3)	수분함량 (m^3/m^3)	
		Sand	Silt	Clay			33kPa	1500kPa
낙동	BSGS	76.7	17.6	5.7	Loamy Sand	1.64	0.103	0.036
사촌	GSGS	32.5	42.3	25.2	Loam	1.18	0.404	0.138
중동	IJIJ	68.7	27.0	4.3	Sandy Loam	1.63	0.164	0.068
각화	MAHG	35.6	36.9	27.5	Clay Loam	1.23	0.251	0.129
상주	SWSD	70.9	22.9	6.2	Sandy Loam	1.72	0.149	0.054
금진	YDBG	88.6	2.9	8.5	Loamy Sand	1.74	0.106	0.032

농진청 기상 관측지점 토양 수리학적 매개변수

토양수분 함량 관측이 이루어진 55개 기상 관측지점에 대한 토양 수리학적 매개변수를 추정했다. 표 3.8은 농진청 기상 관측지점 중에서 지역적 분포를 고려한 BSGS(부산강서), GSGS(금산금성), IJIJ(인제인제), MAHG(무안현경), SWSD(수원서둔), YDBG(영덕병곡)의 6개 관측지점에 대해 토양 수리학적 매개변수를 추정한 결과를 나타내고 있다. 나머지 49개 기상 관측지점에 대한 토양 수리학적 매개변수는 부록을 통해 정리하였다. 표 3.6에 의하면 BSGS 관측지점의 토양은 Sandy loam, GSGS 관측지점의 토양은 Loamy sand, IJIJ 관측지점의 토양은 Sandy loam, MAHG 관측지점의 토양은 Loam, SWSD 관측지점의 토양은 Sandy loam 마지막으로 YDBG 관측지점의 토양 역시 Sandy loam으로 분류되었다. 6개 관측지점 중 Sand 성분(77.7%)이 가장 많은 GSGS 관측지점에서 포화 수리전도도(K_s)가 85.0 cm/day, 불포화 수리전도도(K_o)가 35.4 cm/day로 나타나 투수성이 가장 크게 나타났다. Silt 성분(37.0%)과 Clay 성분(16.7%)이 가장 많은 MAHG 관측지점은 포화 수리전도도(K_s)가 12.8 cm/day, 불포화 수리전도도(K_o)가 4.5 cm/day로 나타나 투수성이 가장 작게 나타났다.

표 3.8 농진청 기상 관측지점 토양 수리학적 매개변수

AWS ID	지점명	토양 수리학적 매개변수						
		θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	K_s (cm/day)	K_o (cm/day)	L
BSGS	부산강서	0.039	0.386	0.040	1.507	63.9	27.6	-1.034
GSGS	금산금성	0.037	0.389	0.043	1.611	85.0	35.4	-0.943
IJIJ	인제인제	0.032	0.393	0.039	1.450	65.0	28.6	-1.034
MAHG	무안현경	0.056	0.396	0.012	1.466	12.8	4.5	-0.412
SWSD	수원서둔	0.038	0.387	0.041	1.546	71.7	30.4	-0.995
YDBG	영덕병곡	0.043	0.386	0.029	1.400	37.4	15.4	-1.061

토양통 토양 수리학적 매개변수

농촌진흥청 국립농업과학원으로부터 제공받은 총 405개 토양통 자료 중 밭 지역으로 분류되는 128개 토양통과 논 지역으로 분류되는 149개 토양통 토양에 대한 수리학적 매개변수를 ROSETTA 모형을 이용해 추정했다. 표 3.9는 농진청 기상 관측지점 중 BSGS(부산강서), GSGS(금산금성), IJJ(인제인제), MAHG(무안현경), SWSD(수원서둔), YDBG(영덕병곡) 관측지점 주변 토양통에 대한 토양 수리학적 매개변수를 추정한 결과를 나타내고 있다. 나머지 271개 토양통에 대한 토양 수리학적 매개변수는 부록을 통해 정리하였다. 표 3.7에 의하면 BSGS 관측지점 주변의 토양통은 ‘낙동통’으로 토성은 Loamy sand, GSGS 관측지점 주변의 토양통은 ‘사촌통’으로 토성은 Loam, IJJ 관측지점 주변의 토양통은 ‘중동통’으로 토성은 Sandy loam, MAHG 관측지점 주변의 토양통은 ‘각화통’으로 토성은 Clay loamy, SWSD 관측지점 주변의 토양통은 ‘상주통’으로 토성은 Sandy loam 마지막으로 YDBG 관측지점 주변의 토양통은 ‘금진통’으로 토성은 Loamy sand으로 분류되었다. 6개 토양통 중에서 Sand 성분(88.6%)이 가장 많은 ‘금진통’ 토양에서 포화 수리전도도(K_s)는 135.6 cm/day로 가장 크게 나타났으며 Sand 성분(76.7%)이 ‘금진통’ 다음으로 많고 Clay 성분이 ‘금진통’보다 적은 ‘낙동통’ 토양에서 불포화 수리전도도(K_o)는 35.6 cm/day로 나타났다. 반면 Silt 성분(42.3%)과 Clay 성분(25.2%)이 많이 함유된 ‘사촌통’ 토양에서 포화 수리전도도(K_s)는 26.5 cm/day, 불포화 수리전도도(K_o)는 0.8 cm/day로 투수성이 가장 작게 나타났으며 잔류 수분함량(θ_r)은 0.072cm³/cm³, 포화 수분함량(θ_s)은 0.479cm³/cm³로 6개 토양통 가운데 가장 큰 값을 나타냈다. 토양수분곡특성곡선의 형상계수 인 α (1/cm)는 ‘사촌통’에서 0.002 (1/cm)로 가장 작은 값을 나타냈으며 n 은 1.869로 가장 큰 값을 나타냈다. 본 연구에서는 ROSETTA 모형을 이용해 밭 지역과 논 지역으로 분류되는 총 277개 토양통에 대해 토양 수리학적 매개변수를 추정하였고 여기서 얻어진 수리학적 매개변수들은 토양수분 함량 추정을 위한 SWAP 모형의 입력 자료로 이용되었다.

표 3.9 농진청 기상 관측지점 주변 토양통의 토양 수리학적 매개변수

AWS ID	토양통	토양 수리학적 매개변수						
		θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	K_s (cm/day)	K_o (cm/day)	L
BSGS	낙동	0.023	0.335	0.051	1.453	87.8	35.6	-1.224
GSGS	사촌	0.072	0.479	0.002	1.869	26.5	0.8	0.883
IJIJ	중동	0.026	0.334	0.032	1.351	31.3	17.1	-1.278
MAHG	각화	0.055	0.457	0.025	1.340	35.2	13.6	-0.983
SWSD	상주	0.023	0.315	0.031	1.352	25.1	16.8	-1.267
YDBG	금진	0.023	0.330	0.045	1.412	135.6	28.8	-1.264

ROSETTA 모형은 수집되는 토양정보 양에 따라 토양 수리학적 매개변수의 정밀도가 다르게 나타난다. 농진청 기상 관측지점의 토양정보는 SSC(Sand, Silt, Clay) 정보만 제공하고 있어 ROSETTA 모형을 구동할 때 SSC 정보만 입력한 상태에서 토양 수리학적 매개변수를 추정했다. ROSETTA 모형에 SSC 정보만 입력했을 경우와 SBT(SSC, BD, TH33, TH1500) 정보를 입력했을 경우에 대한 토양 수리학적 매개변수 추정 결과의 차이를 분석했다(그림 3.12). 포화 수리전도도(K_s)의 경우 SSC 입력 자료와 SBT 입력 자료를 이용한 추정 결과 사이에 $R^2=0.76$ 의 높은 상관성을 나타냈다. 불포화 수리전도도(K_o)의 경우 $R^2=0.56$ 의 상관성을 나타냈으며, 포화 수분함량(θ_s)의 경우 $R^2=0.54$, 잔류 수분함량(θ_r)의 경우 $R^2=0.34$ 의 상관성을 나타냈다. TH33과 TH1500 같은 토양 특성 정보는 실험실에서 특정 실험 장비를 이용해야만 얻어지는 자료이기 때문에 상당한 시간과 비용이 발생한다. SSC 입력 자료만을 이용해 추정된 토양 수리학적 매개변수와 SBT 입력 자료를 이용해 추정된 토양 수리학적 매개변수 사이에 어느 정도 상관성을 나타내고 있기 때문에 대상 관측지점 토양 정보가 부족할 경우 최소한 SSC 입력 자료만 가지고도 토양 수리학적 매개변수를 추정하는데 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

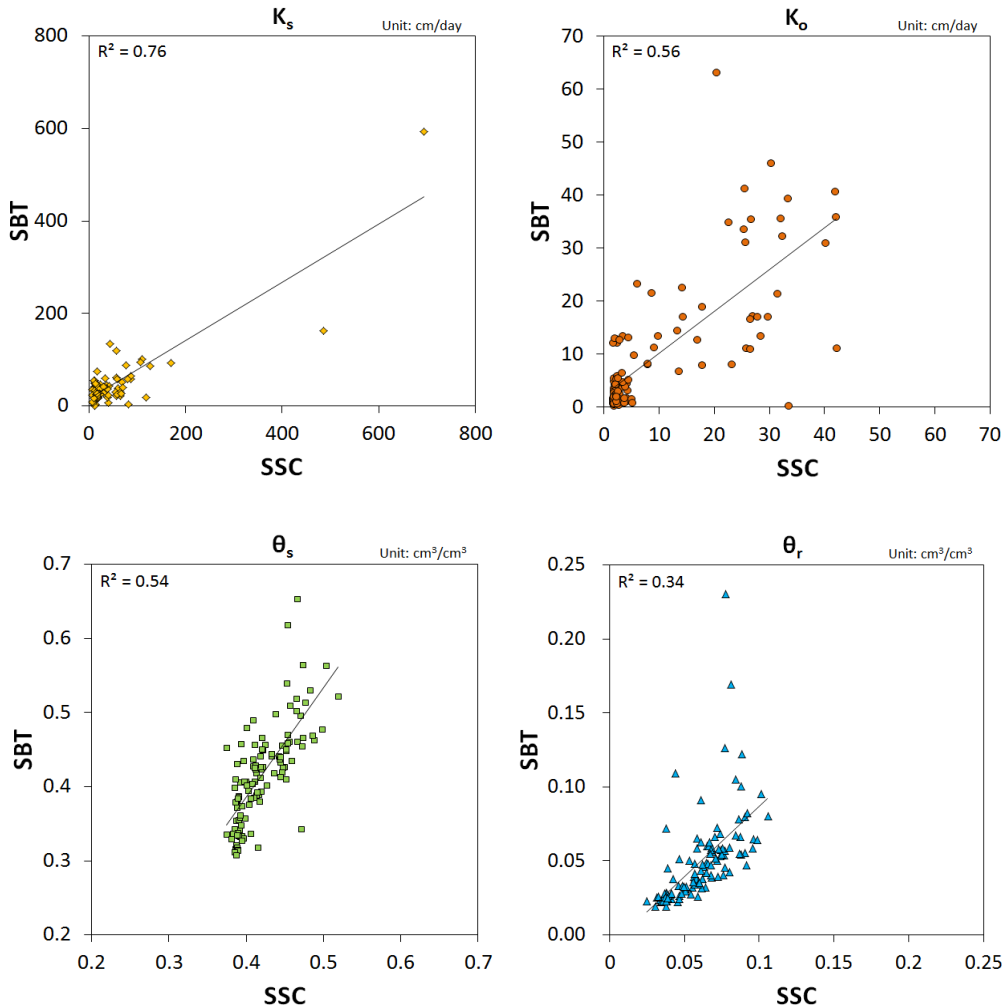


그림 3.12 ROSETTA 모형의 입력정보(SSC:Sand, Silt and Clay percentage, SBT: SSC, BD, TH33 and TH1500) 차이에 따른 토양 수리학적 매개변수 추정 결과 분석

3.1.2.2 농촌진흥청 기상 관측지점 기상 자료

농촌진흥청 국립농업과학원에서는 전국 기상 관측지점으로부터 기온(°C), 습도(%), 풍향, 풍속(m/s), 강수량(mm), 일조시간(HH:MM)에 대한 기상 자료를 수집해 농업기상정보서비스를 통해 실시간으로 제공하고 있다. 본 연구에서는 농촌진흥청 국립농업과학원으로부터 기상 관측지점에 대한 2015년 1월 1일부터 12월 31일까지의 일 단위 기상 자료를 제공 받아 각 관측지점의 토양수분 함량 변동 시뮬레이션에 이용했다.

일 단위 토양수분 함량 시뮬레이션에는 일사량(RAD), 일최저기온(Tmin), 일최고기온(Tmax), 기압(HUM), 풍속(WIND), 강수량(RAIN) 자료가 이용된다. 그림 3.13은 기상 관측지점 중에서 지역적 분포를 고려한 BSGS(부산강서), GSGS(금산금성), IJJ(인제인제), MAHG(무안현경), SWSD(수원서둔), YDBG(영덕병곡)의 6개 관측지점의 위치정보를 나타내고 있다. 본 보고서에는 55개 기상 관측지점 중 선정된 6개 관측지점에 대한 기온, 강수량 특성을 정리했다. 표 3.10과 그림 3.14는 2015년에 대한 6개 관측지점의 월 평균 기온과 월 평균 강수량을 나타내고 있다. 여름철 월 평균 최고 기온은 6개 관측지점 중 SWSD에서 25.9°C로 가장 높았고 겨울철 월 평균 최저 기온은 IJJ에서 -2.9°C로 가장 낮게 나타났다. 월 최대 강수량은 IJJ에서 7월 253.5mm, 월 최소 강수량은 YDBG에서 7.5mm로 나타났다.

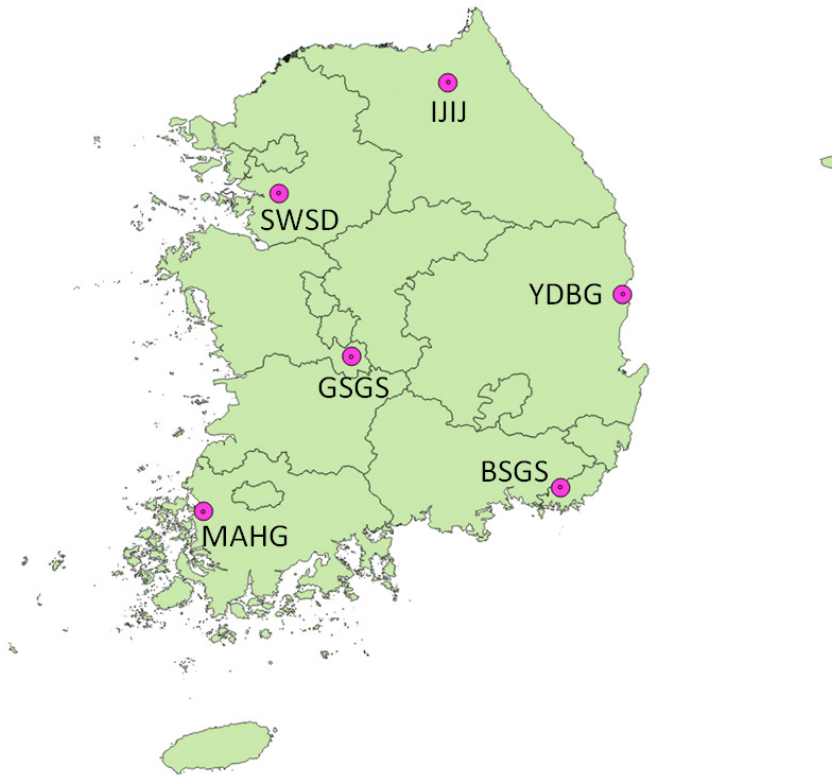


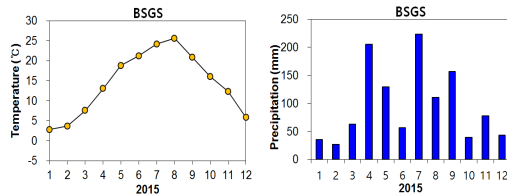
그림 3.13 지역적 분포를 고려한 6개 기상 관측지점의 위치정보

표 3.10 기상 관측지점의 월 평균 기온 및 강수량

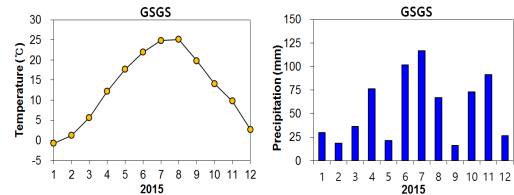
단위: 기온 ℃, 강수량 mm

ID	항목	2015년											
		1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
BSGS	기온	2.8	3.7	7.5	13.0	18.8	21.2	24.2	25.6	20.8	16.0	12.4	5.8
	강수량	35.5	26.5	63.0	205.4	129.5	56.5	223.5	110.5	157.0	39.5	78.0	43.0
GSGS	기온	-0.8	1.2	5.6	12.2	17.7	21.9	24.9	25.1	19.8	14.1	9.8	2.7
	강수량	30.0	18.5	36.5	76.5	21.5	101.5	116.5	67.0	16.0	73.0	91.5	26.5
IJIJ	기온	-2.9	-0.1	5.1	11.4	18.0	22.5	24.5	25.4	20.2	14.4	7.9	0.5
	강수량	12.5	23.5	12.5	83.0	23.0	47.0	253.5	129.0	28.5	48.0	130.0	22.0
MAHG	기온	1.8	2.5	6.3	12.4	17.5	21.4	24.6	25.3	21.1	16.3	11.3	4.8
	강수량	26.5	23.5	19.5	111.5	40.5	82.5	208.5	95.0	78.5	86.0	97.0	63.0
SWSD	기온	-0.7	1.2	5.8	12.9	17.7	22.9	25.1	25.9	21.4	14.8	9.0	2.0
	강수량	16.5	21.5	10.5	91.5	32.0	30.5	219.5	71.0	7.0	63.5	106.0	41.0
YDBG	기온	1.9	2.7	7.1	12.2	18.6	20.3	23.4	25.0	19.8	14.9	10.8	4.9
	강수량	8.0	7.5	37.5	65.5	11.0	96.0	87.5	109.5	73.5	17.5	184.0	21.5

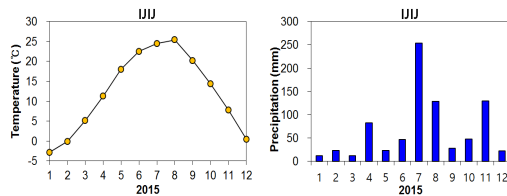
a) BSGS(부산강서)



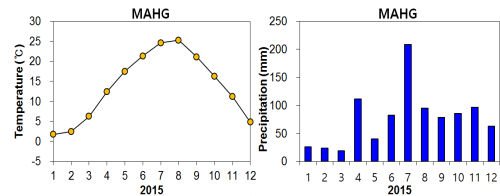
b) GSGS(금산금성)



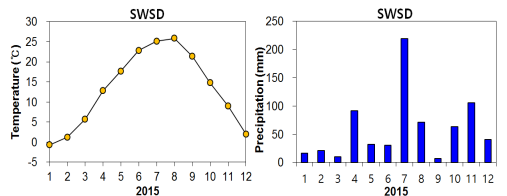
c) IJIJ(인제인제)



d) MAHG(무안현경)



e) SWSD(수원서둔)



f) YDBG(영덕병곡)

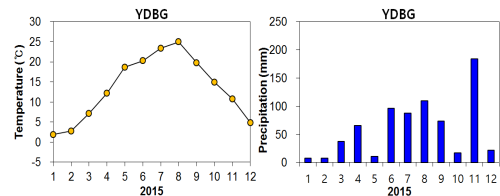
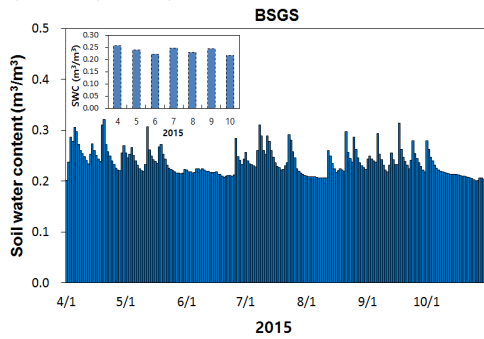


그림 3.14 기상 관측지점별 기온 및 강수량 변동 그래프

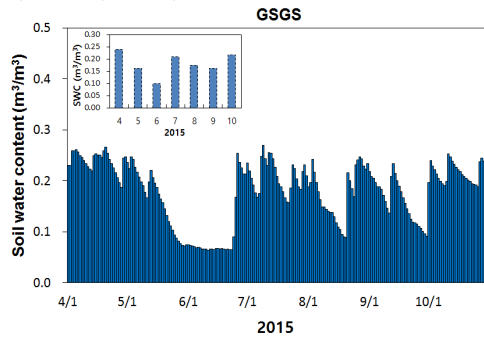
3.1.2.3 농촌진흥청 기상 관측지점 토양수분 자료

농촌진흥청 국립농업과학원에서는 기상 관측망에 연동해서 71개 관측지점에 토양수분센서를 설치했다. 본 연구에서는 국립농업과학원으로부터 2015년 4월 1일부터 2015년 10월 31일까지의 표토 10cm 측정치 보정 값을 제공받아 토양수분 함량 추정 모형의 시뮬레이션 결과와 비교했다. 국립농업과학원으로부터 제공된 토양수분 함량 관측자료 중에는 결측된 자료가 있어 장기 결측에 대해서는 보정이 이루어지지 않았지만 단기 결측에 대해서는 강수량의 유무를 고려해 보정하였다. BSGS 관측지점의 경우 2015년 4월 1일, 7월 4일, 7월 5일에 대해 결측이 있었지만 해당일에 강수가 없어 결측 자료 전후 자료를 이용해 등간격으로 보정을 실시했다. 그림 3.15는 6개 기상 관측지점의 토양수분센서를 통해 관측된 2015년 4월 1일-10월 31일까지의 토양수분 함량 변동을 나타내고 있으며 월 평균 토양수분 함량의 변동을 각 관측지점 그래프 안에 추가해 나타내고 있다. 토양수분 함량의 변동 폭은 BSGS 관측지점에서 다른 지점에 비해 크지 않으며 SWSD 관측지점에서 변동 폭이 크게 나타났다. 또한 GSGS 관측지점에서는 5월 중순부터 6월 말까지 토양수분 함량의 감소가 뚜렷하게 나타나고 있으며 SWSD 관측지점에서 역시 5월 중순부터 시작되는 토양수분 함량 감소가 7월 중순까지 이어지는 것으로 나타났다. 월 평균 토양수분 함량을 보더라도 GSGS와 SWSD 관측지점에서 6월 토양수분 함량이 다른 기간에 비해 작을 것을 확인할 수 있다.

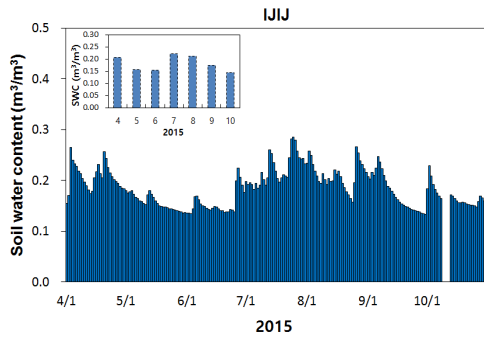
a) BSGS(부산강서)



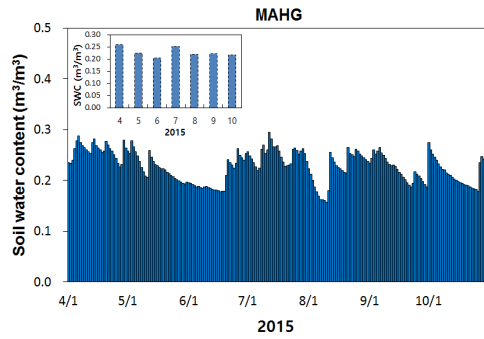
b) GSGS(금산금성)



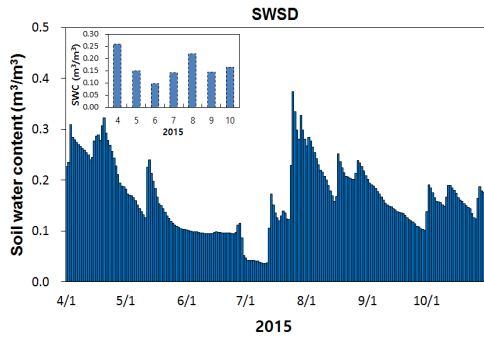
c) IJJI(인제인제)



d) MAHG(무안환경)



e) SWSD(수원서둔)



f) YDBG(영덕병곡)

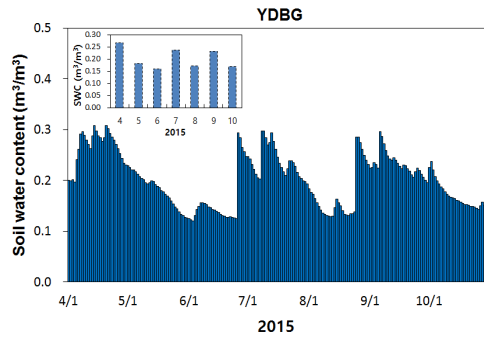


그림 3.15 기상 관측지점별 토양수분 함량 변동 그래프

3.1.2.4 농촌진흥청 기상 관측지점 비교 검증

농촌진흥청 국립농업과학원에서 운영하고 있는 기상 관측지점 중 토양수분과 기상관측 자료에 결측이 없는 55개 관측지점에 대해 SWAP 모형을 이용해 토양수분 함량을 추정했다. 국립농업과학원에서 제공 받은 토양수분 관측 자료는 지표면 10 cm 깊이에 설치된 토양수분 센서로부터 2015년 4월 1일부터 10월 31일까지 1시간 간격으로 측정된 것으로 SWAP 모형의 토양수분 함량 시뮬레이션 결과와 비교를 위해 일 단위로 변경했다. 3.1.1에서 해남 KoFlux 관측지점의 장기 토양수분 관측 자료와의 비교를 통해 신뢰성이 검증된 토양수분 함량 추정 기법을 기상 관측지점에 적용해 토양수분 함량 추정 값과 토양수분 함량 관측 값을 비교했다. 기상 관측지점 중에서 지역적 분포를 고려한 BSGS(부산강서), GSGS(금산금성), IJJI(인제인제), MAHG(무안현경), SWSD(수원서둔), YDBG(영덕병곡)의 6개 관측지점에 토양수분 함량을 추정했으며 그림 3.16과 같이 토양수분 관측 자료와 비교해 나타냈으며 강수량 관측 자료를 역 막대 그래프로 나타내 강수 상황에 따른 토양수분 함량의 변동을 확인할 수 있도록 도왔다. BSGS 관측지점의 토양은 USDA 토양삼각분류법에 의해 Sandy loam으로 분류되며 포화 수분함량(θ_s)이 $0.386\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 로 추정돼 강수량이 많을 경우 이론적으로 토양수분 함량은 $0.386\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 까지 올라갈 수 있다. BSGS의 토양수분 함량 관측 값은 7월 23일 최대 $0.321\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 에서 10월 26일 최소 $0.201\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 의 범위에서 $0.120\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 의 폭으로 변동 되었으며 토양수분 함량 추정 값은 최대 $0.353\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 에서 최소 $0.124\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 의 범위에서 $0.229\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 의 폭으로 변동 되었다. 특히 강수량이 적었던 6월 중순에 관측 값에서는 큰 폭의 감소가 없었지만 추정 값에서는 큰 폭으로 감소하는 것으로 나타났다. GSGS 관측지점의 토양은 Loamy sand로 분류되며 포화 수분함량(θ_s)이 $0.389\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 로 추정되었다. GSGS의 토양수분 관측 값은 최대 $0.270\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 에서 최소 $0.064\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 의 범위에서 $0.206\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 의 폭으로 변동 되었으며 추정 값은 최대 $0.317\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 에서 최소 $0.095\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 의 범위에서 $0.222\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 의 폭으로 변동 되었다. GSGS의 10월 1일 토양수분 함량 추정 값이 관측 값보다 하루 먼저 피크가 나타났는데 해당일의 시간단위 강수량을 확인해보니 밤늦게까지 비가 내린 것으로 나타났다. 그림 3.16의 그래프에서 추정된 토양수분 함량의 피크가 관측 값보다 하루 먼저 나타난 곳은 대부분 이런 이유에서 발생하는 것으로 확인되었다. SWAP 모형을 이용한 토양수분 함량 시뮬레이션은 일 단위 기상

정보가 입력되기 때문에 일 강수량에 따라 토양수분 함량이 영향을 받는다. IJJ와 MAHG, SWSD, YDBG 관측지점에서는 5월 중순부터 6월 말까지 강수량이 적었는데 시뮬레이션 결과가 이 기간에 대한 토양수분 함량 감소를 대체적으로 잘 재현하는 것으로 나타났다. 표 3.11은 6개 기상 관측지점에 대한 토양수분 함량 추정 기법의 신뢰성을 분석한 결과로 RMSE가 0.028에서 0.055 사이로 나타났으며 TCC가 0.757에서 0.889 사이로 나타나 SWAP 모형을 이용한 토양수분 함량 추정 기법의 현장 적용성이 만족할 만한 수준에서 검증되었다.

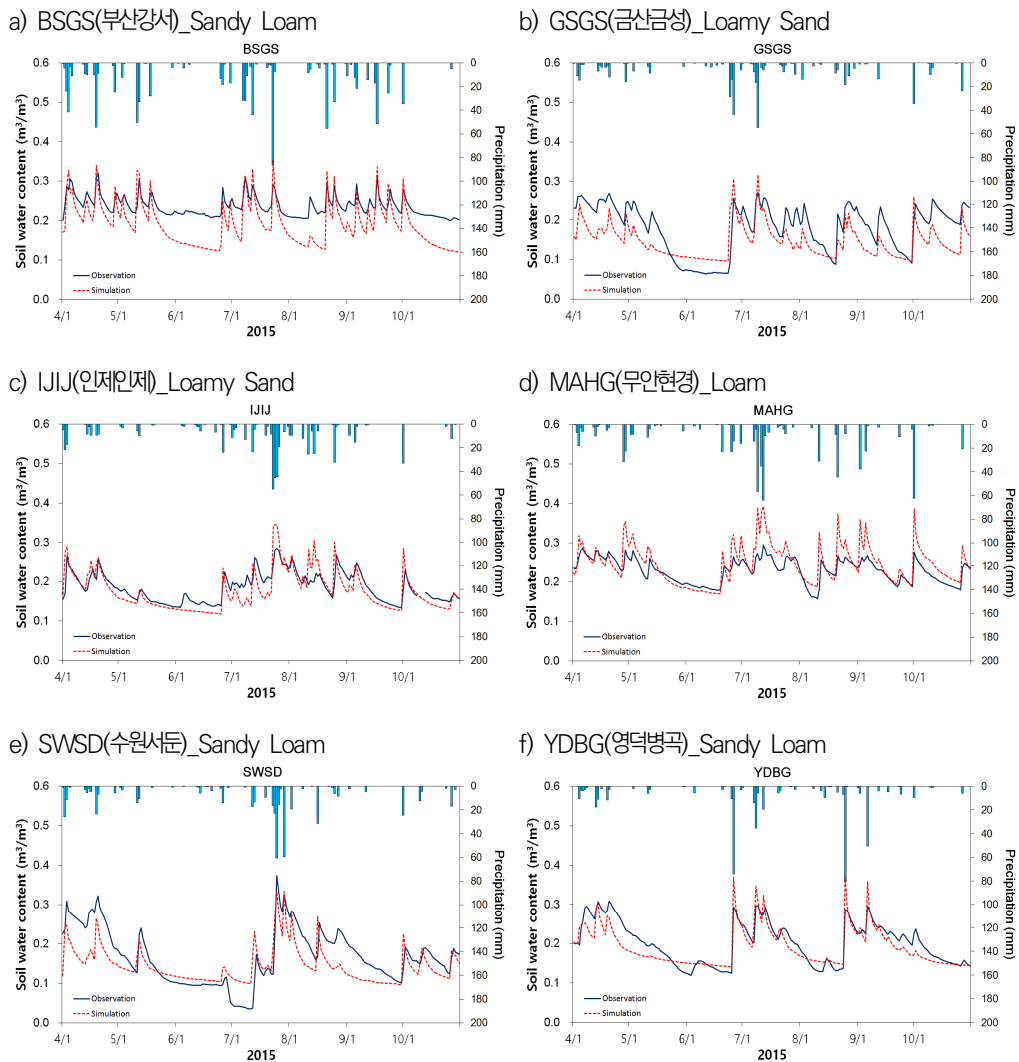


그림 3.16 기상 관측지점의 토양수분 관측 자료와 SWAP 모형 시뮬레이션 결과

표 3.11 기상 관측지점의 토양수분 함량 추정 기법 신뢰성 분석 결과

항목	기상 관측지점					
	BSGS	GSGS	IJIJ	MAHG	SWSD	YDBG
RMSE	0.055	0.052	0.036	0.036	0.051	0.028
TCC	0.889	0.757	0.834	0.793	0.757	0.874

모든 기상 관측지점에서 SWAP 모형을 이용한 토양수분 함량 추정 결과가 만족스러운 결과를 보인 것은 아니다. 그림 3.17에 나타난 JCBY(제천봉양), JEJE(정선정선), SJDG(성주대가), YCYC(예천예천) 관측지점의 경우 토양수분 함량 추정 시물레이션 결과에 심각한 에러가 발생했는데 이들 관측지점의 토성을 분석해 본 결과 모두 Sand 토양으로 나타났다. 이들 관측지점에 대한 Sand 함량을 분석한 결과 JCBY의 Sand 함량은 91.1%, JEJE에서 87.9%, SJDG에서 90.3%, YCYC에서 91.5%로 나타나 상당히 높은 Sand 함량을 보였다. 또한 이들 관측지점 토양의 수리학적 매개변수를 분석해 본 결과 전체적으로 포화 수리전도도(K_s)가 다른 관측지점보다 월등히 높았으며 토양수분 특성곡선의 형상계수 중 하나인 n 의 값이 2.0 이상으로 나타났다. JCBY의 경우 포화 수리전도도(K_s)가 433.7 cm/day, n 이 2.866으로 나타났고 JEJE의 경우 포화 수리전도도(K_s)가 265.1 cm/day, n 이 2.404, SJDG의 경우 포화 수리전도도(K_s)가 363.0 cm/day, n 이 2.650, YCYC의 경우 포화 수리전도도(K_s)가 449.7 cm/day, n 이 2.882로 나타났다. 토양수분 함량 추정 시물레이션의 에러 발생 원인이 높은 포화 수리전도도(K_s)와 높은 n 값이라고 판단되어 수리학적 매개변수 조정을 통해 이들 관측지점에 대해 토양수분 함량 추정 모형을 캘리브레이션 했다.

그림 3.18은 기상 관측지점의 토양수분 함량 관측 결과와 토양의 수리학적 매개변수 조정을 통해 각 관측지점별로 토양수분 함량을 추정한 결과를 비교한 그래프이다. 관측지점별로 실시한 수리학적 매개변수에 대한 조정 결과 시물레이션 에러는 사라졌고 토양수분 함량 추정 값은 관측 값과 유사한 패턴으로 변동하는 것으로 나타났다. JCBY 관측지점의 경우 포화 수리전도도(K_s)와 n 값 조정을 통해 시물레이션 한 결과 에러는 사라졌으나 전체적으로 토양수분 함량 추정 값이 관측 값보다 $0.033\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 과대 추정 되었으며 $\text{RMSE}=0.045$, $\text{TCC}=0.663$ 의 상관성을 나타냈다. 또한 JCBY 관측지점의 토양 조건하에서 포화 수분함량(θ_s)이 $0.385\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 로

추정되고 있어 많은 강수량이 발생할 경우 토양수분 함량이 $0.385\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 에 가까워질 것으로 예상했으나 7월 24일 119mm의 강수량이 발생했음에도 불구하고 토양수분 함량 관측 값은 $0.161\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 에 그치고 있어 관측 센서를 검증하거나 토양 조사를 다시 실시할 필요가 있다고 판단된다. JEJE 관측지점의 경우 매개변수 조정을 통해 재시뮬레이션을 실시했으며 전체적으로 토양수분 함량 추정 값이 관측 값보다 $0.039\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 과대 추정 되었으며 $\text{RMSE}=0.060$, $\text{TCC}=0.633$ 의 상관성을 나타냈다. SJDG 관측지점의 경우 토양수분 함량 추정 값이 관측 값보다 $0.018\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 과대 추정 되었으며 $\text{RMSE}=0.032$, $\text{TCC}=0.853$ 의 상관성을 나타냈다. YCYC 관측지점의 경우도 토양수분 함량이 $0.024\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 과대 추정 되었으며 $\text{RMSE}=0.046$, $\text{TCC}=0.717$ 의 상관성을 나타냈다. 시뮬레이션 에러가 발생하는 Sand 토양에 대해서는 매개변수 조정이 필요하며 시뮬레이션 결과의 정확도를 높이기 위해서는 대상지역 환경에 맞도록 지하수위나 근권역, 토양층 두께 등에 대한 초기 값 설정 변경이 필요하다.

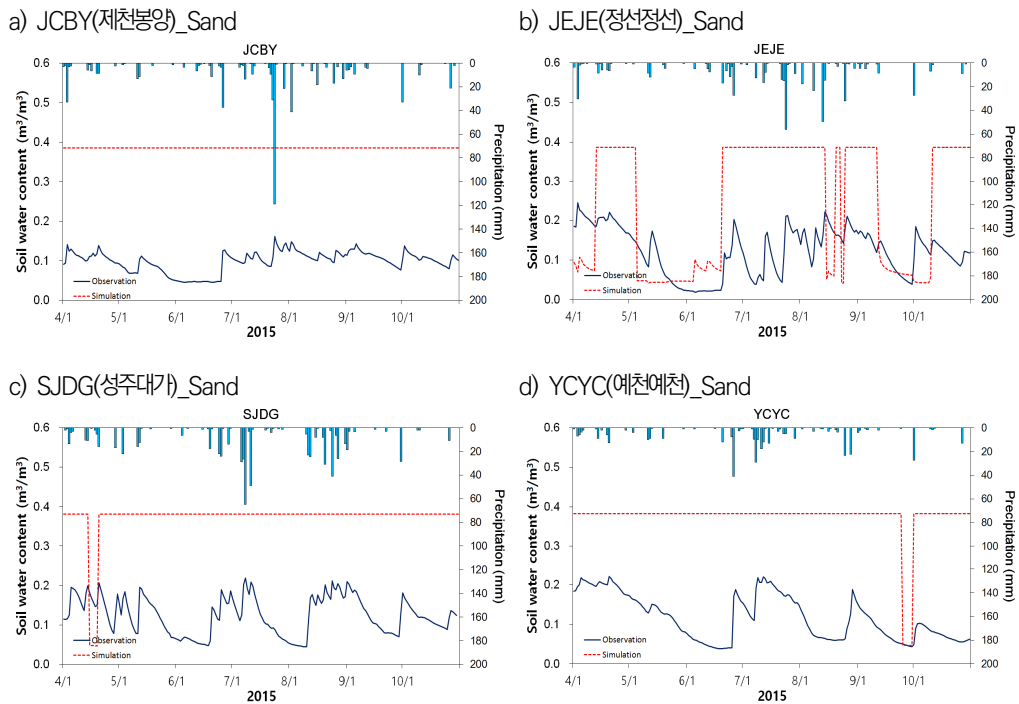


그림 3.17 시뮬레이션 에러가 발생한 Sand 토양의 기상 관측지점

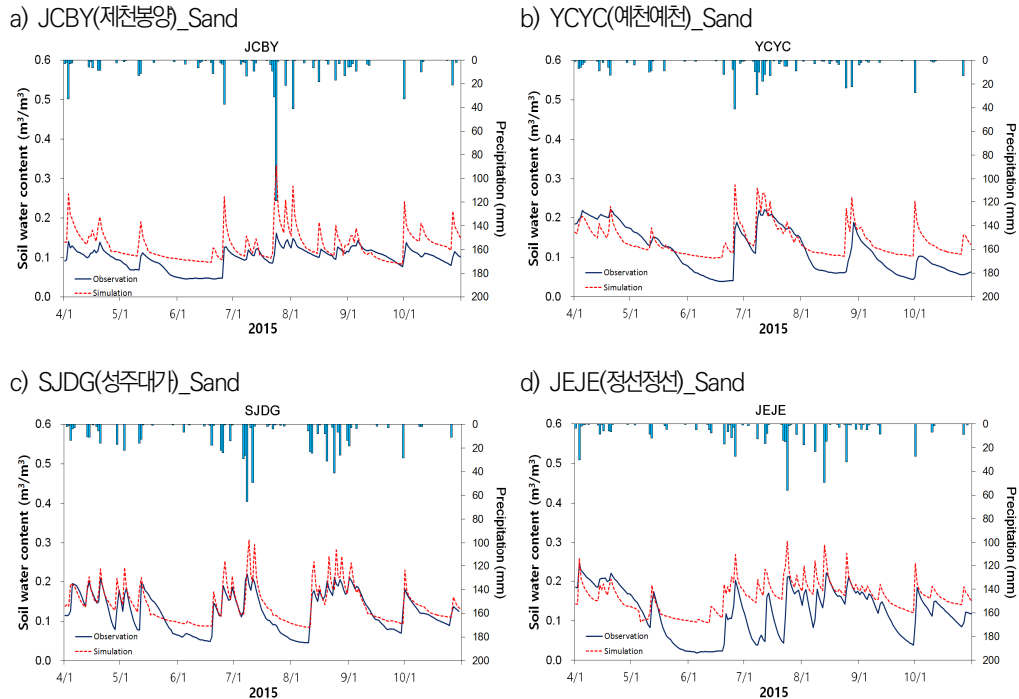


그림 3.18 토양의 수리학적 매개변수 조절을 통한 시뮬레이션 에러 보정 결과

3.2 밭작물 재배지역 적용

밀·콩·옥수수 등 주요 3대 곡물에 대한 국내 자급률은 2012/2013 양곡연도 기준 1.6%로 세계 130여 개국 중 하위 16번째에 해당되는 심각한 상황이라고 보고되었다. 우리나라 옥수수 생산량은 1970년대 축산업과 식품가공업의 발달로 수요량이 증가하면서 재배면적과 함께 증가했다. 하지만 턱없이 부족한 생산량으로 인해 대부분 수입에 의존하면서 70년대 19%이던 옥수수 자급률이 현재는 1%에도 미치지 못하고 있는 실정이다. 콩 자급률 역시 70년대 86%였으나 수입량에 밀려 현재는 6%에 그치고 있는 실정이다. 최근 정부는 수입 의존도가 높은 밭 식량작물의 자급률을 끌어올리기 위한 ‘밭 식량산업 중장기 발전대책’을 제시한 상황이다. 본 연구에서는 효율적인 물 관리를 통해 밭작물의 생산성을 향상시키기 위해 밭작물 재배지역의 토양수분 함량 추정기법을 제안하고자하며 실제 밭작물이 재배되고 있는 지역을 선정해 토양 정보와 기상 정보, 작물 생육 정보에 대한 조사를 실시했다.

3.2.1 옥수수 재배지역

강원도는 우리나라 옥수수 생산량의 약 37% (2015년 기준)를 차지하고 있으며 그 중에서 평창 지역은 주요 옥수수 생산지역으로 꼽히고 있다. 본 연구에서는 실제 옥수수가 재배되고 있는 강원도 평창군 방림면 방림리를 대상지역으로 선정해 토양 자료와 기상관측 자료 그리고 옥수수 생육정보 등을 수집했다.

a) 옥수수 재배지 토양 정보



b) 옥수수 재배지 전경



c) 평창운교 AWS



그림 3.19 옥수수 재배지역에 대한 흙토람 토양 정보 및 재배지 전경

3.2.1.1 옥수수 재배지역 토양 자료 및 수리학적 매개변수

강원도 평창군 방림면 방림리 1800답에 위치한 옥수수 재배지역의 토양 정보는 농촌진흥청 농업과학원에서 운영하고 있는 ‘흙토람’ 토양정보서비스를 통해 추출했다. 그림 3.19는 실제 옥수수가 재배되고 있는 지역에 대한 토양통 분포도를 나타내고 있으며 재배지 주변의 토양 특성에 대해서도 확인할 수 있다. 강원도 평창군 방림면 방림리에 대한 토성 분포는 Loam 토양이 42.3%로 가장 넓게 분포하고 있으며 Silt loam 토양이 38.3%, Clay loam 토양이 3.0%로 나타나 대부분 Loam 계통의 토양이 분포하고 있다. 옥수수 재배지역의 토양은 ‘대원통’으로 확인되었으며 Sand 성분이 47.4%, Silt 성분이 36.8%, Clay 성분이 15.8%를 차지하고 있어 USDA 토양삼각분류법에 따라 Loam 토양으로 확인되었다. 또한 옥수수 재배지역 주변 토양통에 대해

확인된 결과를 표 3.12에 나타냈다. ‘신불통’은 Sand 성분이 21.4%, Silt 성분이 51.2%, Clay 성분이 27.4%로 Silt loam 토양으로 확인되었고 ‘산계통’은 Sand 성분이 66.8%, Silt 성분이 22.0%, Clay 성분이 11.2%로 Sandy loam 토양으로 확인되었다. 작물이 이용할 수 있는 유효수분량인 포장용수량(-33kPa) 상태의 수분함량을 분석해 보면 ‘대원통’에서 $0.414\text{m}^3/\text{m}^3$, ‘신불통’에서 $0.395\text{m}^3/\text{m}^3$, ‘산계통’에서 $0.209\text{m}^3/\text{m}^3$ 인 것으로 나타났다.

표 3.12 옥수수 재배지 주변 토양통 토양 특성

토양통	토양성분(%)			토성	용적밀도 (g/cm^3)	수분함량 (m^3/m^3)	
	Sand	Silt	Clay			33kPa	1500kPa
대원	47.4	36.8	15.8	Loam	1.18	0.414	0.214
신불	21.4	51.2	27.4	Silt Loam	1.29	0.395	0.201
산계	66.8	22.0	11.2	Sandy Loam	1.36	0.209	0.080

강원도 평창군 방림면 방림리의 옥수수 재배지역 주변 토양통을 조사한 결과 ‘대원통’, ‘신불통’, ‘산계통’이 주로 분포하는 것을 확인했다. 옥수수 재배지역을 둘러싸고 있는 토양통은 ‘대원통’으로 SSC는 Sand(47.4%), Silt(36.8%), Clay(15.8%)의 비율로 구성되어 있으며 BD는 $1.18\text{g}/\text{cm}^3$, TH33은 $0.41\text{m}^3/\text{m}^3$, TH1500은 $0.21\text{m}^3/\text{m}^3$ 의 물리적 특성을 갖는다. ROSETTA 모형을 이용해 ‘대원통’ 및 옥수수 재배지역 주변의 ‘신불통’, ‘산계통’에 대한 수리학적 매개변수를 추정한 결과를 표 3.13에 나타냈다. ‘대원통’의 K_s 는 $38.2\text{cm}/\text{day}$, K_o 는 $1.4\text{cm}/\text{day}$ 로 낮게 나타났으며 θ_r 은 $0.075\text{cm}^3/\text{cm}^3$, θ_s 은 $0.495\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 로 나타났다.

표 3.13 옥수수 재배지 주변 토양통 토양 수리학적 매개변수

토양통	토양 수리학적 매개변수						
	θ_r (cm^3/cm^3)	θ_s (cm^3/cm^3)	α ($1/\text{cm}$)	n	K_s (cm/day)	K_o (cm/day)	L
대원	0.075	0.495	0.005	1.475	38.2	1.4	0.592
신불	0.079	0.480	0.004	1.498	20.6	1.1	0.516
산계	0.029	0.412	0.023	1.347	68.8	14.4	-0.773

3.2.1.2 옥수수 재배지역 기상 자료

강원도 평창군 방림면 방림리 옥수수 재배지역에서 가장 가까운 곳에 위치한 기상 관측지점은 PCWG(평창운교)로 옥수수 재배지역으로부터 직선거리로 약 14 km 떨어진 곳에 위치해 있다. 그림 3.20은 2015년에 관측된 PCWG 관측지점의 일 단위 기상 자료를 나타낸 것으로 일 최고기온($^{\circ}\text{C}$), 일 최저기온($^{\circ}\text{C}$), 강수량(mm), 풍속(m/s), 일사량(MJ/m^2)의 변동을 나타내고 있다. 관측기간에 대한 PCWG 관측지점의 연평균 기온은 9.8°C 로 나타났고 2015년 8월 7일 일 최고기온이 33.7°C 를 기록했으며 2015년 1월 8일 일 최저기온이 -19.9°C 로 관측기간 내 가장 낮은 기온을 기록했다. 강수량의 경우 7월에 총 76.4mm를 기록했으며 7월 21일에 21.6mm, 7월 24일에 20.6mm를 기록해 여름철 강수로는 많지 않은 양을 기록했다. 특히 5월 총 강수량이 9.1mm에 그친 반면 일사량은 $473 \text{ MJ}/\text{m}^2$ 으로 연중 가장 많았던 것으로 나타나 2015년 이 지역의 봄 가뭄이 심각했을 것으로 판단된다.

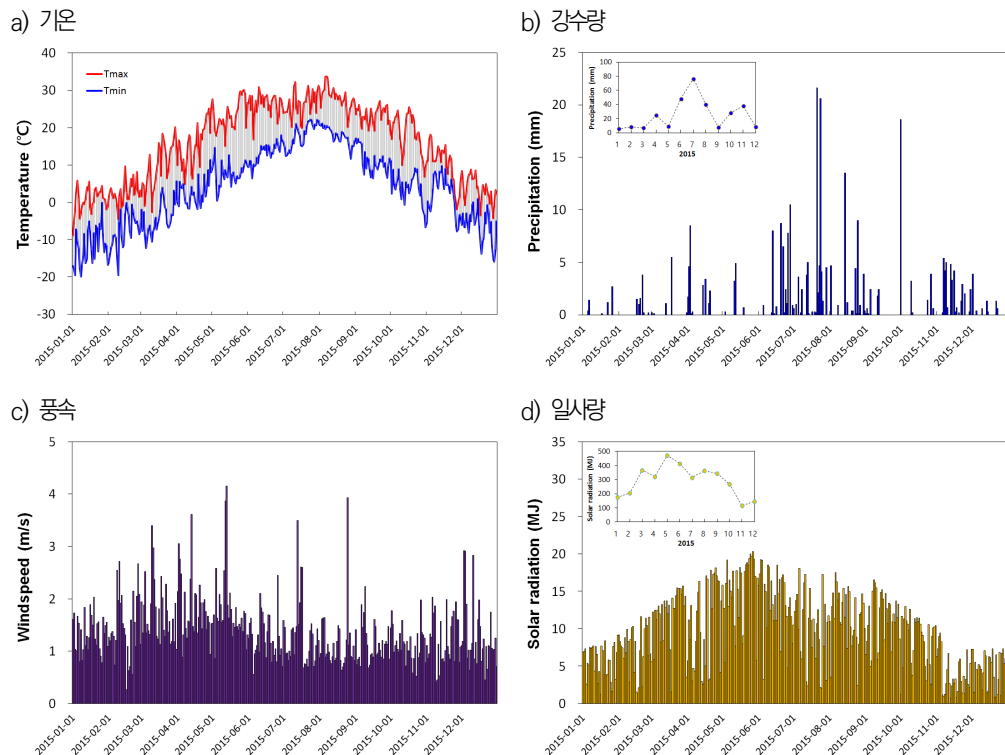


그림 3.20 PCWG(평창운교) 기상 관측지점의 2015년 1월부터 12월까지의 a) 기온, b) 강수량, c) 풍속, d) 일사량에 대한 분석 결과

3.2.1.3 옥수수 생육 정보

토양수분 예측 모형을 이용한 작물 생육단계별 토양수분 함량 추정과 작물 소비수량 추정을 위해서는 작물의 생육 정보가 필요하다. 본 연구에서는 강원도 평창 지역의 옥수수 파종일 정보와 일반적인 옥수수 생육 정보를 수집했다. 그림 3.21은 옥수수의 생육단계를 5단계로 나누어 나타낸 것으로 G-1 단계(생육초기), G-2 단계(신장기), G-3 단계(생육중기), G-4 단계(생육후기), G-5 단계(생육말기)로 구분하였다. 강원도 평창 지역에서는 약 100일의 생육기간을 갖는 옥수수가 재배되고 있으며 봄 파종 시기는 4월 중순 이후로 이루어지고 있다. 표 3.14는 옥수수 생육단계별 작물계수(K_c)를 발작물 물 관리 지침서(엄기철 등, 1999)와 Penman-Month 잠재증발산량 추정식을 이용해 산정된 주간(Weekly) 옥수수 작물계수를 참고로 작성한 5단계 생육단계별 작물계수를 나타낸다.

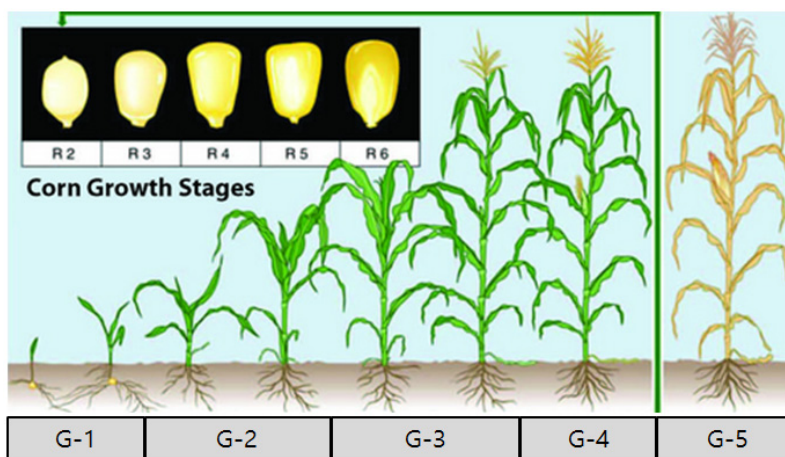


그림 3.21 옥수수 생육단계 구분(G-1: 생육초기, G-2: 신장기, G-3: 생육중기, G-4: 생육후기, G-5: 생육말기)

표 3.14 옥수수 생육단계별 작물계수(K_c)

작물	항목	생육단계				
		G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
옥수수	기간	4/23~5/6	5/7~6/3	6/4~6/24	6/25~7/8	7/9~7/29
	K_c	0.68	1.22	1.61	1.44	0.91

참고 : 발작물 물 관리 지침서 (엄기철 등 1999)

http://water.rid.go.th/hwm/cropwater/CWRdata/Kc/kc_en.pdf

3.2.1.4 옥수수 재배지역 토양수분 함량 추정

강원도 평창 지역의 옥수수 재배지에 대한 토양특성 자료, 기상관측 자료, 옥수수 생육특성 정보 등을 SWAP 모형에 적용해 토양수분 함량의 변동을 추정했다. 토양수분 함량 시물레이션 기간인 2015년 4월 1일부터 10월 31일까지의 강수량 관측 자료에 대해 분석해보면 총 강수량은 233.6mm에 불과했고 같은 기간 누적 잠재증발산량은 594.7mm로 나타났다. 강수량이 적었던 기간인 4월 1일부터 6월 15일까지의 토양수분 함량의 변동을 추정한 결과 그림 3.22와 같이 토양수분 함량이 $0.287\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 에서 $0.213\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 으로 지속적인 토양수분 감소를 나타냈다. 이 지역의 옥수수 출현일은 4월 23일 경이며 7월 25일경에 수확이 이루어진다. 옥수수 재배지 대상지역의 토양통은 ‘대원통’으로 Sand 성분과 Silt 성분이 각각 47.4%, 36.8%를 구성하는 Loam 토양이며 포화 수리전도도(K_s)가 38.2 cm/day, 포화 수분함량(θ_s)이 $0.495\text{cm}^3/\text{cm}^3$, 잔류 수분함량(θ_r)이 $0.075\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 로 추정되었다. 이러한 수리학적 매개변수 특성을 갖는 토양에서는 강수량이 풍부할 경우 토양수분 함량이 $0.4\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 이상으로 상승할 가능성이 있으나 2015년의 적은 강수량 상황에서는 토양수분 함량이 크게 회복되지 못한 것으로 판단된다.

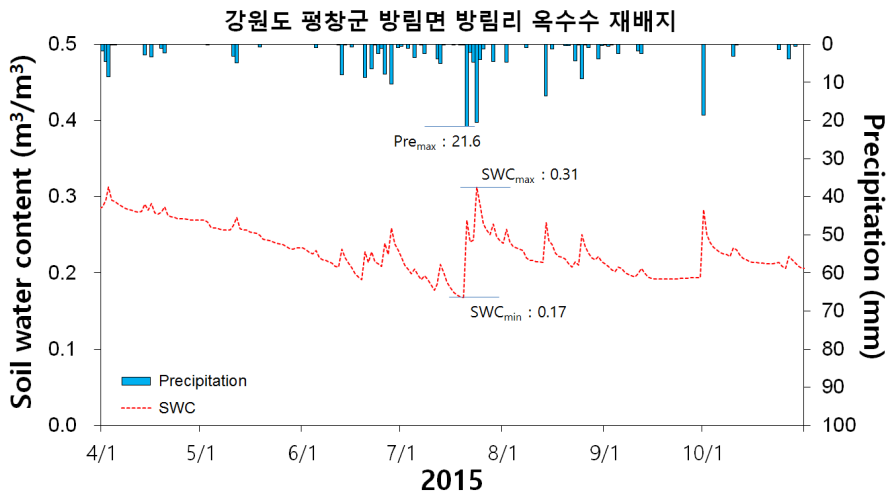
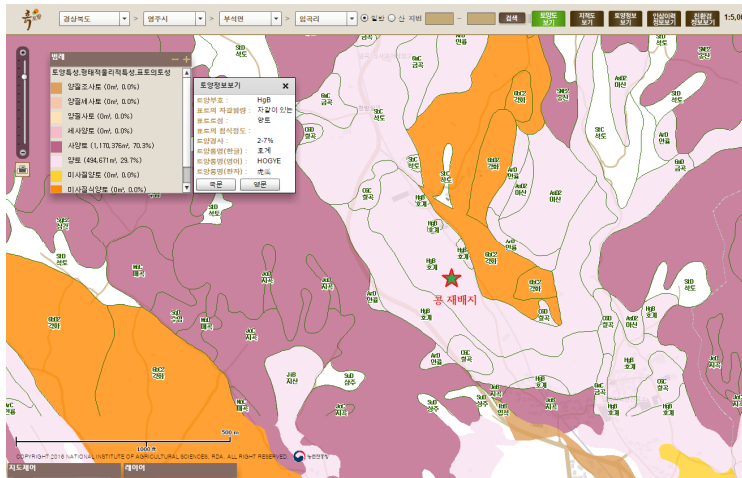


그림 3.22 옥수수 재배지역에 대한 강수량 분포와 토양수분 함량 추정 결과

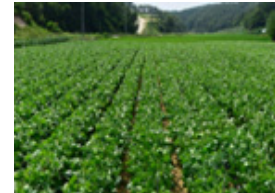
3.2.2 콩 재배지역

경상북도는 우리나라에서 콩 생산량이 가장 많은 곳으로 국내 콩 총생산량의 약 17% (2015년 기준)를 차지하고 있다. 경상북도 영지 지역에서는 856.2 ha의 농지로부터 연 1,157 톤의 콩을 생산하고 있으며 이는 시도 대비 10.5%에 해당하는 비중을 차지하고 있다. 특히 ‘부석태’라는 토종 재래종 콩에 대해 농촌진흥청 국립식량과학원과 MOU 체결을 통해 전략적으로 생산량을 늘려가고 있는 실정이다. 본 연구에서는 경상북도 영주시 부석면 임곡리를 대상지역으로 선정해 토양 자료와 기상관측 자료 그리고 콩 생육정보 등을 수집했다.

a) 콩 재배지 토양 정보



b) 콩 재배지 전경



c) 영주안정 AWS



그림 3.23 콩 재배지역에 대한 흙토람 토양 정보 및 재배지 전경

3.2.2.1 콩 재배지역 토양 자료 및 수리학적 매개변수

경상북도 영주시 부석면 임곡리 370전에 위치한 콩 재배지역의 토양 정보를 강원도 평창 지역의 옥수수 재배지역과 마찬가지로 ‘흙토람’ 토양정보서비스를 통해 추출했다. 그림 3.23은 실제 콩 재배가 이루어지고 있는 지역에 대한 토양통 분포도를 나타내고 있다. 경상북도 영주시 부석면 임곡리에 대한 토성 분포는 Sandy loam 토양이 67.3%로 가장 넓게 분포하고 있으며 Loam 토양이 28.6%, Silty clay loam 토양이 6.3%로 분포하고 있다. 콩 재배지역의 토양은 ‘호계통’으로 확인되었으며 Sand

성분이 31.5%, Silt 성분이 53.7%, Clay 성분이 14.8%를 차지하고 있어 USDA 토양 삼각분류법에 따라 Silt loam 토양으로 확인되었다. 또한 콩 재배지역 주변 토양통에 대해 확인된 결과를 표 3.15에 나타냈다. ‘석토통’은 Sand 성분이 17.2%, Silt 성분이 58.0%, Clay 성분이 24.8%로 Silt loam 토양으로 확인되었고 ‘상주통’은 Sand 성분이 70.9%, Silt 성분이 22.9%, Clay 성분이 6.2%로 Sandy loam 토양으로 확인되었다. 작물이 이용할 수 있는 유효수분량인 포장용수량(-33kPa) 상태의 수분함량을 분석해보면 ‘호계통’에서 $0.287\text{m}^3/\text{m}^3$, ‘석토통’에서 $0.325\text{m}^3/\text{m}^3$, ‘상주통’에서 $0.149\text{m}^3/\text{m}^3$ 인 것으로 나타났다.

표 3.15 콩 재배지 주변 토양통 토양 특성

토양통	토양성분(%)			토성	용적밀도 (g/cm^3)	수분함량 (m^3/m^3)	
	Sand	Silt	Clay			33kPa	1500kPa
호계	31.5	53.7	14.8	Silt Loam	1.26	0.287	0.101
석토	17.2	58.0	24.8	Silt Loam	1.46	0.325	0.131
상주	70.9	22.9	6.2	Sandy Loam	1.72	0.149	0.054

경상북도 영주시 부석면 임곡리의 콩 재배지역 주변 토양통을 조사한 결과 ‘호계통’, ‘석토통’, ‘상주통’이 주로 분포하는 것을 확인했다. 콩 재배지역을 둘러싸고 있는 토양통은 ‘호계통’으로 SSC는 Sand(31.5%), Silt(53.7%), Clay(14.8%)의 비율로 구성되어 있으며 BD는 $1.27\text{g}/\text{cm}^3$, TH33은 $0.35\text{m}^3/\text{m}^3$, TH1500은 $0.11\text{m}^3/\text{m}^3$ 의 물리적 특성을 갖는다. ROSETTA 모형을 이용해 ‘호계통’ 및 콩 재배지역 주변의 ‘석토통’, ‘상주통’에 대한 수리학적 매개변수를 추정한 결과를 표 3.16에 나타냈다. ‘호계통’의 K_s 는 $47.0\text{cm}/\text{day}$, K_o 는 $2.9\text{cm}/\text{day}$ 로 낮게 나타났으며 θ_r 은 $0.038\text{cm}^3/\text{cm}^3$, θ_s 은 $0.419\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 로 나타났다.

표 3.16 콩 재배지 주변 토양통 토양 수리학적 매개변수

토양통	토양 수리학적 매개변수						
	θ_r (cm^3/cm^3)	θ_s (cm^3/cm^3)	α ($1/\text{cm}$)	n	K_s (cm/day)	K_o (cm/day)	L
호계	0.038	0.419	0.006	1.507	47.0	2.9	0.496
석토	0.057	0.413	0.004	1.588	11.2	1.2	0.557
상주	0.023	0.315	0.031	1.352	25.1	16.8	-1.267

3.2.2.2 콩 재배지역 기상 자료

경상북도 영주시 부석면 임곡리 콩 재배지역에서 가장 가까운 곳에 위치한 기상 관측지점은 YJAJ(영주안정)로 콩 재배지역으로부터 직선거리로 약 19 km 떨어진 곳에 위치해 있다. 그림 3.24는 2015년에 관측된 YJAJ 관측지점의 일 단위 기상 자료를 나타낸 것으로 일 최고기온($^{\circ}\text{C}$), 일 최저기온($^{\circ}\text{C}$), 강수량(mm), 풍속(m/s), 일사량(MJ/m^2)의 변동을 나타내고 있다. 관측기간에 대한 YJAJ 관측지점의 연평균 기온은 12.2°C 로 나타났고 2015년 8월 7일 일 최고기온이 36.3°C 를 기록했으며 2015년 1월 3일 일 최저기온이 -15.0°C 로 관측기간 내 가장 낮은 기온을 기록했다. 강수량의 경우 6월에 총 78.5mm로 가장 많았으며 7월에 총 68.5mm를 기록했다. 연 최고 강수량은 6월 26일에 39.5mm를 기록했다. 강원도 평창 지역과 마찬가지로 여름철 강수량은 많지 않은 양을 기록했다. 특히 5월 중순부터 6월 중순까지 총 강수량이 4.5mm에 그친 반면 일사량은 $728 \text{ MJ}/\text{m}^2$ 으로 연중 이 기간에 가장 많았다. 풍속의 경우 대체적으로 겨울철에 빠르고 여름철에 느린 경향을 나타냈다.

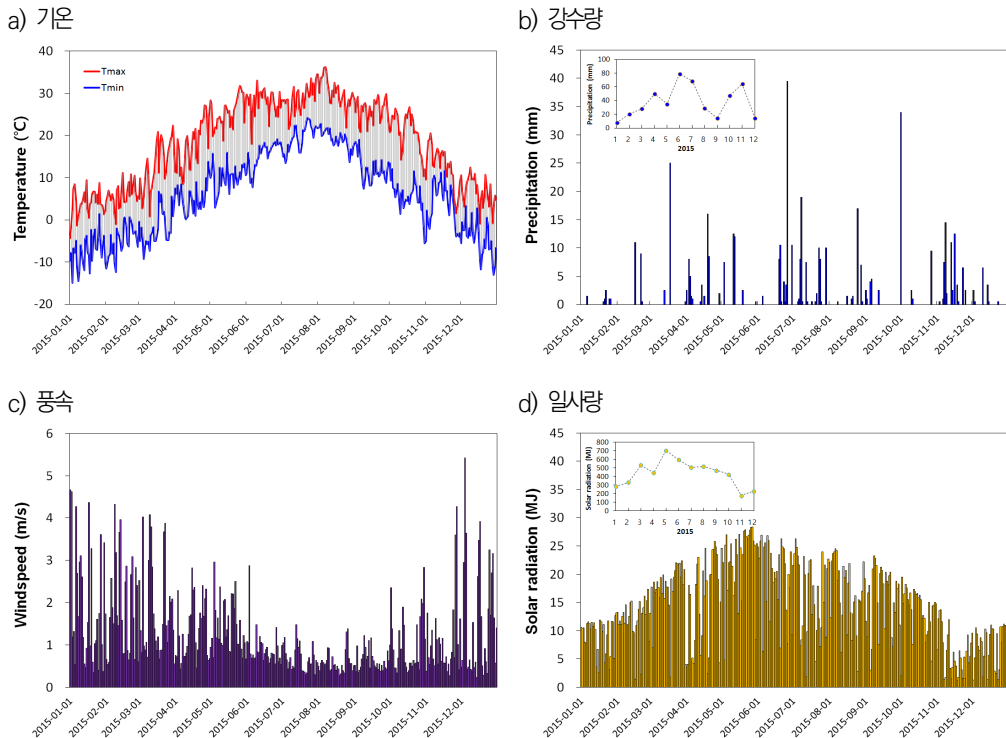


그림 3.24 YJAJ(영주안정) 기상 관측지점의 a) 기온, b) 강수량, c) 풍속, d) 일사량에 대한 분석 결과

3.2.2.3 콩 생육 정보

경상북도 영주 지역의 콩 파종일 정보와 일반적인 콩 생육 정보를 수집했다. 그림 3.25는 콩의 생육단계를 옥수수와 같이 5단계로 나누어 나타낸 것으로 G-1 단계(생육초기), G-2 단계(신장기), G-3 단계(생육중기), G-4 단계(생육후기), G-5 단계(생육말기)로 구분하였다. G-3 단계에서 개화한 콩은 G-4 단계로 이어지면서 꼬투리가 생기고 꼬투리 안에 콩이 여무는 과정을 거쳐 G-5 단계에서는 완숙되는 과정을 거친다. 경상북도 영주 지역에서는 약 140일의 생육기간을 갖는 콩이 재배되고 있으며 파종 시기는 5월 중순 경이고 수확은 10월 초순 경에 이루어진다. 표 3.17은 콩 생육단계별 작물계수(K_c)를 5단계 생육단계별로 나타낸 것으로 G-1 단계에서는 0.71로 옥수수의 0.61보다 크지만 G-3 단계에서는 1.31로 옥수수의 1.61보다 작은 것으로 나타났다.

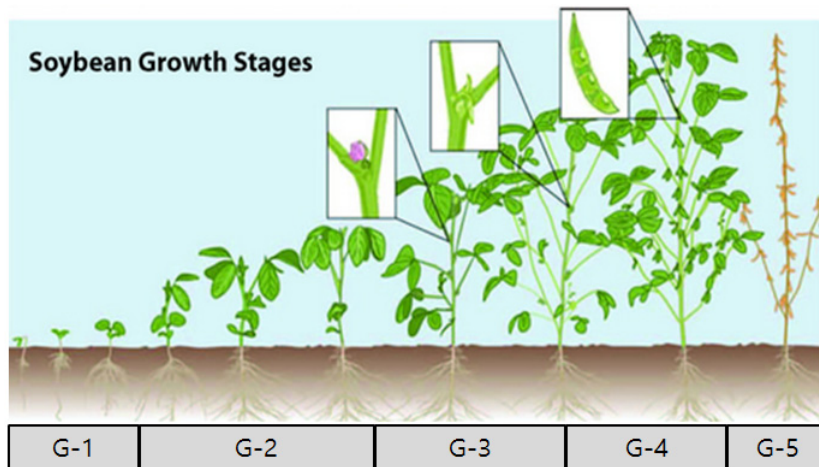


그림 3.25 콩 생육단계 구분(G-1: 생육초기, G-2: 신장기, G-3: 생육중기, G-4: 생육후기, G-5: 생육말기)

표 3.17 콩 생육단계별 작물계수(K_c)

작물	항목	생육단계				
		G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
콩	기간	5/20~6/18	6/19~7/28	7/29~8/16	8/17~9/6	9/7~10/6
	K_c	0.71	1.23	1.31	0.96	0.73

참고 : 발작물 물 관리 지침서 (엄기철 등 1999)

http://water.rid.go.th/hwm/cropwater/CWRdata/Kc/kc_en.pdf

3.2.2.4 콩 재배지역 토양수분 함량 추정

경상북도 영주 지역의 콩 재배지에 대한 토양수분 함량의 변동을 추정했다. 2015년 4월 1일부터 10월 31일까지의 강수량 관측 자료에 대해 분석해보면 총 강수량은 322.5mm에 불과했고 같은 기간 누적 잠재증발산량은 477.2mm로 나타났다. 이 지역의 콩 출현일은 5월 20일경이며 10월 6일경에 수확이 이루어진다. 콩 재배지 대상지역의 토양통은 ‘호계통’으로 Sand 성분과 Silt 성분이 각각 31.5%, 53.7%를 구성하는 Silt loam 토양이며 포화 수리전도도(K_s)가 47.0 cm/day, 포화 수분함량(θ_s)이 $0.419\text{cm}^3/\text{cm}^3$, 잔류 수분함량(θ_r)이 $0.035\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 로 추정되었다. 그림 3.26에서 토양수분 시뮬레이션 기간 중 6월 26일에 39.5mm의 최대 강수량이 발생했고 이때 토양수분 함량이 $0.29\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 까지 증가하는 것으로 추정되었다. 또한 콩 생육단계 중 G-3(생육중기) 단계와 G-4(생육후기) 단계에 해당하는 8월 1일부터 8월 24일까지의 강수량은 4.5mm에 그쳤으며 같은 기간 토양수분 함량이 $0.08\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 까지 감소하는 것으로 추정되었다. G-3과 G-4 단계는 개화기와 꼬투리 형성기를 포함하고 있어 이 시기에 토양수분 함량의 감소로 물 부족이 발생하게 되면 생산량에 영향을 미치게 된다. 2015년 통계청의 콩 생산량 통계자료를 보면 경상북도 지역의 콩 수확량은 1.80 t/ha로 과거 3년 평균 2.03 t/ha보다 생산성이 약 11% 떨어진 것으로 나타났다.

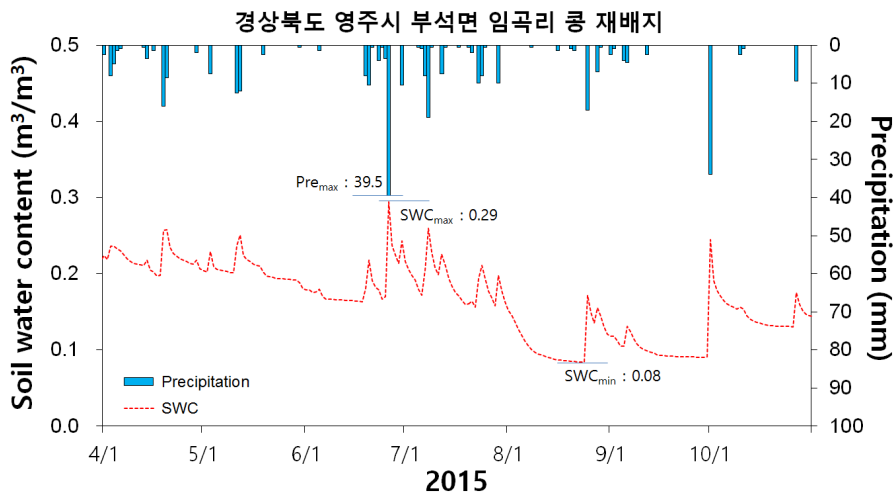


그림 3.26 콩 재배지역에 대한 강수량 분포와 토양수분 함량 추정 결과

3.3 식물 소비수량 추정

3.3.1 잠재증발산량 추정

식물이 생육과정에서 소비하는 물의 양은 식물체 내에서 보유하는 물을 제외하면 식물의 증발산 작용에 의해 모두 소비된다고 볼 수 있다. 다시 말하면 작물의 생육단계별 소비수량은 작물의 생육단계별 실제 증발산량과 같다고 할 수 있다. 작물의 생육단계별 소비수량을 추정하기 위해서는 먼저 작물의 생육단계별 실제 증발산량을 추정해야 하며 작물의 실제 증발산량은 기준작물의 잠재증발산량(ET_0)에 작물계수(K_c)를 곱해 산정한다. 본 연구에서는 기준잠재증발산량(ET_0)을 추정하기 위해 식 (2.6)의 FAO-56 Penman-Monteith 식을 이용했다. FAO-56 Penman-Monteith 식의 입력 자료에는 기본적으로 일 최저기온($^{\circ}\text{C}$), 일 최고기온($^{\circ}\text{C}$), 상대습도(%), 일사량(MJ/m^2), 풍속(m/s), 강수량(mm), 위치정보(위도, 경도), 해발고도(m)에 대한 정보가 필요하다. 해남 KoFlux 관측지점에서는 장기간에 걸쳐 FAO-56 Penman-Monteith 식의 입력 자료에 필요한 관측 자료를 수집하고 있다. 그림 3.27은 해남 KoFlux 관측지점에 대한 2009년부터 2015년까지(2014년은 결측으로 제외)의 월평균 잠재증발산량 추정 결과를 나타내고 있다. 월평균 잠재증발산량은 12월-2월에는 50mm 이하로 나타났고 5월-8월에는 100mm 이상으로 나타났다. 연평균 잠재증발산량은 2009년에 934mm로 가장 많았고 2015년에 864mm로 가장 적게 나타났다.

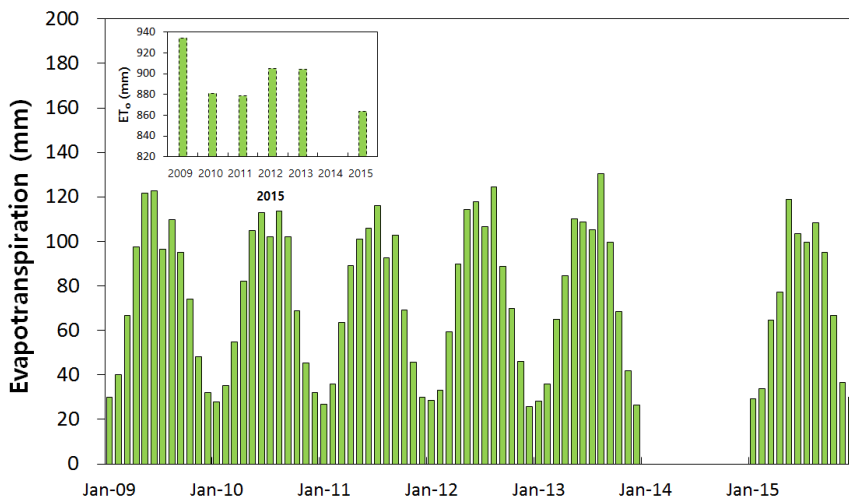


그림 3.27 해남 KoFlux 관측지점에 대한 장기 잠재증발산량(ET_0) 추정 결과

3.3.2 밭작물 재배지역 작물 소비수량 추정

밭작물 재배지역에 대한 작물의 생육단계별 소비수량을 추정하기 위해 먼저 일 단위 기준잠재증발산량이 추정됐다. 그림 3.28은 FAO-56 Penman-Monteith 식으로부터 추정된 강원도 평창군 방림면 방림리의 옥수수 재배지역과 경상북도 영주시 부석면 임곡리의 콩 재배지역에 대한 2015년 1월 1일부터 12월 31일까지의 기준잠재증발산량을 나타낸다. 두 지역의 기준잠재증발산량을 비교해보면 콩 재배지역의 기준잠재증발산량이 옥수수 재배지역보다 전체적으로 많은 것으로 나타났는데 원인 분석을 실시한 결과 두 지역 간 일사량의 차이로 인한 것으로 나타났다.

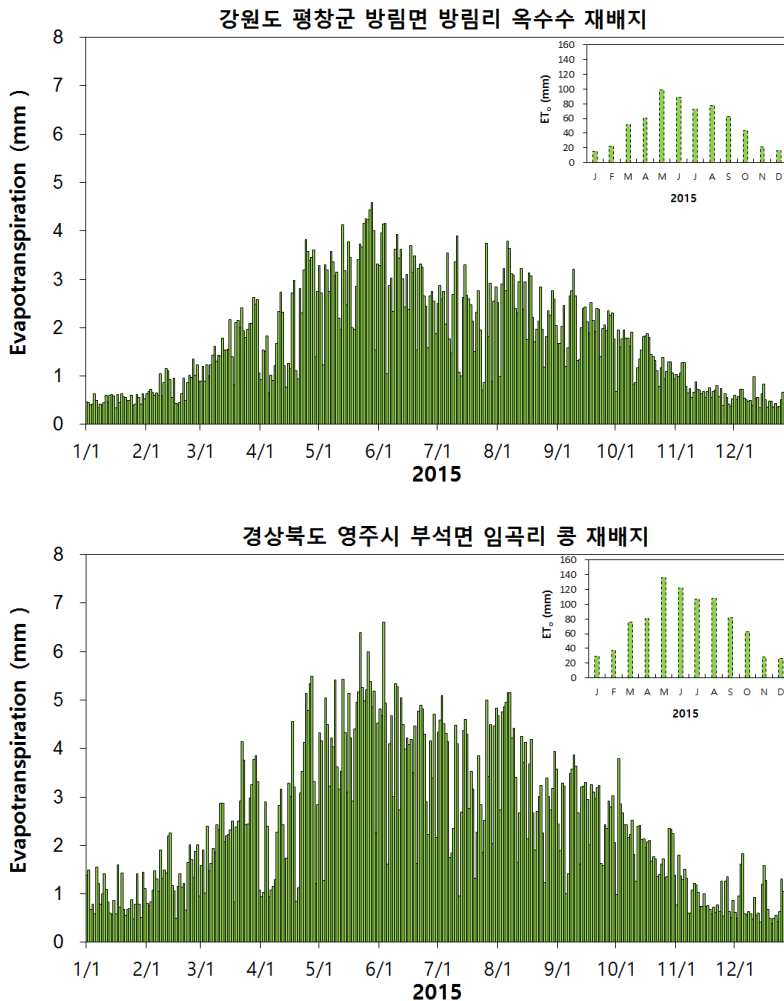


그림 3.28 밭작물 재배지역에 대한 잠재증발산량(ET_0) 추정 결과

옥수수와 콩에 대한 생육단계별 작물계수(K_c)는 농촌진흥청 농업과학기술원의 시험 포장에서 다년간의 Lysimeter 실험을 통해 산출된 작물계수 자료와 FAO-56 Penman-Month 잠재증발산량 추정식을 이용해 산출된 작물계수 자료를 바탕으로 5 단계 생육단계별 작물계수를 추정했다. 그림 3.29는 옥수수와 콩에 대해 생육기간 동안 변화하는 작물계수(K_c)를 1주일 간격으로 추정해 나타낸 그래프이다. 옥수수의 경우 생육단계별 작물계수(K_c)는 G-1 단계(생육초기)에서는 콩보다 작지만 G-3 단계(생육중기)에서는 콩보다 큰 것으로 나타났다. 옥수수와 콩에 대한 생육단계별 실제 증발산량은 그림 3.28의 일별 잠재증발산량에 그림 3.29의 생육기간 동안의 일별 작물계수(K_c)를 곱해서 산정했다.

FAO-56 Penman-Monteith 식으로부터 추정된 강원도 평창군 방림면 방림리의 옥수수 재배지역과 경상북도 영주시 부석면 임곡리의 콩 재배지역에 대한 기준잠재증발산량(ET_0)에 그림 3.29의 작물 생육기간 동안의 일별 작물계수(K_c)를 곱해 그림 3.30과 같이 실제증발산량(ET_a)을 산정했다. 옥수수의 경우 출현일로부터 약 3주 동안 그리고 G-5 단계(생육말기)의 마지막 약 2주 동안은 작물계수(K_c)가 1.0 이하인 관계로 기준잠재증발산량(ET_0)보다 실제증발산량(ET_a) 값이 작게 나타나고 있다. G-2 단계(신장기)부터 G-4 단계(생육후기)까지는 작물계수(K_c)가 1.0 이상으로 기준잠재증발산량(ET_0)보다 실제증발산량(ET_a) 값이 크게 나타나고 있다. 특히 5월말에서 6월초 사이 날씨가 맑을 경우에는 실제 증발산량(ET_a)이 6mm 이상 발생하는 것으로 추정되었다. 그러나 그림 3.22의 옥수수 재배지역 관측 강수량을 보면 4월부터 6월초까지 누적된 강수량이 40mm이하로 나타나 토양내 수분 함량의 감소가 불가피한 상황이었으며 실제 시뮬레이션 결과 같은 기간 동안 토양수분 함량이 지속적으로 감소하는 것으로 추정되었다. 또한 옥수수 생육기간 동안의 총 잠재증발산량(ET_0)은 279mm로 추정되었고 총 실제증발산량(ET_a)은 338mm로 추정되었다. 콩의 경우는 출현일로부터 약 3주 동안 그리고 G-4 단계(생육후기)의 후반기부터 G-5 단계(생육말기)까지 작물계수(K_c)가 1.0 이하인 관계로 기준잠재증발산량(ET_0)보다 실제증발산량(ET_a) 값이 작게 나타났다. 콩 생육기간에 전체에 대한 총 잠재증발산량(ET_0)은 492mm로 추정되었고 총 실제증발산량(ET_a)은 483mm로 추정되었다. 콩 재배지역에 대한 관측 강수량은 8월 1일부터 8월 24일까지의 누적 강수량이 4.5mm로 상당히 적었고 같은 기간 누적 실제증발산량(ET_a)은 109mm로 추정되었다.

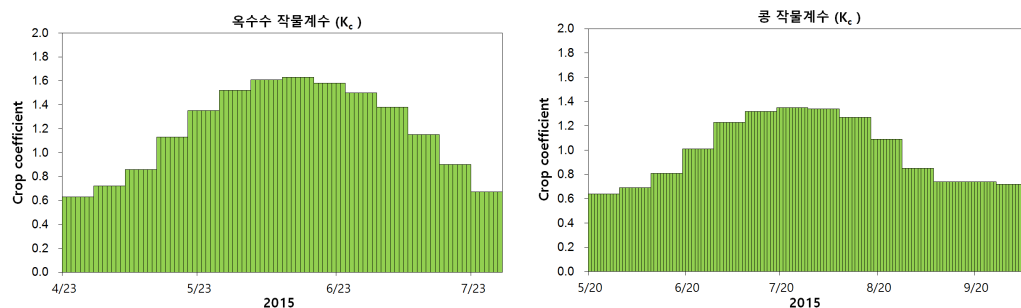


그림 3.29 옥수수와 콩에 대한 생육기간 동안의 주간 작물계수(K_c) 변화

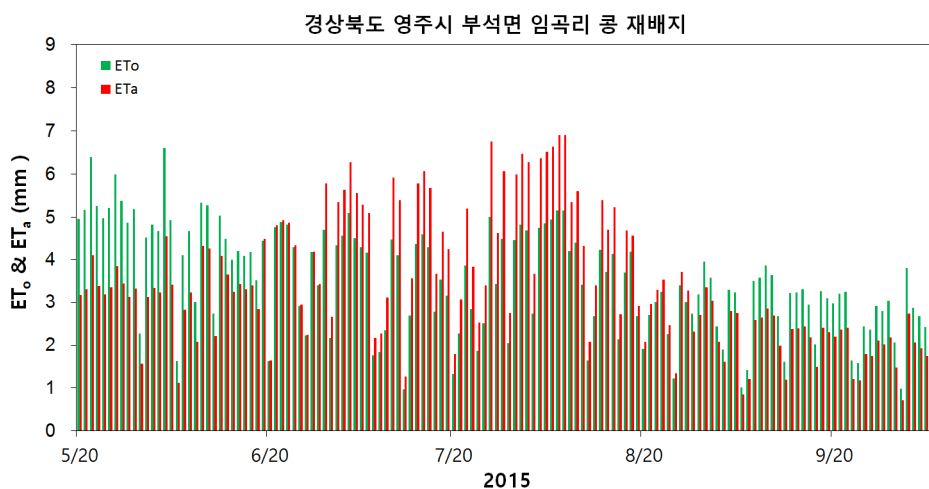
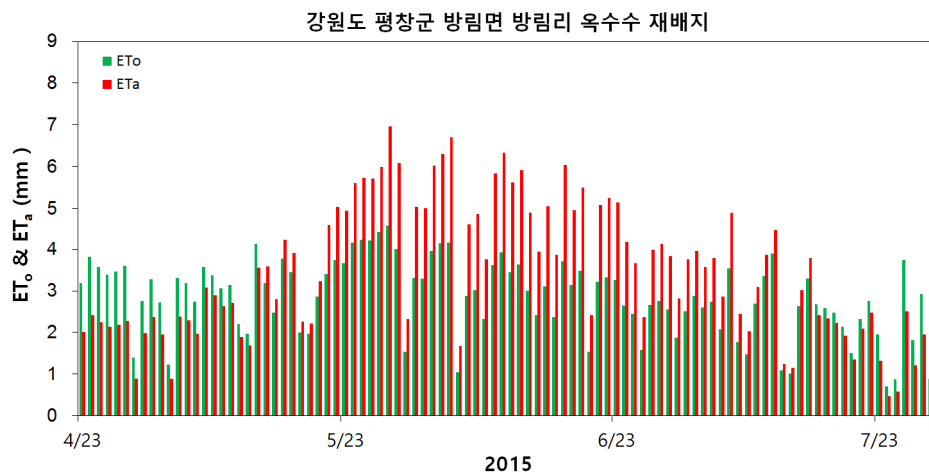


그림 3.30 밭작물 재배지역에 대한 잠재증발산량(ET_0)과 실제증발산량(ET_a)

표 3.18 발작물 생육단계별 강수량 및 소비수량(GWC)과 일 소비수량(MWC)

작물	항목	생육단계				
		G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
옥수수	Rain(mm)	0.3	8.8	27.8	28.1	68.6
	GWC(mm)	28.0	133.8	133.0	69.4	66.8
	MWC(mm)	2.0	4.8	6.3	5.0	3.2
콩	Rain(mm)	2.0	135.5	12.0	39.0	36.5
	GWC(mm)	68.9	110.6	65.2	42.2	45.1
	MWC(mm)	2.3	2.8	3.3	2.1	1.5

으며 같은 기간에 대해 토양수분 함량을 시뮬레이션 한 결과 토양수분 함량은 $0.198\text{m}^3/\text{m}^3$ 에서 $0.08\text{m}^3/\text{m}^3$ 로 지속적으로 감소하는 것으로 추정되었다.

발작물 재배지역에 대한 작물 생육단계별 소비수량이 실제작물증발산량(ET_o)과 같다는 가정에서 그림 3.30의 발작물 재배지역에 대한 일별 실제증발산량(ET_o)을 작물 생육단계별로 적산했다. 표 3.18은 옥수수와 콩에 대해 각 생육단계별로 적산된 강수량(Rain)과 작물소비수량(GWC) 그리고 일평균 작물소비수량(MWC)을 나타낸다. 옥수수의 경우 G-2와 G-3 단계에서 각각 133.8mm, 133.0mm의 소비수량이 발생하는 것으로 추정되었으나 실제 강수량은 각각 8.8mm, 27.8mm에 그쳐 모세관 작용에 의한 지하수로부터의 물 공급이 원활하지 못할 경우 토양수분 함량의 감소로 이어지기 때문에 정상적인 생육을 유지시키기 위해서는 관개를 통한 물 공급이 필요한 것으로 판단된다. 콩의 경우 G-1 단계에서 68.9mm의 소비수량이 추정되었는데 실제 강수량은 2.0mm에 그쳐 생육초기 관개를 통한 물 공급이 필요한 것으로 판단되며 G-2와 G-3 단계에서 각각 110.6mm, 65.2mm의 소비수량이 발생하는 것으로 추정되었고 실제 강수량은 각각 135.5mm, 12.0mm로 관측되고 있어 물부족으로 인한 콩 생육에 미치는 영향이 적었을 것으로 판단된다.

4. 결론

기후변화 영향으로 인한 이상기후 현상의 증가로 최근 들어 가뭄 발생이 빈번해지고 있으며 농작물 재배지역에 대한 토양수분 함량의 지속적인 감소 현상은 안정적인 작물 생산에 큰 위협요소가 된다. 농경지에 대한 토양 내 수분 함량의 변동을 지속적으로 모니터링 할 수 있다면 농작물이 물 스트레스 위험으로부터 벗어날 수 있도록 시의적절한 대응책을 마련할 수 있겠지만 모든 농경지에 대해서 토양수분 함량을 모니터링하는 것은 현실적으로 불가능하다. 본 연구에서는 농경지 토양층에 대한 물리적 프로세스 기반의 SWAP 모형에 Pedotransfer Functions(PTF) 기반의 ROSETTA 모형을 통해 추정된 토양의 수리학적 매개변수(θ_{res} , θ_{sat} , K_{sat} , a , n)와 기상관측 자료를 적용하여 작물 종류 및 생육 특성이 고려된 작물 생육시기별 토양수분 함량 추정 기법을 개발하였고 장기 토양수분 관측 자료와의 비교를 통해 토양수분 함량 추정 기법의 정확성 및 신뢰성을 평가하였다. 검증된 토양수분 함량 추정 기법에 농경지 토양특성 정보와 주변 기상관측 자료를 적용해 토양수분 함량의 변동을 추정하게 된다면 작물의 물 스트레스 위험으로부터 미리 대응 가능할 것으로 기대된다. 또한 발작물 재배지역에 대한 생육시기별 기준증발산량(ET_o)에 작물계수(K_c)를 적용해 실제 증발산량(ET_a)을 추정함으로써 옥수수와 콩 재배지역에 대한 생육시기별 소비수량을 평가했다. 본 연구에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

▶ **토양 수리학적 매개변수 추정:** 농촌진흥청 농업과학원에서 운영하고 있는 55개 기상 관측지점 토양과 우리나라 전체 토양통 중에서 주로 논 지역과 밭 지역으로 이용되고 있는 277개 토양통 토양, 해남 KoFlux 관측지점 토양 그리고 강원도 평창 지역의 옥수수 재배지역 토양과 경상북도 영주지역의 콩 재배지역 토양에 대해 ROSETTA 모형을 이용해 수리학적 매개변수(θ_{res} , θ_{sat} , K_{sat} , a , n)를 추정했다.

▶ **토양수분 함량 추정 기법 검증:** 농업수문모형인 SWAP 모형에 토양 수리학적 매개변수와 기상관측 자료 그리고 작물 생육정보 등의 입력 자료를 적용함으로써 대상지역의 토양수분 함량을 추정하는 기법이 제시되었다. 제시된 토양수분 함량 추정 기법을 이용해 해남 KoFlux 관측지점을 대상으로 2009년부터 2015년까지(2014년 제외) 토양수분 함량이 추정되었고 관측지점에 설치된 토양수분 센서(TDR 1, TDR 2, TDR 3) 관측 값과의 비교를 통해 상관계수(r)와 RMSE,

TCC로 연도별 분석을 실시한 결과 제시된 토양수분 함량 추정 기법의 신뢰성이 높은 것으로 판단되었다. 상관계수(r)는 3개 센서 모두와 0.8 이상으로 높게 나타났다으며 TDR 2 센서와의 경우 RMSE가 0.037, TCC가 0.792로 3개 센서 중에서 추정 결과와 가장 유사한 변동 특성을 나타냈다. 또한 기상 관측지점 중에서 지역적 분포를 고려한 BSGS(부산강서), GSGS(금산금성), IJJ(인제인제), MAHG(무안현경), SWSD(수원서둔), YDBG(영덕병곡)의 6개 관측지점을 대상으로 토양수분 함량 추정 기법을 검증한 결과 현장 적용성이 만족할 만한 수준에서 검증되었다. 하지만 모든 기상 관측지점에서 토양수분 함량 추정 기법이 만족스러운 결과를 보이지는 않았다. Sand 토양인 JCBY(제천봉양), JEJE(정선정선), SJDG(성주대가), YCYC(예천예천) 관측지점의 경우 토양수분 함량 추정 시물레이션 결과에 심각한 에러가 발생했다. Sand 함량이 90% 이상인 토양은 포화 수리전도도(K_s)가 300 cm/day 이상이고 토양수분특성곡선의 형상계수 중 하나인 n 의 값이 2.0 이상으로 나타났다. 시물레이션 에러가 발생하는 Sand 토양에 대해서는 매개변수 조정이 필요하며 시물레이션 결과의 정확도를 높이기 위해서는 대상지역 환경에 맞는 초기 값 설정이 필요하다.

- ▶ **밭작물 재배지역 토양수분 함량 추정:** 강원도 평창 지역의 옥수수 재배지에 대한 토양특성 자료, 기상관측 자료, 옥수수 생육특성 정보 등을 SWAP 모형에 적용해 토양수분 함량의 변동을 추정했다. 강수량이 적었던 기간인 4월 1일부터 6월 15일까지 토양수분 함량이 $0.287\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 에서 $0.213\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 으로 감소해 토양수분 함량의 감소가 그렇게 크지 않았지만 이는 1월 약 $0.4\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 에서 지속적으로 감소한 탓에 큰 감소가 없었던 것으로 분석되었다. 또한 경상북도 영주 지역의 콩 재배지에 대한 생육시기별 토양수분 함량의 변동을 추정했다. 콩 개화기와 꼬투리 형성기를 포함하는 G-3(생육중기) 단계와 G-4(생육후기) 단계에 강수량 부족으로 토양수분 함량이 $0.08\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 까지 감소하는 것으로 추정되었고 통계청 콩 생산량 자료에서도 경북지역의 콩 수확량이 평년대비 약 11% 감소한 것으로 나타났다.
- ▶ **밭작물 재배지역 작물 소비수량 추정:** 작물의 소비수량은 작물의 실제 증발산량과 같다고 보고 작물의 생육단계별 소비수량 추정을 위해 작물의 생육단계별 실제 증발산량을 추정했으며 작물의 실제 증발산량은 기준작물의 잠재증발산

량(ET_0)에 작물계수(K_c)를 곱해 산정했다. 옥수수의 경우 G-2와 G-3 단계에서 각각 133.8mm, 133.0mm의 소비수량이 발생하는 것으로 추정되었으나 실제 강수량은 각각 8.8mm, 27.8mm에 그쳐 관개를 통한 물 공급이 필요한 것으로 판단되었다. 콩의 경우 G-1 단계에서 68.9mm의 소비수량이 발생하는 것으로 추정되었으나 실제 강수량은 2.0mm에 그쳐 생육초기 관개를 통한 물 공급이 필요한 것으로 판단되었다.

연구결과 활용 계획

아태지역 개도국 및 태평양 도서국의 경우 농업이 주요 산업인 나라가 많으며 관개 시설 부족으로 인해 아직까지 천수농경지에서 강수량에 의존한 채 작물을 생산하고 있는 지역이 상당하다. 농업 관개시설이 정비되어 있다하더라도 농경지에 공급할 수 있는 물량이 충분하지 않은 상황이라면 작물의 현재 생육상태와 토양의 수분상태 파악을 통해 적시에 적량의 물을 공급할 수 있도록 도움을 줄 수 있는 기술 개발이 무엇보다 중요할 것이다. 본 연구에서 개발된 토양수분 함량 추정 기법 및 작물 소비수량 추정 기법은 아태지역 개도국 또는 태평양 도서국의 농업 분야에 효율적인 물 관리 방안을 제시하는데 있어 그 활용 가능성이 크다고 볼 수 있다. 연구결과의 활용성 확대를 위해 본 연구의 후속 사업인 태평양 도서국의 통가 왕국을 대상으로 한 통가 농업지역에 대한 가뭄피해 경감을 위한 스마트 물관리 시스템 구축 연구 사업을 계획하고 있다. 최근 기후변화와 함께 엘니뇨와 같은 이상기후 현상의 빈번한 출현은 통가 내 작물 생산에도 큰 영향을 미치고 있는 실정이며 특히 가뭄 발생으로 인한 작물 생산량 감소는 농가 소득에 직접적인 문제가 되고 있다. 통가지역의 가뭄으로 인한 작물 생산량 감소 피해를 최소화하기 위한 방안으로 효율적인 농경지 물관리 기술 개발이 요구되고 있는 상황이므로 후속 연구에서는 통가 주요 식량작물인 타로와 얀의 재배지역에 대해 작물 생육단계별 토양수분 함량 추정 기법과 작물 생육단계별 소비수량 추정 기법을 적용하고자 한다. 연구지원 사업에서는 토양수분 함량과 소비수량 추정 기법을 적용하기에 앞서 통가 농업지역의 토양 특성 정보 및 기상 관측 자료 수집과 토양수분 함량 측정센서 설치를 통한 작물 생육단계별 토양수분 함량 관측 자료 수집을 계획하고 있다. 통가 농업지역의 다양한 토양에 대한 수리학적 매개변수가

추정되고 토양수분 함량 추정 기법 적용을 통해 작물 생육단계별 토양수분 함량 변동이 추정된다면 통가 전 지역에 대한 농경지 토양 수분상태를 지속적으로 파악할 수 있게 되어 시의적절한 물 관리 방법 제시를 통해 작물의 물스트레스 상황을 회피하고 보다 안정적인 작물 생산량 확보에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

기상 관측지점의 기상관측 자료 및 토양수분 자료 그리고 토양통 자료는 농촌진흥청 국립농업과학원으로부터 제공받아 사용했고 해남KoFlux 관측자료는 기상청, 한국연구재단의 A3 프로그램의 지원을 받아 구축된 KoFlux의 데이터베이스를 사용하였다. 도움을 주신 모든 분들께 진심으로 감사의 말씀을 전한다.

REFERENCE

- 남원호, 홍은미, 장민원, 최진용, 2014. 토양수분모형을 이용한 미래 주요 발작물 소비수량 및 관개용수량 전망, 한국농공학회논문집, Vol. 56(5), 77-87 pp.
- 농촌진흥청 농업과학기술원, 2007. 농업용수의 효율적 이용을 위한 발작물 물 관리 기술
- 배덕호, 손경환, 김현애, 2013. 수문기상 정보에 따른 국내 가뭄판단 기준 제시 및 평가, 한국수자원학회논문집, Vol.46(3), 289-300 pp.
- 서명철, 허승오, 손연규, 조현숙, 전원태, 김민경, 김민태, 2012. 일별 기상자료를 이용한 농경지 물 수지 및 토양수분 예측모형 (AFKAE0.5) 개발, 한국토양비료학회지, Vol.45(6), 1203-1210 pp.
- 서영재, 이광야, 2002. 발용수량 산정방법, 한국농공학회논문집, Vol. 44(1), 25-34 pp.
- 엄기철, 오동식, 송관철, 조안상, 서동욱, 1999. 발작물 물 관리 지침서, 농촌진흥청 농업과학기술원, 65권.
- 엄기철, 하상건, 허승오, 정영상, 유관식, 2009. 토양수, 한국토양비료학회지, Vol. 42(별호), 102-125 pp.
- 엄기철, 정필균, 최성호, 김태완, 유성녕, 박소현, 손연규, 2010. 노지재배 고추의 생육시기별 물 요구량 구명, 한국토양비료학회지, Vol. 43(6), 844-847 pp.
- 엄기철, 박소현, 유성녕, 2012. 노지재배 감자의 생육시기별 물 요구량 구명, 한국토양비료학회지, Vol. 45(6), 861-866 pp.
- 엄기철, 박소현, 유성녕, 2013. 노지재배 옥수수의 생육시기별 물 요구량 구명, 한국토양비료학회지, Vol. 46(1), 16-22 pp.
- 장태일, 성종현, 박승우, 2009. 농업용수 재이용에 따른 토양염분 추저를 위한 SWAP 모형의 보정과 검증, 한국수자원학회 2009년도 학술발표회 초록집, 608-612 pp.
- 장태일, 2009. 하수처리수의 농업용수재이용에 따른 논에서의 환경영향 분석, 서울대학교 공학박사학위 논문.
- 최진용, 정하우, 1995. 토양수분이동모형 SWATRER의 적용성 분석, 한국농공학회논문집, Vol. 37(6), 82-91 pp.
- 허승오, 정강호, 박찬원, 하상건, 김정규, 2006. 장력 침투계(Disk Tension Infiltrometer)와 van Genuchten-Mualem 모형 적용에 따른 불포화수리 전도도의 비교 해석, 한국토양비료학회지, Vol.39(5), 259-267 pp.
- Allen, R.G., L.S., Pereira and M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper No 56, FAO, Rome, Italy.

- Carlos, A.A., Robert J.L., Leo S. 2012. Test of the ROSETTA pedotransfer function for saturated hydraulic conductivity. *Open Journal of Soil Science* 2: 203-212.
- Doorenbos, J. and A.H. Kassam, 1979. Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper No 33*, FAO, Rome, Italy.
- Droogers, P., M., Torabi, M., Akbari and E., Pazira, 2001. Field-scale modeling to explore salinity problems in irrigated agriculture. *Irrig. Drain.* 50, 77-90.
- Hou, Z., S., Feng, X., Dai, Y., Zheng and Y., Wang, 2012. Simulation of hydrology following various volumes of irrigation to soil with different depths to the water table. *Soil Use Manage.* 28, 229-239.
- Kroes, J.C., J., van Dam, J., Huygen and R.W., Vervoort, 2002. User's guide of SWAP, version 2.0. Report 81, Wageningen University, 138.
- Ma, Y., S.Y., Feng, Z.L., Huo and X.F., Song, 2011. Application of the SWAP model to simulate the field water cycle under deficit irrigation in Beijing, China. *Math. Compu. Model.* 54, 1044-1052.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research.* 12: 513-522.
- Romano N, Brunone B, Santini A. 1998. Numerical analysis of one-dimensional unsaturated flow in layered soils. *Advances in Water Resources* 21: 315-324.
- Sarwar, A., W.G.M., Bastiaanssen, Th.M., Boers and J.C., van Dam, 2000. Evaluating drainage design parameters for the fourth drainage project, Pakistan by using SWAP model: Part I-calibration. *Irrig. Drain. Syst.* 14, 257-280.
- Schaap, M. G., Leij, F. J. and M. Th. van Genuchten, 1999, A bootstrap-neural network approach to predict soil hydraulic parameters. In: Van Genuchten, M.Th., F.J. Leij, and L. Wu (Eds), *Proc. Int. Workshop, Characterization and Measurements of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*, pp 1237-1250, University of California, Riverside, CA.
- 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 SWAT version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil. Water. Air. Plant environment.* Technical Doc. 45. Alterra, Wageningen, the Netherlands.
- _____, P. Groenendijk, R. F. A. Hendriks, and J. P. Kroes, 2008, *Advances of Modeling Water Flow in Variably Saturated Soils with SWAP*, *Vadose Zone Journal* 7: 640-653.
- van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.

- _____., F.J., Leij and S.R., Yates, 1991. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. Salinity Laboratory, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Riverside, California, USA.

부 록

1. 토양 수리학적 매개변수

부록 1.1 기상 관측지점 토양 수리학적 매개변수

ID	지점명	토양 수리학적 매개변수						
		θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	K_s (cm/day)	K_o (cm/day)	L
ASSR	안산상록	0.042	0.386	0.032	1.407	41.4	17.749	-1.102
ASYC	아산염치	0.052	0.393	0.014	1.449	17.3	5.774	-0.520
BHSP	봉화석포	0.035	0.390	0.037	1.434	57.3	24.815	-1.053
BSGS	부산강서	0.039	0.386	0.040	1.507	63.9	27.552	-1.034
BYGA	부여규암	0.037	0.388	0.039	1.467	59.1	26.630	-1.060
CGYM	칠곡약목	0.037	0.387	0.040	1.505	65.2	28.775	-1.028
CJNI	청주남일	0.042	0.385	0.040	1.814	120.2	33.579	-0.871
ESSI	음성소이	0.035	0.389	0.041	1.501	67.5	30.661	-1.021
GCGC	거창거창	0.039	0.387	0.043	1.788	116.1	37.807	-0.872
GMSS	구미선산	0.044	0.382	0.038	1.914	141.7	30.493	-0.856
GRDM	계룡두마	0.042	0.384	0.040	1.804	118.1	32.942	-0.875
GRGR	구례구례	0.052	0.395	0.011	1.485	14.5	4.235	-0.275
GSGS	금산금성	0.037	0.389	0.043	1.611	85.0	35.393	-0.943
GSJI	경산자인	0.088	0.464	0.010	1.462	12.4	2.380	-0.318
GYGS	고양구산	0.034	0.391	0.034	1.420	54.5	22.119	-1.030
HDJR	하동적량	0.049	0.392	0.014	1.455	19.2	5.874	-0.466
HPHG	함평학교	0.047	0.391	0.014	1.460	21.2	5.973	-0.417
HSGG	황성공근	0.035	0.390	0.038	1.448	59.8	26.501	-1.052
IJJJ	인제인제	0.032	0.393	0.039	1.450	65.0	28.568	-1.034
JAJA	장수장수	0.049	0.386	0.028	1.387	30.0	13.173	-1.136
JCBY	제천봉양	0.044	0.385	0.040	2.866	433.7	34.133	-0.858
JDGN	진도군내	0.057	0.401	0.008	1.528	14.0	2.882	-0.066
JEJE	정선정선	0.041	0.387	0.042	2.404	265.1	38.129	-0.830
JHJH	장흥장흥	0.037	0.388	0.042	1.539	72.3	31.756	-0.994
JIJI	진안진안	0.043	0.384	0.040	2.087	181.4	33.846	-0.835

부록 1.1 (계속)기상 관측지점 토양 수리학적 매개변수

ID	지점명	토양 수리학적 매개변수						
		θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	K_s (cm/day)	K_o (cm/day)	L
JJCJ	진주초전	0.059	0.420	0.005	1.665	22.5	1.610	0.408
JSJS	장성장성	0.042	0.387	0.026	1.403	35.6	13.528	-0.966
JWJW	정읍정우	0.035	0.389	0.037	1.441	56.9	25.128	-1.062
MAHG	무안현경	0.056	0.396	0.012	1.466	12.8	4.526	-0.412
MGHD	문경흥덕	0.035	0.390	0.041	1.482	65.1	29.681	-1.034
MJMJ	무주무주	0.051	0.377	0.033	1.765	106.5	20.777	-0.907
MYSN	밀양상남	0.040	0.387	0.032	1.410	43.1	18.365	-1.089
OCOC	옥천옥천	0.042	0.385	0.041	2.048	171.1	36.497	-0.835
PCJB	평창진부	0.027	0.403	0.040	1.443	81.4	32.519	-0.975
PCWG	평창운교	0.049	0.403	0.006	1.591	27.5	2.470	0.247
PHBG	포항북구	0.054	0.387	0.025	1.379	23.3	10.863	-1.139
SCYH	사천용현	0.060	0.402	0.010	1.492	10.4	3.438	-0.264
SJCS	상주초산	0.048	0.386	0.028	1.389	30.8	13.408	-1.125
SJDG	성주대가	0.047	0.381	0.037	2.650	363.0	27.832	-0.859
SWSD	수원서둔	0.038	0.387	0.041	1.546	71.7	30.445	-0.995
TATA	태안태안	0.034	0.393	0.027	1.413	51.9	16.824	-0.869
TBGN	태백귀네	0.072	0.430	0.006	1.572	13.7	1.799	0.086
TYGD	통영광도	0.047	0.392	0.013	1.472	20.3	5.391	-0.331
WJMH	울진매화	0.039	0.387	0.042	1.664	92.4	34.156	-0.920
WSBD	화성봉담	0.034	0.401	0.015	1.462	43.6	8.584	-0.291
WSHC	화순한천	0.049	0.399	0.008	1.554	21.7	2.954	0.100
YADJ	영암덕진	0.048	0.389	0.021	1.409	25.4	9.480	-0.855
YCOM	영천오미	0.049	0.392	0.015	1.451	19.7	6.120	-0.495
YCYC	예천예천	0.046	0.383	0.038	2.882	449.7	30.508	-0.868
YDBG	영덕병곡	0.043	0.386	0.029	1.400	37.4	15.415	-1.061
YDSC	영동삼천	0.038	0.388	0.043	1.658	92.5	35.964	-0.919
YJAJ	영주안정	0.037	0.388	0.043	1.656	92.6	36.683	-0.919
YSJS	여수주삼	0.054	0.395	0.013	1.466	13.8	4.722	-0.413
YSSA	예산신암	0.064	0.408	0.010	1.493	9.6	3.136	-0.259
YWWV	영월영월	0.038	0.388	0.043	1.724	104.5	37.726	-0.891

부록 1.2 주로 밭 지역으로 이용되는 토양통의 토양 수리학적 매개변수

(제주도 및 울릉도 토양은 대부분 토성보다 유기물 함량에 의해 수리학적 특성이 달라지므로 이용시 주의 요함: 화색으로 표시)

토양통	토양 수리학적 매개변수						
	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	K_s (cm/day)	K_o (cm/day)	L
가파	0.045	0.385	0.053	1.483	93.4	35.973	-1.300
각화	0.055	0.457	0.025	1.340	35.2	13.567	-0.983
갈곡	0.023	0.319	0.050	1.447	58.4	33.673	-1.251
갈전	0.049	0.427	0.008	1.446	35.7	3.089	0.194
감곡	0.038	0.407	0.010	1.421	25.3	4.533	0.027
강정	0.059	0.433	0.013	1.350	44.6	4.952	-0.542
고평	0.092	0.485	0.009	1.492	14.4	2.276	-0.210
고흥	0.065	0.480	0.011	1.351	55.1	3.978	-0.216
공성	0.065	0.469	0.010	1.396	19.0	3.739	-0.121
과천	0.023	0.322	0.025	1.349	23.0	13.489	-1.111
광산	0.055	0.462	0.009	1.429	22.4	3.917	0.119
광주	0.083	0.531	0.009	1.394	52.3	3.016	-0.042
구엄	0.053	0.449	0.005	1.574	45.4	1.899	0.642
낙동	0.023	0.335	0.051	1.453	87.8	35.645	-1.224
남곡	0.032	0.390	0.023	1.372	23.5	13.083	-0.824
남원	0.170	0.618	0.000	2.678	3.9	0.633	-0.763
녹전	0.033	0.387	0.021	1.358	37.5	11.315	-0.803
뇌곡	0.019	0.318	0.020	1.369	22.9	11.285	-0.831
다인	0.033	0.330	0.053	1.521	101.9	35.523	-1.240
단복	0.038	0.332	0.045	2.116	128.9	40.512	-0.890
대곡	0.048	0.424	0.004	1.577	19.3	1.675	0.659
대흘	0.026	0.349	0.048	1.417	65.5	31.132	-1.284
대흥	0.043	0.427	0.010	1.440	19.6	4.457	0.098
덕계	0.027	0.316	0.049	1.441	58.7	31.168	-1.303
덕천	0.023	0.356	0.015	1.382	29.9	8.216	-0.467
도계	0.057	0.442	0.003	1.784	32.8	1.075	0.875
도동	0.066	0.466	0.002	1.747	24.7	0.974	0.873
도전	0.046	0.424	0.006	1.526	36.1	2.240	0.517
도천	0.025	0.359	0.024	1.362	39.1	13.579	-0.925
동귀	0.054	0.426	0.006	1.508	22.7	1.982	0.397
동흥	0.086	0.503	0.006	1.583	34.9	1.964	0.168
마지	0.035	0.385	0.007	1.483	19.7	3.142	0.256
명지	0.027	0.337	0.056	1.595	163.0	46.175	-1.081
무릉	0.041	0.420	0.022	1.368	23.2	12.212	-0.760

부록 1.2 (계속1) 주로 밭 지역으로 이용되는 토양통의 토양 수리학적 매개변수

토양통	토양 수리학적 매개변수						
	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	K_s (cm/day)	K_o (cm/day)	L
무이	0.048	0.435	0.004	1.594	27.8	1.603	0.780
미탄	0.047	0.343	0.009	1.305	2.5	2.677	-0.581
반곡	0.081	0.522	0.006	1.461	29.2	1.861	0.387
반산	0.032	0.386	0.011	1.425	21.6	5.395	-0.100
반천	0.080	0.514	0.007	1.446	39.9	2.050	0.276
반호	0.050	0.418	0.004	1.593	21.9	1.581	0.607
백산	0.031	0.388	0.016	1.378	33.7	8.214	-0.463
범평	0.069	0.456	0.002	1.883	27.2	0.849	0.826
본량	0.025	0.372	0.025	1.361	46.2	14.623	-0.899
봉산	0.042	0.393	0.011	1.405	18.4	4.412	-0.187
부곡	0.037	0.408	0.005	1.569	29.9	2.237	0.641
북평	0.024	0.333	0.051	1.456	62.4	34.996	-1.230
사라	0.032	0.389	0.006	1.551	40.8	2.522	0.534
상주	0.023	0.315	0.031	1.352	25.1	16.756	-1.267
석토	0.057	0.413	0.004	1.588	11.2	1.220	0.557
성산	0.034	0.325	0.044	1.337	19.3	20.954	-1.711
수북	0.038	0.379	0.018	1.335	23.3	8.076	-0.826
수암	0.026	0.338	0.038	1.369	40.5	21.561	-1.331
시례	0.041	0.403	0.004	1.606	21.7	1.807	0.636
아라	0.126	0.540	0.001	2.128	3.9	0.408	0.233
악양	0.105	0.509	0.035	1.278	48.5	12.897	-2.193
안덕	0.079	0.497	0.005	1.667	62.9	1.698	0.413
안룡	0.022	0.343	0.030	1.359	38.9	17.307	-1.136
알봉	0.110	0.491	0.001	2.512	6.7	0.455	0.229
애월	0.039	0.410	0.004	1.642	38.9	1.858	0.731
연곡	0.033	0.374	0.011	1.404	22.9	5.299	-0.225
연대	0.030	0.399	0.013	1.391	41.3	6.898	-0.191
영락	0.038	0.380	0.005	1.539	18.0	2.144	0.412
영산	0.055	0.442	0.003	1.704	25.2	1.196	0.856
영일	0.020	0.331	0.020	1.369	28.0	11.092	-0.774
예산	0.048	0.363	0.017	1.423	14.1	6.689	-0.756
오라	0.052	0.435	0.003	1.814	37.0	1.159	0.892
완산	0.058	0.429	0.002	1.738	9.8	0.918	0.844

부록 1.2 (계속2) 주로 밭 지역으로 이용되는 토양통의 토양 수리학적 매개변수

토양통	토양 수리학적 매개변수						
	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	K_s (cm/day)	K_o (cm/day)	L
왕산	0.091	0.498	0.002	1.910	33.4	0.680	0.684
용강	0.038	0.380	0.005	1.539	18.0	2.144	0.412
용계	0.035	0.395	0.004	1.630	17.3	1.754	0.727
용당	0.048	0.426	0.005	1.526	27.2	2.068	0.538
용흥	0.101	0.503	0.033	1.285	36.6	12.210	-2.031
우곡	0.036	0.402	0.013	1.392	29.4	6.614	-0.282
우도	0.096	0.564	0.005	1.481	48.6	1.506	0.383
우평	0.059	0.459	0.004	1.633	31.8	1.467	0.737
운곡	0.059	0.438	0.005	1.529	24.3	1.702	0.483
운교	0.122	0.565	0.001	2.068	42.7	0.596	0.280
운봉	0.058	0.457	0.002	1.895	24.6	0.933	1.012
원곡	0.028	0.362	0.019	1.370	28.0	9.861	-0.719
월령	0.052	0.410	0.041	1.356	59.7	22.604	-1.476
월산	0.063	0.437	0.002	1.874	18.4	0.804	0.865
위미	0.230	0.654	0.000	3.827	0.8	3.973	-1.154
유원	0.060	0.440	0.002	2.088	30.0	0.799	0.892
유천	0.040	0.394	0.003	1.677	29.3	1.449	0.727
이도	0.058	0.451	0.003	1.681	39.3	1.333	0.783
이목	0.024	0.358	0.010	1.451	25.6	4.784	0.003
이원	0.028	0.337	0.008	1.453	18.5	3.281	0.023
이현	0.073	0.461	0.002	1.976	26.3	0.775	0.798
인성	0.078	0.519	0.006	1.466	55.5	2.016	0.375
일평	0.032	0.453	0.024	1.324	135.4	17.090	-0.787
임동	0.031	0.316	0.025	1.357	16.6	11.857	-1.194
임자	0.035	0.344	0.042	1.415	32.9	23.483	-1.323
입석	0.036	0.260	0.049	1.857	35.1	41.322	-1.000
장파	0.064	0.478	0.009	1.422	17.9	3.514	0.039
장호	0.078	0.468	0.006	1.625	35.4	1.796	0.216
저동	0.063	0.428	0.004	1.468	7.3	1.220	0.495
전남	0.046	0.441	0.006	1.507	26.4	2.788	0.500
제주	0.084	0.512	0.006	1.626	39.7	1.897	0.319

부록 1.2 (계속3) 주로 밭 지역으로 이용되는 토양통의 토양 수리학적 매개변수

토양통	토양 수리학적 매개변수						
	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	K_s (cm/day)	K_o (cm/day)	L
제천	0.050	0.412	0.008	1.413	41.7	3.048	0.013
주곡	0.025	0.379	0.053	1.438	120.1	41.314	-1.206
주천	0.023	0.344	0.023	1.366	37.0	12.839	-0.898
죽암	0.047	0.427	0.005	1.525	23.0	2.140	0.534
중동	0.026	0.334	0.032	1.351	31.3	17.141	-1.278
지곡	0.059	0.458	0.019	1.313	43.3	8.384	-0.893
진곡	0.055	0.455	0.003	1.696	23.2	1.449	0.822
진천	0.044	0.407	0.038	1.376	49.5	23.430	-1.285
창곡	0.028	0.355	0.033	1.361	43.5	18.989	-1.234
창평	0.059	0.463	0.010	1.423	17.6	3.817	0.027
청풍	0.056	0.466	0.009	1.445	21.8	3.516	0.222
초정	0.056	0.388	0.006	1.619	20.1	2.121	0.092
추계	0.026	0.406	0.031	1.364	76.0	21.714	-0.971
춘도	0.052	0.451	0.023	1.343	34.3	12.834	-0.919
토계	0.025	0.308	0.050	1.448	58.9	32.425	-1.287
평안	0.093	0.490	0.011	1.449	20.9	2.985	-0.425
평전	0.040	0.444	0.011	1.425	35.1	5.624	0.118
평창	0.067	0.471	0.016	1.342	26.1	6.058	-0.655
포곡	0.035	0.376	0.012	1.401	20.7	5.513	-0.287
풍천	0.033	0.328	0.029	1.335	19.2	13.216	-1.376
하모	0.072	0.432	0.001	2.039	3.8	0.408	0.856
하사	0.028	0.336	0.056	1.999	593.5	63.289	-0.860
하원	0.066	0.496	0.003	1.819	42.0	1.138	0.920
호계	0.038	0.419	0.006	1.507	47.0	2.878	0.496
홍문	0.028	0.334	0.023	1.329	18.7	11.220	-1.143
홍천	0.029	0.381	0.029	1.344	51.8	17.217	-1.130
화봉	0.025	0.314	0.054	1.537	87.3	40.724	-1.152
화순	0.060	0.450	0.010	1.383	47.4	3.716	-0.152
황룡	0.028	0.313	0.054	1.544	95.2	39.469	-1.172
흑석	0.042	0.404	0.006	1.509	27.4	2.365	0.422

부록 1.3 주로 논 지역으로 이용되는 토양통의 토양 수리학적 매개변수

토양통	토양 수리학적 매개변수						
	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	K_s (cm/day)	K_o (cm/day)	L
가곡	0.092	0.518	0.005	1.420	34.7	1.361	0.265
가천	0.026	0.377	0.010	1.430	32.3	4.990	0.038
가포	0.071	0.471	0.002	1.927	24.4	0.763	0.895
감천	0.042	0.423	0.003	1.779	23.1	1.200	1.005
강동	0.052	0.448	0.003	1.725	31.9	1.196	0.962
강서	0.044	0.392	0.002	2.011	14.4	0.801	0.895
강진	0.092	0.523	0.002	1.982	53.8	0.772	0.651
경산	0.081	0.491	0.004	1.512	29.3	1.186	0.520
고령	0.103	0.511	0.001	2.056	17.9	0.538	0.540
고천	0.039	0.396	0.002	1.841	19.7	1.018	0.951
공덕	0.091	0.523	0.003	1.693	41.4	0.912	0.672
광포	0.041	0.429	0.025	1.332	66.3	14.689	-0.981
광활	0.021	0.318	0.017	1.378	29.2	8.925	-0.680
구곡	0.071	0.496	0.006	1.458	41.7	2.109	0.390
구포	0.036	0.406	0.026	1.352	53.8	14.961	-0.976
규암	0.091	0.480	0.001	2.365	17.7	0.571	0.527
극락	0.082	0.468	0.001	2.539	20.8	0.615	0.533
금곡	0.042	0.339	0.023	1.352	11.2	9.267	-1.191
금서	0.094	0.525	0.013	1.263	41.1	3.231	-1.039
금지	0.034	0.412	0.007	1.475	48.4	3.286	0.448
금진	0.023	0.330	0.045	1.412	135.6	28.768	-1.264
금천	0.022	0.306	0.036	1.365	31.6	20.613	-1.337
김제	0.143	0.572	0.001	2.437	11.9	0.496	-0.168
김해	0.108	0.574	0.013	1.243	46.7	3.387	-1.368
낙천	0.037	0.392	0.032	1.326	55.2	17.787	-1.351
남계	0.042	0.400	0.033	1.497	73.3	22.063	-0.924
남평	0.063	0.442	0.002	1.934	25.8	0.837	0.860
다평	0.045	0.422	0.006	1.510	19.3	2.349	0.480
달동	0.097	0.494	0.001	2.220	20.6	0.579	0.520

부록 1.3 (계속1) 주로 논 지역으로 이용되는 토양통의 토양 수리학적 매개변수

토양통	토양 수리학적 매개변수						
	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	K_s (cm/day)	K_o (cm/day)	L
대원	0.075	0.495	0.005	1.475	38.2	1.376	0.592
대정	0.096	0.538	0.011	1.449	55.2	3.586	-0.359
덕곡	0.057	0.462	0.004	1.611	36.0	1.476	0.820
덕평	0.072	0.472	0.004	1.605	32.0	1.245	0.616
덕하	0.064	0.457	0.003	1.701	27.2	1.122	0.788
도곡	0.087	0.478	0.019	1.258	47.9	5.517	-1.610
동송	0.090	0.520	0.004	1.546	25.3	1.166	0.509
동암	0.035	0.352	0.041	1.374	40.6	22.026	-1.419
동호	0.024	0.368	0.015	1.388	35.4	8.355	-0.405
등구	0.108	0.554	0.020	1.216	38.2	5.339	-2.273
마곡	0.043	0.382	0.053	1.489	102.3	37.039	-1.275
마령	0.043	0.363	0.014	1.469	21.8	6.054	-0.503
만경	0.029	0.381	0.007	1.503	43.0	3.503	0.293
만성	0.064	0.428	0.001	2.127	14.5	0.636	0.841
매곡	0.040	0.394	0.030	1.465	62.9	18.824	-0.916
문경	0.092	0.533	0.004	1.510	61.8	1.205	0.500
문포	0.021	0.326	0.023	1.367	31.3	13.023	-0.947
물금	0.072	0.463	0.003	1.594	34.1	1.083	0.635
미원	0.074	0.465	0.005	1.678	49.3	1.638	0.373
방곡	0.082	0.464	0.002	1.631	12.1	0.739	0.672
방기	0.074	0.481	0.002	1.911	29.1	0.771	0.880
백구	0.069	0.464	0.002	1.805	22.6	0.899	0.841
백수	0.024	0.333	0.053	1.489	142.6	38.968	-1.185
복내	0.070	0.474	0.015	1.306	41.5	5.110	-0.745
복천	0.052	0.440	0.003	1.703	42.2	1.428	0.817
봉곡	0.060	0.447	0.002	1.880	41.7	0.885	0.936
봉남	0.103	0.545	0.003	1.553	34.9	0.820	0.568
봉림	0.105	0.628	0.008	1.210	20.5	2.170	-1.088
부용	0.068	0.472	0.002	1.906	29.2	0.914	0.877

부록 1.3 (계속2) 주로 논 지역으로 이용되는 토양통의 토양 수리학적 매개변수

토양통	토양 수리학적 매개변수						
	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	K_s (cm/day)	K_o (cm/day)	L
바곡	0.059	0.469	0.003	1.658	38.4	1.351	0.853
사두	0.030	0.357	0.027	1.341	30.9	14.130	-1.175
사촌	0.072	0.479	0.002	1.869	26.5	0.833	0.883
산계	0.029	0.412	0.023	1.347	68.8	14.427	-0.773
삼암	0.043	0.406	0.003	1.696	20.4	1.316	0.806
서탄	0.051	0.461	0.009	1.444	32.8	3.922	0.216
석계	0.050	0.413	0.018	1.464	46.9	8.555	-0.549
석천	0.080	0.475	0.002	1.914	31.6	0.738	0.768
수계	0.101	0.542	0.004	1.471	31.8	0.990	0.444
승주	0.071	0.445	0.001	1.989	22.2	0.672	0.819
신탐	0.020	0.301	0.046	1.424	69.8	30.616	-1.257
신평	0.092	0.514	0.010	1.485	39.6	2.877	-0.212
신흥	0.080	0.447	0.001	2.326	11.5	0.543	0.629
심천	0.040	0.403	0.005	1.565	24.0	2.040	0.577
아곡	0.058	0.456	0.003	1.738	36.7	1.143	0.917
안계	0.037	0.405	0.005	1.540	27.7	2.319	0.568
안미	0.089	0.522	0.006	1.404	51.2	1.722	0.163
압곡	0.049	0.434	0.021	1.455	76.8	11.721	-0.588
양곡	0.040	0.410	0.005	1.575	20.3	1.916	0.675
여수	0.107	0.550	0.003	1.516	28.9	0.817	0.506
연천	0.080	0.507	0.014	1.348	26.7	4.793	-0.558
염포	0.029	0.330	0.056	1.827	305.0	54.914	-0.945
영월	0.049	0.441	0.017	1.346	39.9	8.209	-0.605
예곡	0.058	0.459	0.005	1.540	63.9	1.768	0.625
예천	0.064	0.425	0.002	1.656	9.2	0.742	0.798
오천	0.047	0.409	0.003	1.676	27.8	1.271	0.744
오평	0.050	0.381	0.007	1.603	26.0	2.482	0.078
옥계	0.059	0.443	0.006	1.464	36.3	2.072	0.348
옥동	0.089	0.512	0.008	1.368	43.4	2.116	-0.110

부록 1.3 (계속3) 주로 논 지역으로 이용되는 토양통의 토양 수리학적 매개변수

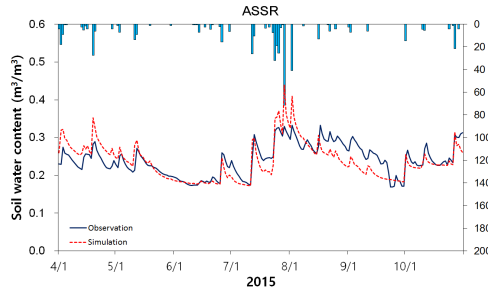
토양통	토양 수리학적 매개변수						
	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	K_s (cm/day)	K_o (cm/day)	L
옥천	0.055	0.425	0.003	1.715	17.8	0.999	0.838
용곡	0.036	0.388	0.041	1.376	80.1	25.824	-1.316
용수	0.094	0.488	0.001	1.774	6.2	0.505	0.768
용지	0.072	0.467	0.002	1.756	24.2	0.917	0.795
용호	0.171	0.621	0.000	3.055	1.6	0.736	-1.298
월곡	0.030	0.378	0.011	1.408	31.7	5.467	-0.144
월평	0.090	0.503	0.003	1.653	33.2	0.854	0.650
유가	0.074	0.497	0.003	1.503	13.8	0.924	0.916
유계	0.100	0.542	0.003	1.666	35.4	0.817	0.631
유곡	0.089	0.517	0.003	1.691	39.2	0.956	0.663
율곡	0.078	0.507	0.005	1.490	62.2	1.615	0.471
율포	0.095	0.513	0.023	1.257	51.9	7.353	-1.827
은곡	0.037	0.411	0.008	1.443	29.4	3.810	0.231
이천	0.109	0.557	0.003	1.476	19.5	0.760	0.529
이호	0.105	0.585	0.016	1.366	63.6	5.705	-0.829
인제	0.071	0.476	0.003	1.570	18.2	0.895	0.867
임곡	0.053	0.447	0.002	1.793	33.4	1.084	0.980
장계	0.026	0.383	0.013	1.396	37.9	7.104	-0.228
장유	0.064	0.476	0.002	1.787	30.1	1.043	0.936
장천	0.024	0.321	0.055	1.562	160.5	44.090	-1.101
전북	0.041	0.423	0.004	1.683	40.5	1.715	0.838
점곡	0.032	0.385	0.017	1.364	34.4	8.907	-0.592
종곡	0.096	0.534	0.006	1.363	36.0	1.480	0.081
죽곡	0.091	0.515	0.010	1.316	38.0	2.651	-0.510
자산	0.088	0.518	0.009	1.275	24.8	2.320	-0.548
진도	0.062	0.443	0.003	1.689	25.4	1.024	0.788
진목	0.036	0.402	0.006	1.540	43.4	2.516	0.536
천부	0.053	0.426	0.006	1.471	18.0	1.987	0.402
천평	0.033	0.426	0.032	1.356	56.9	23.209	-1.034
철원	0.110	0.532	0.001	1.811	9.2	0.480	0.612

부록 1.3 (계속4) 주로 논 지역으로 이용되는 토양통의 토양 수리학적 매개변수

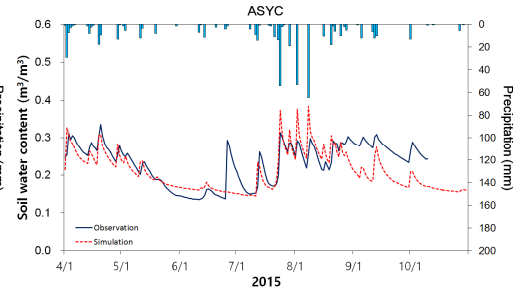
토양통	토양 수리학적 매개변수						
	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	K_s (cm/day)	K_o (cm/day)	L
청계	0.061	0.466	0.006	1.510	28.5	2.056	0.486
청원	0.094	0.544	0.008	1.325	47.9	2.059	-0.178
초계	0.079	0.489	0.002	1.805	25.3	0.867	0.777
춘천	0.031	0.382	0.011	1.394	27.0	5.581	-0.177
춘포	0.092	0.507	0.002	1.907	32.8	0.750	0.659
칠곡	0.046	0.389	0.021	1.446	35.8	10.434	-0.769
칠원	0.050	0.433	0.003	1.689	39.1	1.280	0.858
통천	0.043	0.446	0.004	1.637	40.1	1.646	0.987
특곡	0.091	0.525	0.012	1.325	58.5	3.537	-0.628
파주	0.061	0.479	0.010	1.421	26.5	4.108	0.033
판곡	0.081	0.493	0.003	1.720	31.4	0.916	0.745
평택	0.068	0.455	0.003	1.711	28.9	1.008	0.752
평해	0.043	0.429	0.008	1.446	32.0	3.227	0.331
포두	0.051	0.407	0.005	1.483	25.8	1.863	0.353
포리	0.065	0.452	0.005	1.538	23.1	1.529	0.508
포승	0.052	0.423	0.008	1.425	33.1	2.837	0.115
학곡	0.029	0.357	0.035	1.356	45.7	20.023	-1.307
학산	0.063	0.442	0.002	1.777	18.7	0.877	0.849
학성	0.122	0.537	0.001	2.540	23.2	0.587	0.077
학포	0.040	0.423	0.006	1.503	34.0	2.472	0.595
함창	0.089	0.484	0.002	1.766	19.9	0.672	0.709
함평	0.059	0.439	0.003	1.747	27.7	1.065	0.820
해안	0.095	0.530	0.015	1.279	51.1	4.271	-1.113
해척	0.105	0.575	0.009	1.302	49.2	2.163	-0.442
행곡	0.060	0.453	0.006	1.492	35.8	1.941	0.441
향호	0.037	0.430	0.051	1.434	59.3	46.047	-1.159
호남	0.065	0.465	0.002	2.026	30.7	0.891	0.891
화동	0.071	0.479	0.003	1.667	25.2	1.145	0.739
화수	0.031	0.366	0.006	1.498	21.4	2.682	0.312
회곡	0.062	0.447	0.028	1.329	31.3	13.379	-1.261
효천	0.074	0.472	0.002	1.742	24.1	0.892	0.792
흥평	0.031	0.389	0.015	1.368	33.6	7.692	-0.446

2. 기상 관측지점 시뮬레이션 검증

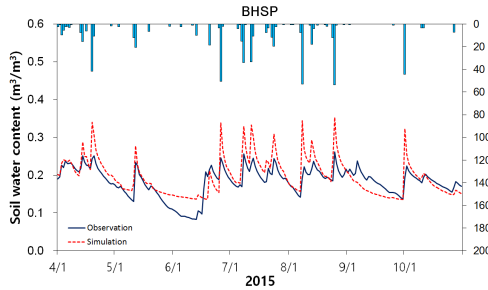
1) ASSR(아산상록)_Sandy Loam



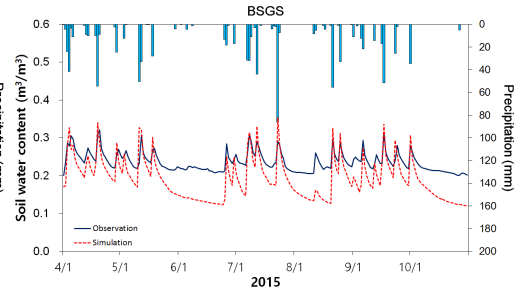
2) ASYC(아산염치)_Loam



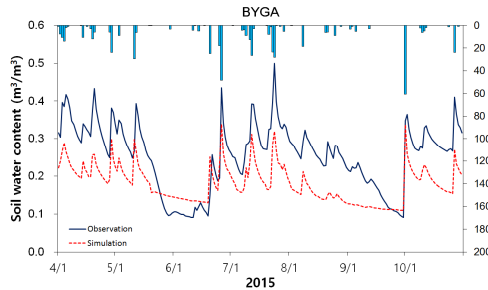
3) BHSP(봉화석포)_Sandy Loam



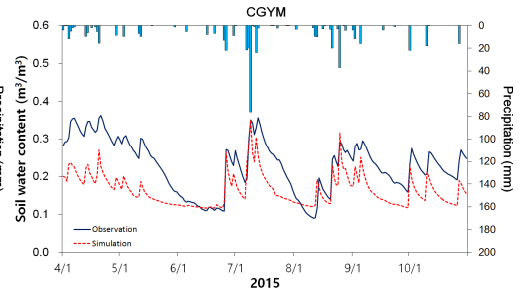
4) BSGS(부산강서)_Sandy Loam



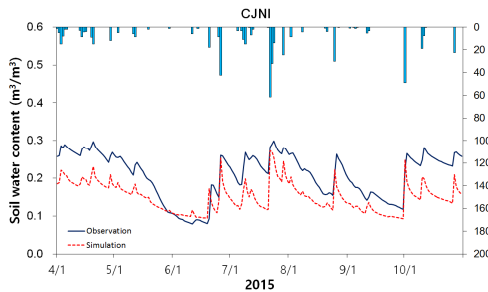
5) BYGA(부여규암)_Sandy Loam



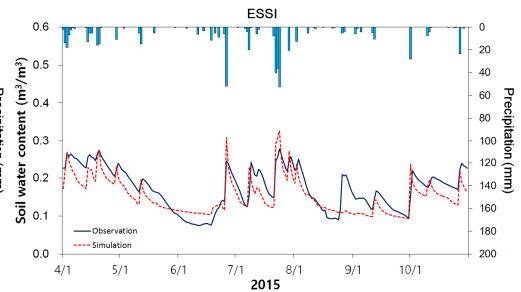
6) CGYM(칠곡약목)_Sandy Loam



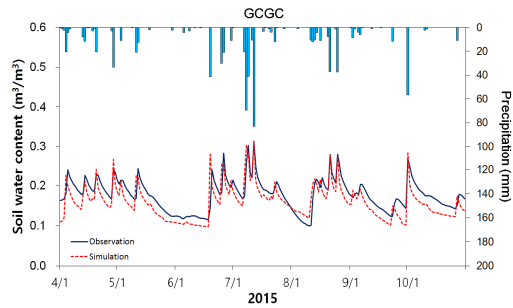
7) CJNI(청주남일)_Loamy Sand



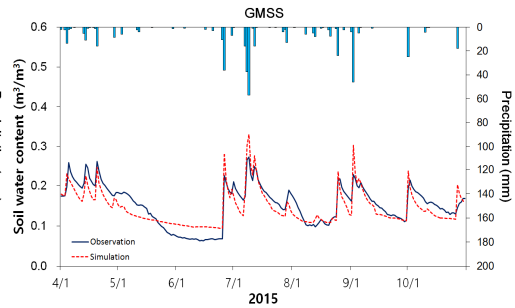
8) ESS1(음성소이)_Sandy Loam



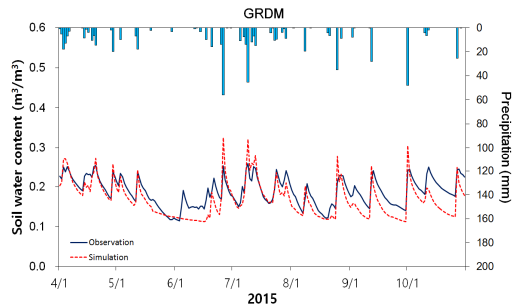
9) GCGC(거창거창)_Loamy Sand



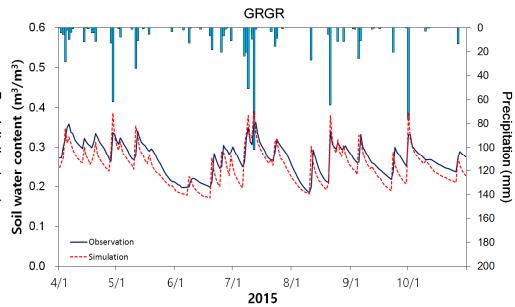
10) GMSS(구마산산)_Loamy Sand



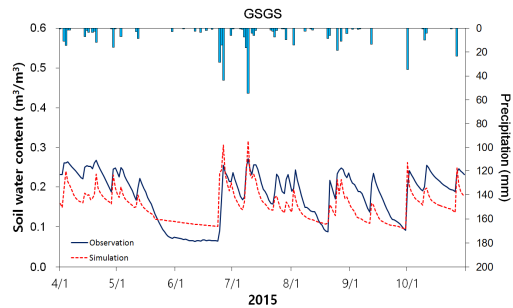
11) GRDM(계룡두마)_Loamy Sand



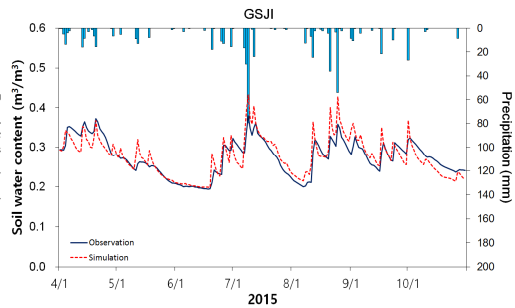
12) GRGR(구례구례)_Loam



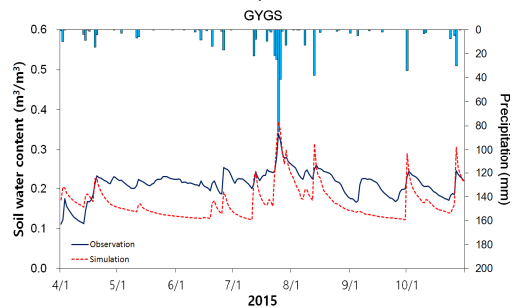
13) GSGS(금산금성)_Loamy Sand



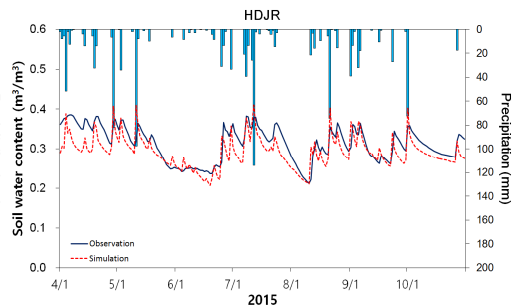
14) GSJI(경산자인)_Silty Clay Loam



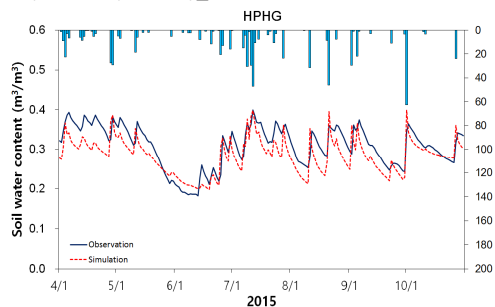
15) GYGS(고양구산)_Sandy Loam



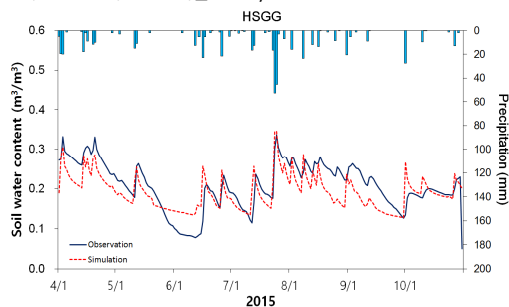
16) HDJR(하동적량)_Loam



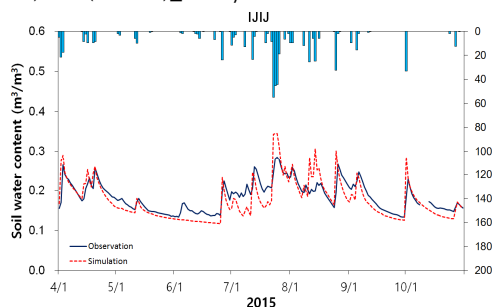
17) HPHG(합평학교)_Loam



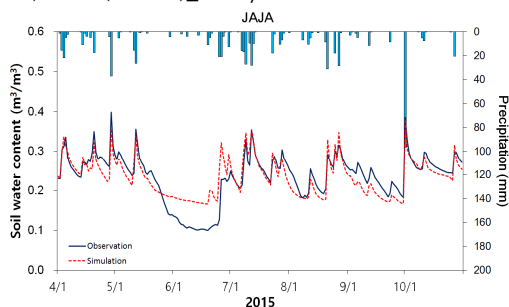
18) HSGG(황성공근)_Sandy Loam



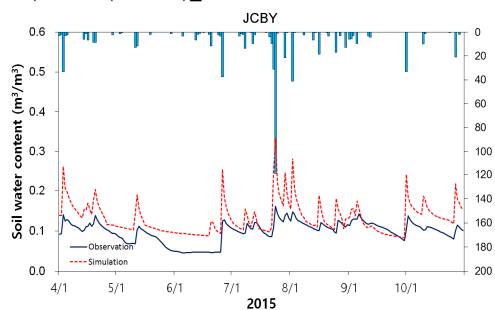
19) IJJ(인제인제)_Sandy Loam



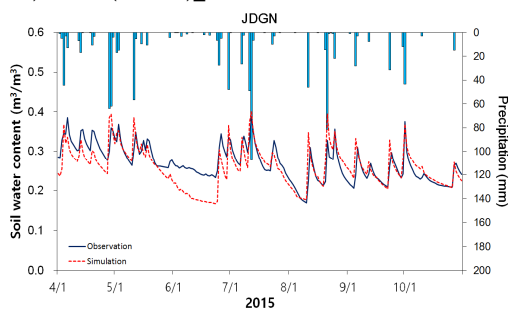
20) JAJA(장수장수)_Sandy Loam



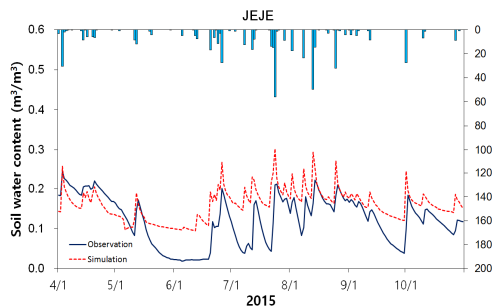
21) JCBY(제천봉양)_Sand



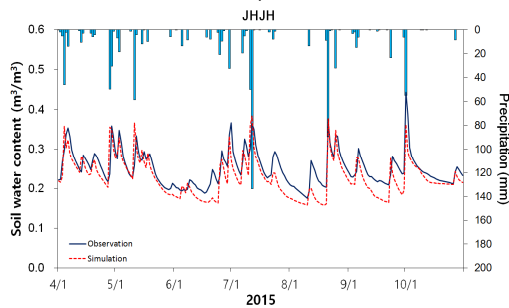
22) JDGN(진도군내)_Loam



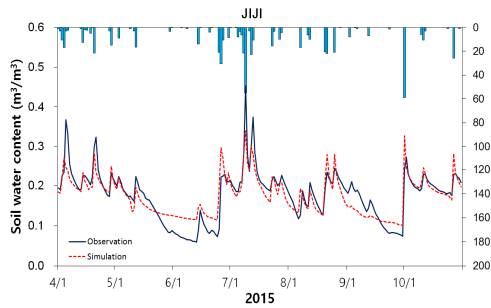
23) JEJE(정선정선)_Sand



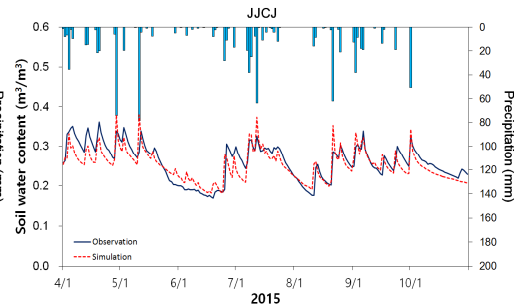
24) JHJH(장흥장흥)_Loamy Sand



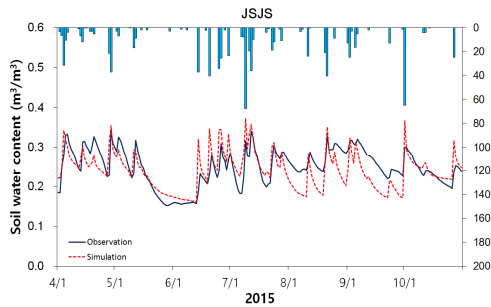
25) JIJ(진안진안)_Loamy Sand



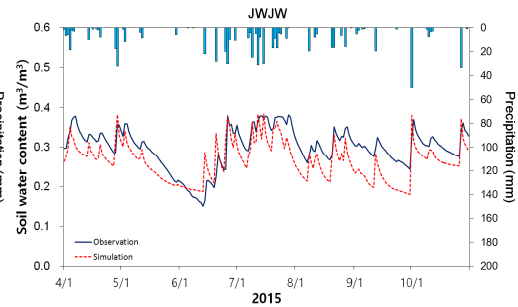
26) JJCJ(진주초전)_Silt Loam



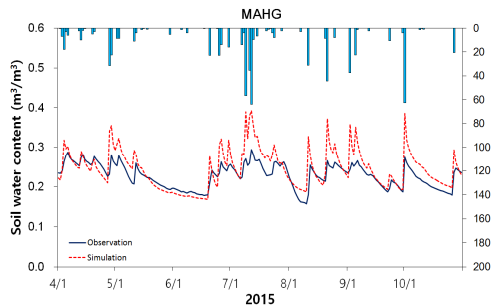
27) JSJS(장성장성)_Sandy Loam



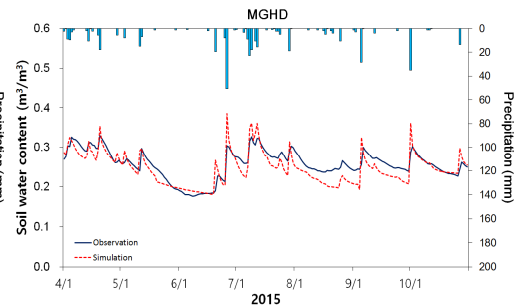
28) JWJW(정읍정우)_Sandy Loam



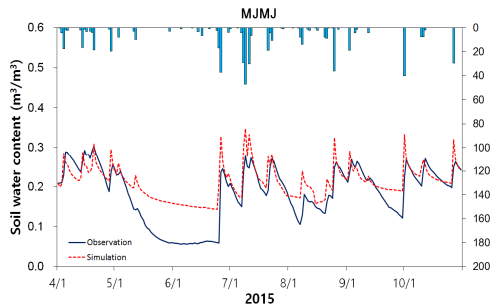
29) MAHG(무안현경)_Loam



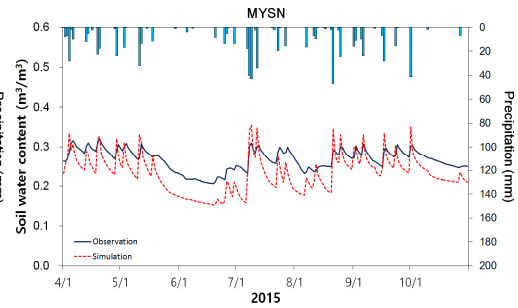
30) MGHD(문경흥덕)_Sandy Loam



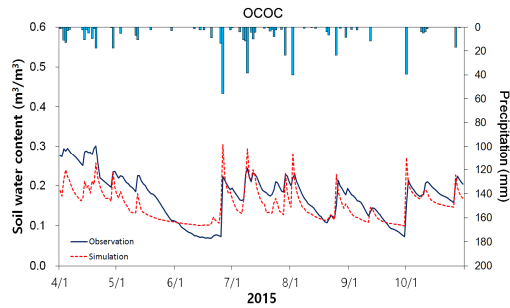
31) MJMJ(무주무주)_Loamy Sand



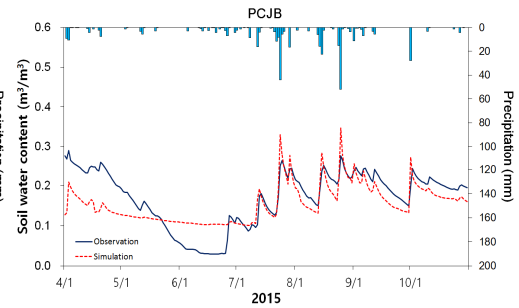
32) MYSN(밀양상남)_Sandy Loam



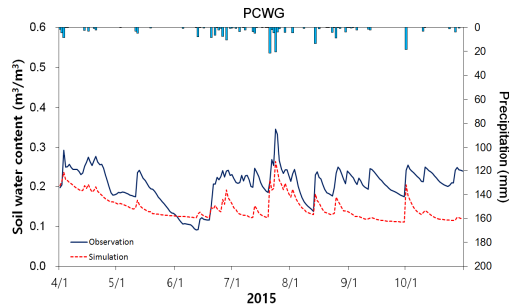
33) OCOC(옥천옥천)_Loamy Sand



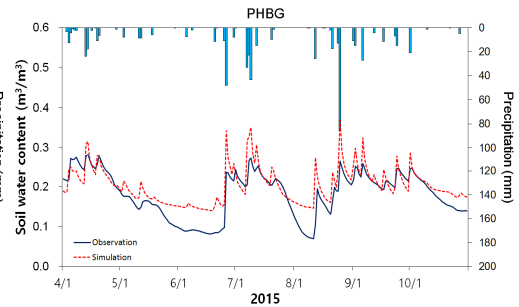
34) PCJB(평창진부)_Sandy Loam



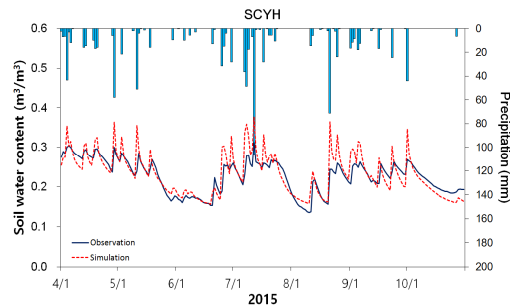
35) PCWG(평창운교)_Loam



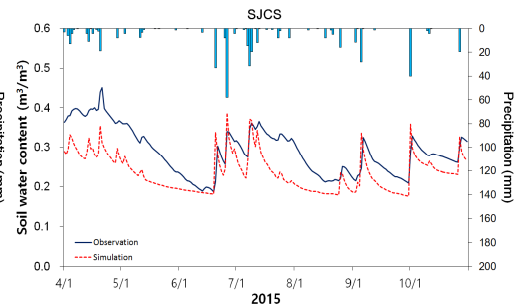
36) PHBG(포항북구)_Sandy Loam



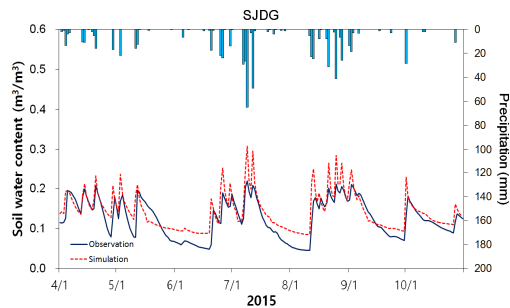
37) SCYH(사천용현)_Loam



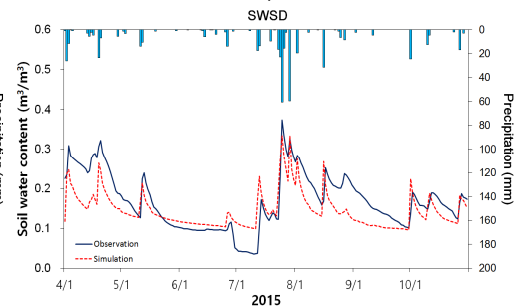
38) SJCS(상주초산)_Sandy Loam



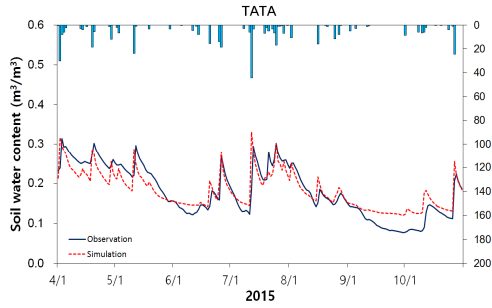
39) SJDG(성주대가)_Sand



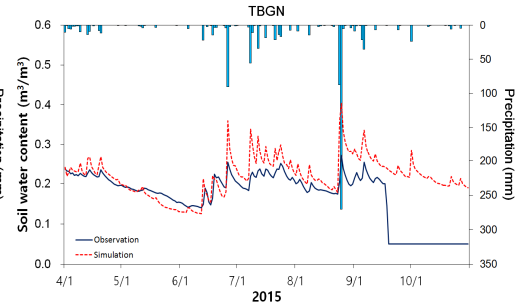
40) SWSD(수원서둔)_Sandy Loam



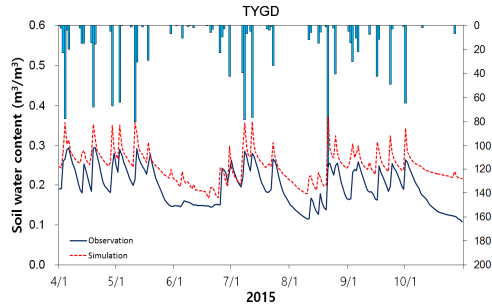
41) TATA(태안태안)_Sandy Loam



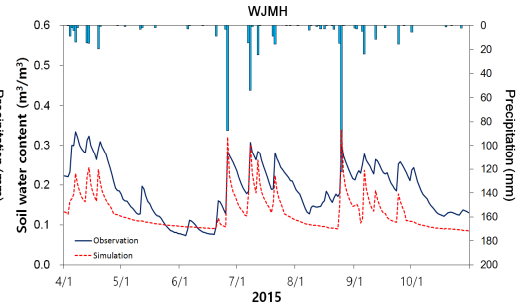
42) TBGN(태백귀네)_Silt Loam



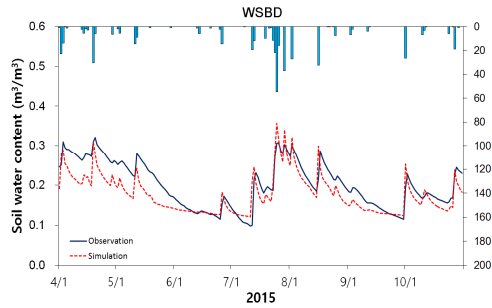
43) TYGD(통영광도)_Loam



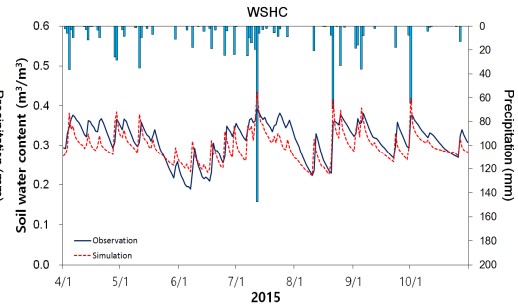
44) WJMH(울진마화)_Loamy Sand



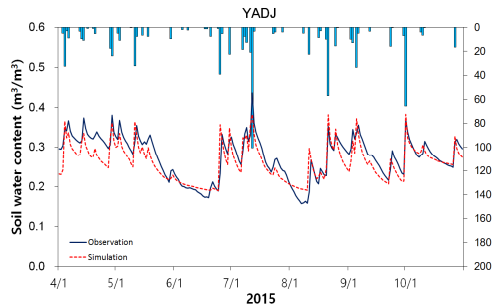
45) WSBG(화성봉담)_Sandy Loam



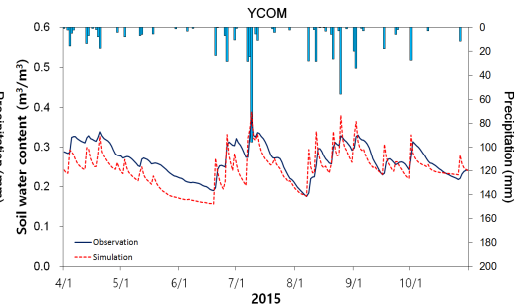
46) WSHC(화순한천)_Loam



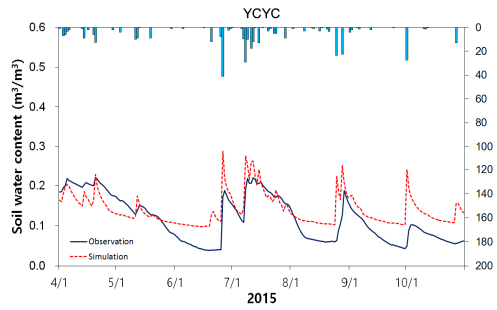
47) YADJ(영암덕진)_Sandy Loam



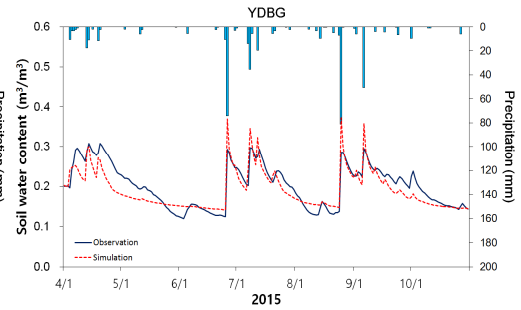
48) YCOM(영천오미)_Loam



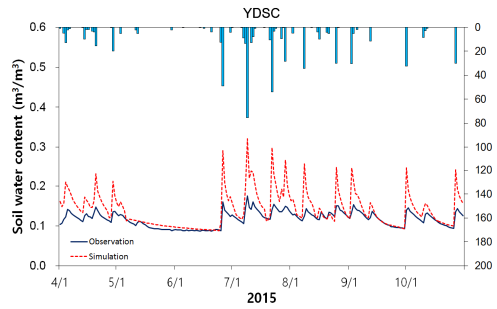
49) YCYC(예천예천)_Sand



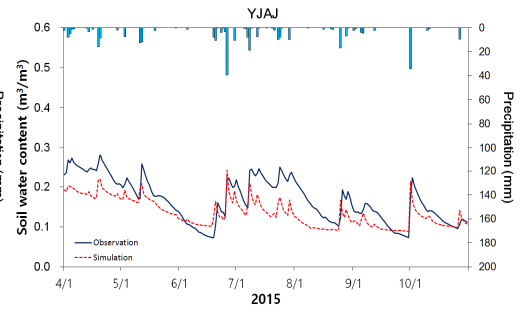
50) YDBG(영덕병곡)_Sandy Loam



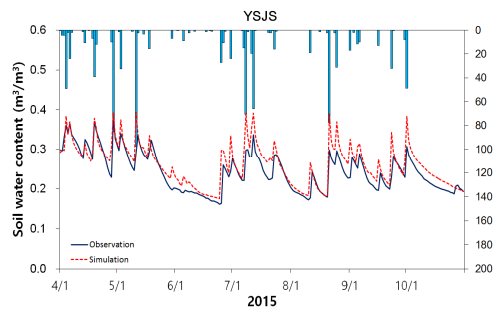
51) YDSC(영동삼천)_Loamy Sand



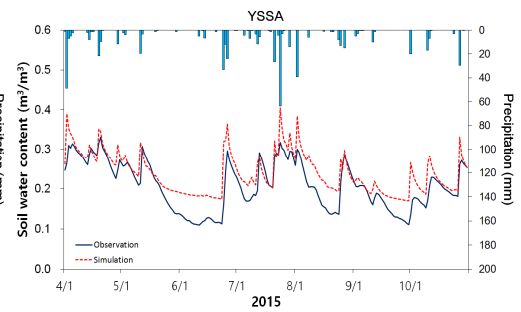
52) YJAJ(영주안정)_Loamy Sand



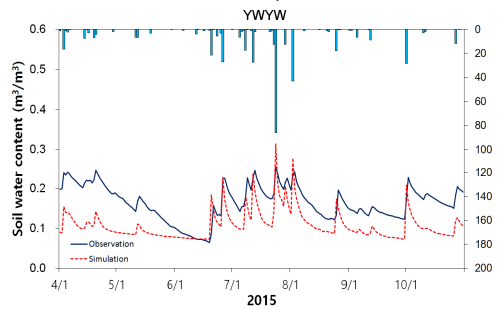
53) YSJS(여수주삼)_Loam



54) YSSA(예산산삼)_Loam



55) YWYW(영월영월)_Loamy Sand



연구보고서 2016-19

**발작물 재배지역의 생육시기별 토양수분 및 소비수량
추정기법 개발**

Estimation of Soil Moisture Content and Water Consumption at Different
Growth Stages in Upland Crop

신용희



APEC 기후센터

48058 부산광역시 해운대구 센텀7로12

Tel: 051-745-3900 Fax: 051-745-3949

www.apcc21.org



9 791156 981701

ISBN 979-11-5698-170-1