



WRF 기상자료의 토양수분 모형 적용을 통한 밭 토양수분 및 필요수량 산정

Estimation of Soil Moisture and Irrigation Requirement of Upland using Soil Moisture Model applied WRF Meteorological Data

홍민기* · 이상현**† · 최진용*** · 이성학* · 이승재****

Hong, Min-Ki · Lee, Sang-Hyun · Choi, Jin-Yong · Lee, Sung-Hack · Lee, Seung-Jae

Abstract

The aim of this study was to develop a soil moisture simulation model equipped with meteorological data enhanced by WRF (Weather Research and Forecast) model, and this soil moisture model was applied for quantifying soil moisture content and irrigation requirement. The WRF model can provide grid based meteorological data at various resolutions. For applicability assessment, comparative analyses were conducted using WRF data and weather data obtained from weather station located close to test bed. Water balance of each upland grid was assessed for soils represented with four layers. The soil moisture contents simulated using the soil moisture model were compared with observed data to evaluate the capacity of the model qualitatively and quantitatively with performance statistics such as correlation coefficient (R), coefficient of determination (R^2) and root mean squared error ($RMSE$). As a result, R is 0.76, R^2 is 0.58 and $RMSE$ 5.45 mm in soil layer 1 and R 0.61, R^2 0.37 and $RMSE$ 6.73 mm in soil layer 2 and R 0.52, R^2 0.27 and $RMSE$ 8.64 mm in soil layer 3 and R 0.68, R^2 0.45 and $RMSE$ 5.29 mm in soil layer 4. The estimated soil moisture contents and irrigation requirements of each soil layer showed spatiotemporally varied distributions depending on weather and soil texture data incorporated. The estimated soil moisture contents using weather station data showed uniform distribution about all grids. However the estimated soil moisture contents from WRF data showed spatially varied distribution. Also, the estimated irrigation requirements applied WRF data showed spatial variabilities reflecting regional differences of weather conditions.

Keywords: Soil moisture model; WRF model; spatial variability; irrigation water requirement

1. 서 론

기후 변화는 기온 증가, 강수량 증가와 계절별 강우 편차 및 강우 강도의 변화를 발생시킴으로써 관개기간 동안 농업용수 수급의 안정성을 저하시키는 요인이 될 수 있다 (Yoo et al., 2012). 또한 과다 관개는 한정된 수자원의 낭비를 야기할 뿐만 아니라 작물 생육기간 중에 토양이 포화상태를 유지하는 기간을 연장시킴으로써 뿌리의 심층 성장을 방해하고 작물의 조기 발달을 촉진시켜 작물의 최종적인 수확량을 감소시킨다

(de Bruyn, 1982). 따라서 기후변화에 적응하고 작물 생산을 증진시키기 위해서는 기상학의 변화, 토양수분 및 작물 증발산량 등의 변화를 동시에 고려할 수 있는 농업용수의 적정 공급량 산정 시스템이 필요하다. 밭의 용수 공급은 주로 양수장, 취입보 및 관정 등을 통해 수행되고 있고 작물의 다양성, 지역적 소규모 분산 등으로 인하여 대규모 용수 개발에 어려움이 있다. 따라서, 밭의 경우 용수 사용량에 대한 관리가 필요하며 이는 필요수량을 미리 예측하여 용수 활용 계획을 세움으로써 가능할 것으로 판단된다. 그러나 현재는 밭 지역의 증발산량 및 토양수분을 추정하기 위해 티센방법 (thiessen method)에 의해 지정된 지배 관측소의 기상자료만을 이용하고 있다. 이러한 점은 대상 지역의 실제 기상 상태를 제대로 반영하지 못할 수 있으며 특히, 소규모로 분산된 밭 지역에 대하여 지배 관측소의 기상자료를 적용할 경우 기상자료와 실제 기상과의 차이는 더욱 커질 가능성이 있다.

밭 토양 물수지 분석 방식을 개선하고자 하는 노력은 지속적으로 이루어져 왔다. 국내의 경우 Kim and Kim (1988)은 증발산 실측에 의한 밭 용수량 추정법 개선을 통해 밭관개의 계획 용수량을 파악하고자 하였으며 Bae (1998)의 경우 물수지 방정식을 기반으로 한 토양수분 물수지 모형과 GIS (Geographical

* Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University
** Department of Biological and Agricultural Engineering, Texas A&M University
*** Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Institutes of Green Bio Science and Technology, Seoul National University
**** National Center for Agro Meteorology, Seoul National University
† Corresponding author
Tel.: +1-737-346-4704 Fax: +1-979-862-3442
E-mail: sanghyun@tamu.edu

Received: November 12, 2015

Revised: November 30, 2015

Accepted: November 30, 2015

Information System)을 결합하여 토양수분의 공간적 해석을 시도하였다. Seo et al. (2012)의 경우 토양수분 예측 모형 (AFKAE0.5)를 개발함으로써 모형을 이용한 일별 토양 물수지 분석 방법을 제시한 바 있다. 국외의 경우 다양한 연구 기관들에 의해 밭에서의 수문기상인자 산정을 통한 밭 관개 및 작물 생육 정보를 제공하는 모델들이 개발되고 있으며 그 중 대표적 모델로는 물수지 방정식에 기반한 CROPWAT (FAO, 2000), AQUACROP (FAO, 2000)과 Richards 방정식 기반의 수치해석 모형인 SWAP (van Dam et al., 1997) 등이 있다. 밭 지역 수문인자 예측에 관한 연구로는 Han et al. (2009)는 기후변화 시나리오에 따른 토양수분의 추계학적 거동을 분석함으로써 미래 토양수분 함량을 예측하고자 하였으며 Nam et al. (2014)은 미래 기상시나리오를 토양수분 모형에 적용함으로써 미래 주요 밭작물의 소비수량 및 관개 용수량을 전망한 바 있다. Hong et al. (2015) 또한 토양수분 모형에 미래 기상시나리오를 적용하고 토양수분을 산정함으로써 전라남도 지역의 미래 가뭄을 전망한 바 있다.

이처럼 토양수분 및 밭관개를 위한 필요수량을 예측·산정하고자 하는 시도들은 토양수분 거동에 대한 추계학적 분석 또는 기후 변화 시나리오에 의한 미래 기상자료를 물수지 모형에 적용함으로써 이루어져 왔다. 그러나 이러한 시도들은 추계학적 모형과 기후 변화 시나리오의 불확실성으로 인해 단기 예측에 대한 적용성이 낮다는 점에서 농경지의 중·단기 관개계획을 세우는 데에 부적합한 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 WRF (Weather Research and Forecast) 모형이 제공하는 모의 기상자료를 활용하여 지역적 기상 차이를 고려한 밭 지역 토양수분 및 필요수량 중·단기 예측·산정이 가능한 격자기반 토양수분 모형을 개발하였다. 또한 WRF 모형의 중·단기 기상예측자료를 활용하기에 앞서 토양수분 모형의 모의 능력을 검증하였으며 과거 기간의 WRF 기상자료를 토양수분 모형에 적용하여 밭 토양수분 및 필요수량 모의를 실시하였다. 모의 결과는 토양수분의 일별 시계열 자료 및 시공간 분포, 필요수량의 총량 및 시공간 분포정보이며 WRF 모의 기상자료의 적용에 따른 토양수분 및 필요수량 산정 결과의 차이점을 분석하기 위해 기존 지배 관측소 자료 활용 방식의 의한 결과와 비교를 실시하였다.

II. 재료 및 방법

1. 격자 기상자료

가. WRF 기상모형

WRF 모형은 최근 미국 국립 대기연구센터(National Center

for Atmospheric Research)에서 개발된 기후예측 모델로서 수치모의를 구현할 수 있고, 이상적인 모의, 모수화, 자료동화, 예보 연구, 모델간 결합, 실시간 예보 등 다양한 용도로 사용될 수 있다 (Lee, 2013). WRF 모형은 일기예보·예측을 위해 기상청과 기상관련기관에서 주로 쓰이며 기상모형에서 산출되는 강우자료의 정확성이 검증됨에 따라 WRF 모형을 이용한 기후모형의 수문모형 적용 연구가 진행되고 있다 (Baek et al., 2012). WRF 모형의 예측 능력에 대한 연구로서 Knebl-Lowrey and Yang (2008)은 NARR (NCEP North American Regional Reanalysis) 자료를 분석하여 WRF 모형의 집중호우 예보 능력을 평가하였으며 모의 시간간격을 48시간으로 할 경우 상관계수 0.63의 강우사상 모의능력을 입증한 바 있다. Baek et al. (2012)는 WRF-ARW (Advanced Research WRF) 모형을 이용한 공간 분포형 강우 자료를 수문 모형인 HEC-HMS와 연계 활용함으로써 분포형 유출 모의의 활용가능성을 연구한 바 있으며 WRF 모형의 모의 강수량 자료를 청미천 유역에 위치한 5곳의 강우관측소와 비교한 결과 상관계수의 값이 0.746-0.922의 범위를 갖는 점을 파악하였다. Song et al. (2015)은 WRF 모형의 경기도 여주시 청미천 부근에 위치한 AWS (Automatic Weather Station)에서 관측된 기상자료와 WRF 모의 기상자료를 비교한 결과 해당 관측 기간에 대해 강우량을 다소 과대 모의하는 경향을 보이지만 관측 지점에서의 강우 시작과 종료 시점에 대한 모의 능력이 뛰어난 점과 최고기온 및 최저기온을 전반적으로 잘 모의하며 특히 최저기온을 지상 2 m와 10 m 높이에서 0.4 °C 오차 이내로 모의하는 점을 파악하였다. 또한, Yalong 강 유역에서 발생한 과거 집중호우를 WRF 모형으로 재모의하여 WRF 모형의 집중 호우 모의 능력을 평가한 결과 강우의 공간적 분포에 대한 모의 정확도가 전반적으로 높게 나타난 바 있다 (Yang et al., 2015). 본 연구에서는 WRF 기상자료를 밭 토양 물수지 모형에 적용하고 시기별 토양수분의 변화 및 필요수량을 분석하고자 하였다.

2. 밭 토양수분 물수지

가. 물수지 방정식

본 연구의 밭 토양 물수지는 유효 근근역을 4개의 토층으로 나누어 토층별 물수지 분석을 실시하였다. 4개의 토층 중 상위 토층부터 토층 1, 2, 3, 4로 명명하기로 하며 토층 1의 물수지 방정식은 다음과 같다.

$$\Delta S_{1(t)} = (PR_t + IR_t + UP_t + HI_t) - (ET_{1(t)} + IFT_{1-2(t)} + RO_t + HO_t) \quad (1)$$

여기서, PR_t 는 t 일의 강우량, IR_t 는 t 일의 관개량, UP_t 는 t 일의 모관력에 의한 수분 상승량, HL_t 는 t 일의 횡방향 수분 유입량, $ET_{1(t)}$ 는 t 일의 증발산량, $IFT_{1-2(t)}$ 는 t 일의 토층 1에서 토층 2로의 침투량, RO_t 는 t 일의 지표 유출량, HO_t 는 t 일의 횡방향 유출량이다. 본 연구의 경우 모관력에 의한 수분 상승량과 횡방향 수분 유입·출량은 양은 다른 수문인자에 비해 적은 양으로 일별 물수지 변화에 미미한 영향을 끼치므로 편의를 위해 생략하였고 무관개임을 고려하였으므로 토층 1에 해당하는 물수지 방정식은 다음과 같다.

$$\Delta S_{1(t)} = (PR_t) - (ET_{1(t)} + IFT_{1-2(t)} + RO_t) \quad (2)$$

토층 2,3,4의 경우 각각 윗 토층에서 과잉되어 하위 토층으로 유출되는 양을 해당 토층의 수분 유입량으로 가지며 과잉되는 양은 유입량에서 해당 토층의 토양수분 미흡량 (soil moisture depletion)을 제외한 양으로 간주한다. 따라서 각 토층의 물수지 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} IFT_{1-2(t)} &= (PR_t - RO_t) - Dr_{1(t)} & (\text{토층 2}) \\ \Delta S_{2(t)} &= IFT_{1-2(t)} - ET_{2(t)} & PR_t - RO_t > Dr_{1(t)} \\ \Delta S_{2(t)} &= -ET_{2(t)} & PR_t - RO_t \leq Dr_{1(t)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} IFT_{2-3(t)} &= IFT_{1-2(t)} - Dr_{2(t)} & (\text{토층 3}) \\ \Delta S_{3(t)} &= IFT_{2-3(t)} - ET_{3(t)} & IFT_{1-2(t)} > Dr_{2(t)} \\ \Delta S_{3(t)} &= -ET_{3(t)} & IFT_{1-2(t)} \leq Dr_{2(t)} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} IFT_{3-4(t)} &= IFT_{2-3(t)} - Dr_{3(t)} & (\text{토층 4}) \\ \Delta S_{4(t)} &= IFT_{3-4(t)} - ET_{4(t)} & IFT_{2-3(t)} > Dr_{3(t)} \\ \Delta S_{4(t)} &= -ET_{4(t)} & IFT_{2-3(t)} \leq Dr_{3(t)} \end{aligned}$$

여기서 $IFT_{n-(n+1)(t)}$ 는 토층 n 에서 토층 $n+1$ 로의 침투량을 의미하고 $Dr_{n(t)}$ 는 t 일의 토층 n 에서의 토양수분 미흡량, $ET_{n(t)}$ 는 t 일의 토층 n 에서의 증발산량, $\Delta S_{n(t)}$ 는 t 일의 토층 n 에서의 토양수분 변화량을 말한다. 토층 1로 유입되는 유효우량은 해당일의 강우량과 같으며 작물의 실제 증발산량을 모의하기 위해 작물의 잠재 증발산량 (potential evapotranspiration, PET)을 산정하고 작물계수 (crop coefficient, K_c)와 수분 스트레스 계수 (Water stress coefficient, K_s)를 곱해줌으로써 유효 근근역 내 작물 증발산량 (ET_{actual})을 일별로 산정하였다 (FAO, 2004). 잠재 증발산량을 산정하기 위해 Penman-Monteith 식을 이용하였으며 식은 다음과 같다.

$$PET = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_s)} \quad (4)$$

$$ET_{actual} = PET \times K_c \times K_s$$

작물 계수는 작물에 따른 생육 시기별 실제 증발산량의 잠재 증발산량에 대한 비율이며 작물의 생육단계에 따라 초기 작물계수 (K_{c-ini}), 중기 작물계수 (K_{c-mid}), 말기 작물계수 (K_{c-end})의 3가지 값으로 제시된다. 또한, 수분 스트레스 계수는 근근역 내의 토양수분 함량이 일정 범위보다 낮아질 경우 증산에 필요한 충분한 양의 수분 공급이 저해됨으로 인해 작물의 증산량이 감소하는 현상을 반영한다. 작물마다 정해지는 전유효수분량 (TAW)와 용이토양수분량 (RAW)의 값에 따라 토양수분 함량에 따른 해당 작물의 수분 스트레스 계수가 정해진다 (FAO, 2004).

$$TAW = (F.C - W.P) \times Z_r$$

$$RAW = \rho \times TAW \quad (5)$$

$$K_s = \frac{TAW - Dr}{TAW - RAW} \quad (\text{if, } Dr > RAW)$$

여기서 F.C는 토성에 따라 결정되는 포장 용수량 (field capacity), W.P는 영구 위조점 (wilting point), Z_r 은 작물의 최대 뿌리 깊이 (m)이다. 용이토양수분량은 전유효수분량에 작물의 토양수분감소율 (soil water depletion fraction for no stress) ρ 을 곱해줌으로써 산정 가능하다 (Nam et al., 2014). 지표 유출량은 강우량 중에서 토양 속으로 침투한 우량을 제외하고 지표와 토양층을 통해 경지를 벗어나는 유출량을 말한다. 본 연구에서는 지표 유출량을 산정하기 위하여 SCS CN (Soil Conservation Service Curve Number) 방법을 사용하였으며 이 방법에 의한 지표 유출량 산정은 다음 식을 통해 이루어진다.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (6)$$

$$\text{단, } P \leq 0.2S \text{ 일 때 } Q = 0, S = \frac{25400}{CN} - 254$$

여기서, Q 는 강우량에 의한 지표 유출량 (mm), P 는 총 강우량 (mm), S 는 최대 저류량 (mm), CN 은 유출곡선지수

(Curve Number)으로 토지피복도와 수문학적 토양군에 의해 결정되는 상수이다. 이 때 최대 저류량을 산정하기 위해 필요한 값은 해당 토양의 토성에 따른 수문학군 분류와 작물 재배 및 식생 형태에 따라 다르게 되며 미국 농무부 (United States Department of Agriculture)에서 제공하는 SCS 분류방법에 따른 유출곡선 지수를 이용하였다. 유출곡선 지수는 선행 강우량에 따라 AMC I - III 조건으로 분류되며 이러한 조건에 따라 변화되는 유출곡선 지수의 값을 반영하여 지표유출량을 산정하였다 (Mishra and Singh, 2003). 또한 지하 배수량은 유효토층 하부에서 토양수분 중 중력수가 아래로 이동되는 양을 의미하며 토층 4의 토양수분함량이 포장용수량을 초과할 경우 포장용수량 이상의 토양수분은 모두 지하 배수되는 것으로 간주하였다 (Nam et al., 2014).

나. 작물 소비 수량

유효토층 내의 토양수분 모의 산정은 앞서 언급한 토양 물수지 방정식에 의해 이뤄지며 방정식 인자 중 증발산량을 산정하는 것이 주요하다고 할 수 있다. 증발산량은 지표에서의 증발과 식물에 의한 증산의 결과 발생하며 작물과 토성의 특성에 따라 다르게 모의되므로 보다 정확한 산정을 위한 방법론 선정이 중요하다. 본 연구에서는 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 뿌리 성장에 따른 작물의 토양수분소비패턴(soil moisture extraction pattern)을 적용하였다 (Chung et al., 2013). 작물의 최대 근근역을 토양 물수지 산정시 분류 기준인 4개 층으로 나누어 작물의 생육 경과 기간에 따른 뿌리의 깊이를 고려하였고 각 토층의 증산 작용에 의한 토양수분 미흡량(soil moisture depletion)을 산정하였다. 즉, 뿌리의 분포 범위에

따라 증발산에 의해 소비수량이 발생하는 토층이 결정되며 총 증발산량에 대한 비율로 결정된다.

뿌리의 분포 범위를 결정하는데 있어서는 뿌리 성장 함수를 이용하였으며 본 연구에서 시범 작물로 선정된 가을배추(chinese cabbage)의 뿌리 성장 함수는 다음과 같다 (Chung et al., 2005).

$$RD_r = 0.45 + 0.47 \sin(3.03 T_r - 1.47) \quad (7)$$

여기서 RD_r 는 상대 뿌리깊이(relative rooting depth)로써 최대 뿌리 깊이에 대한 현재 뿌리 깊이의 비를 의미하며 T_r 는 상대시간으로 전 생육일수에 대한 현재까지의 이앙 후 경과 일수의 비를 말한다. 위의 식 (7)에 의해 실험 작물의 생육 경과에 따른 뿌리 깊이를 산정하였으며 이는 시기별 모의의 대상이 되는 토층을 파악하는데 사용될 뿐 아니라 전 유효수분량 및 용이 토양수분량을 결정하는 인자로도 활용된다.

다. 필요수량 산정

필요수량은 각 토층에서 토양수분이 용이토양수분량 이하로 감소할 경우 토양수분 부족함량을 누계함으로써 산정하였다. 따라서 해당 지역의 필요수량은 모의 기간 중 4개의 토층마다 발생한 필요수량의 합계로 정의하였다. $Dr_{K(t)}$ 는 K 번째 토층에서 t 시간에 발생한 토양수분 부족함량을 말하며 $RAW_{K(t)}$ 는 K 번째 토층의 t 시간에 해당하는 용이토양수분량을 말한다.

$$IR = \sum_{K=1}^4 \sum_{t=i}^n [Dr_{K(t)} - RAW_{K(t)}] \quad (8)$$

3. 격자기반 토양 물수지 모형

가. 입력자료

본 연구에서 개발한 밭 토양 물수지 모형은 격자형 자료를 입력자료로 활용 가능하다. 따라서 격자 형태의 기상자료, 작물지도, 토성도 및 토지이용도는 GIS를 통해 ASCII 코드 형식의 자료로 변환되어 토양 물수지 모형에 적용된다. 기상자료의 경우 앞서 언급한 WRF 모형에 의한 모의기상자료를 이용하였으며 기상인자 중 강우량, 순복사량, 기온, 상대습도, 풍속의 5가지 기상인자를 고려하였다. WRF 모형의 경우 토양 물수지 모형에 입력 자료로 활용하기 위해서는 동일 시점의 시간단위 분포형 자료를 동일 격자의 일단위 시계열 자료(time series)로의 데이터 변형이 필요하며 이를 위해 기상청 프로토콜(protocol)을 적용하였다. 토양도의 경우 국립농촌

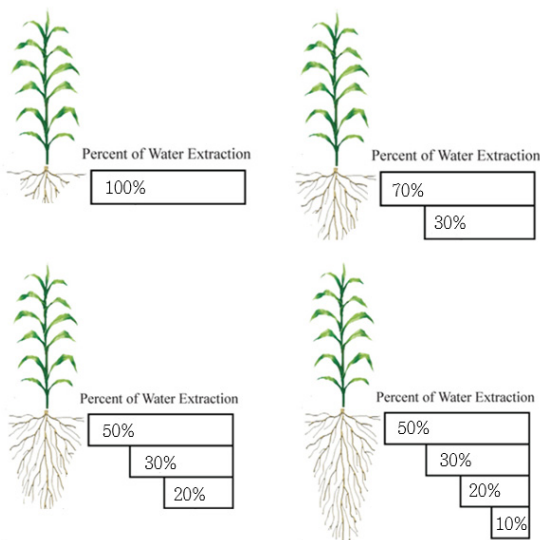


Fig. 1 Soil moisture extraction pattern of 4 layers about crop growth

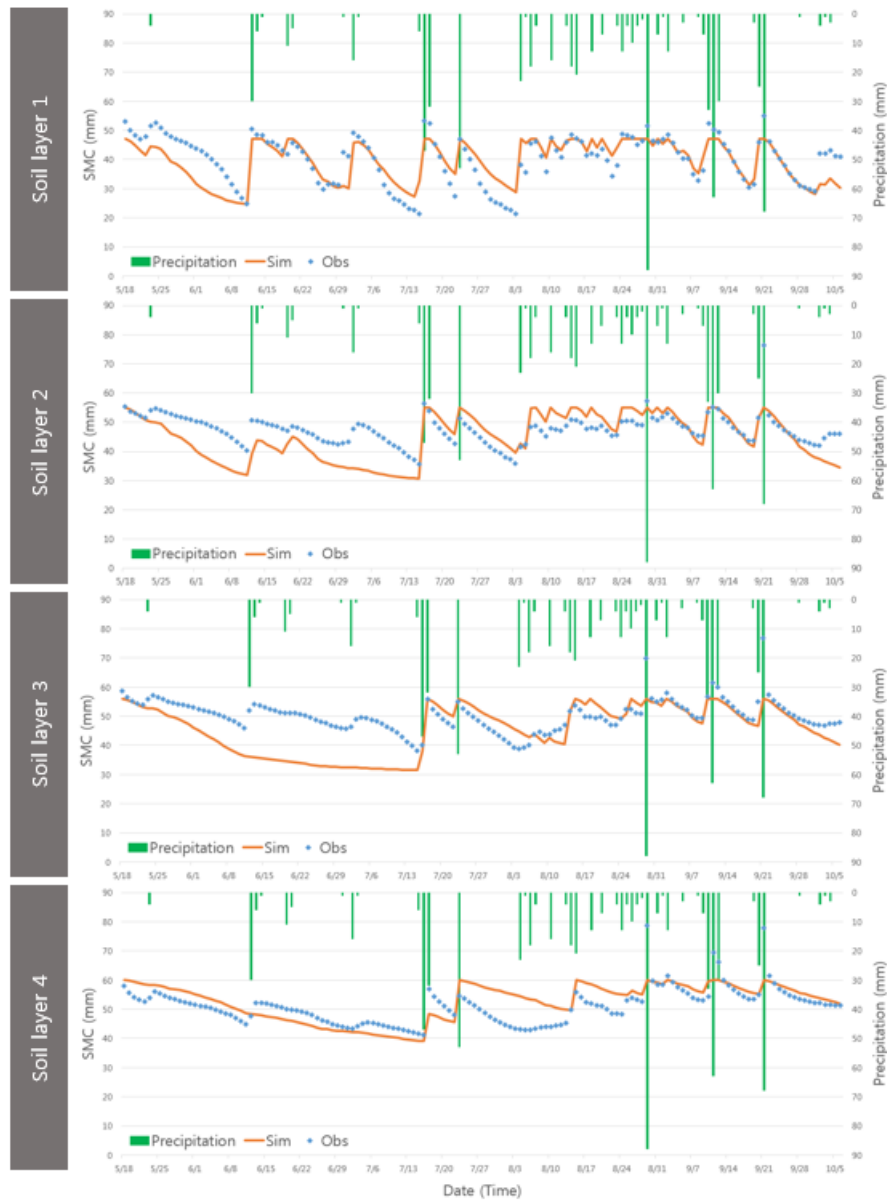


Fig. 3 Comparisons between simulation results and observed data about soil moisture contents in time series

편차 ($RMSE$), 1:1 산점도 그래프 (Scatter plot)의 기울기를 산정하였고 Fig. 4과 Table 1에 나타내었다. 토층 1의 경우 R 의 값은 0.76, R^2 의 값은 0.58, $RMSE$ 의 값은 5.568 mm이고 산점도 그래프의 기울기는 0.97로 나타났다. 토층 2의 경우 R 의 값은 0.60, R^2 의 값은 0.37, $RMSE$ 의 값은 6.91 mm, 산점도 그래프의 기울기는 0.94로 나타났다. 토층 3의 경우 R 의 값은 0.53, R^2 의 값은 0.28, $RMSE$ 의 값은 8.66 mm이고 산점도 그래프의 기울기는 0.90으로 나타났다. 마지막으로 토층 4의 경우 R 의 값은 0.67, R^2 의 값은 0.45, $RMSE$ 의 값은 5.27 mm이고 산점도 그래프의 기울기는 1.02로 나타났다. 분석결

과 토양수분 변이가 가장 활발한 토층인 토층 1에서의 모의 능력이 가장 뛰어나고, 토층 3에서의 모의 능력이 가장 낮은 것으로 평가되었다. 각 토층에서 오차를 보이는 이유로 수분 유입 시점에 대한 모의가 제대로 이뤄지지 않은 점을 생각해 볼 수 있다. 이는 모형에서는 상위 토층의 미흡량이 수분 유입량보다 많을 경우 하위 토층으로 수분이 재분배되지 않는 반면 실제로는 이러한 경우에도 하위 토층으로 수분 재분배가 이뤄지기 때문인 것으로 판단된다. 기존의 토양수분 모형들의 결정계수가 0.4에서 0.6 사이의 값을 갖는 점을 고려하고 (Hur et al., 2014), 4개의 토층들에서 선형 회귀식의 기울기가

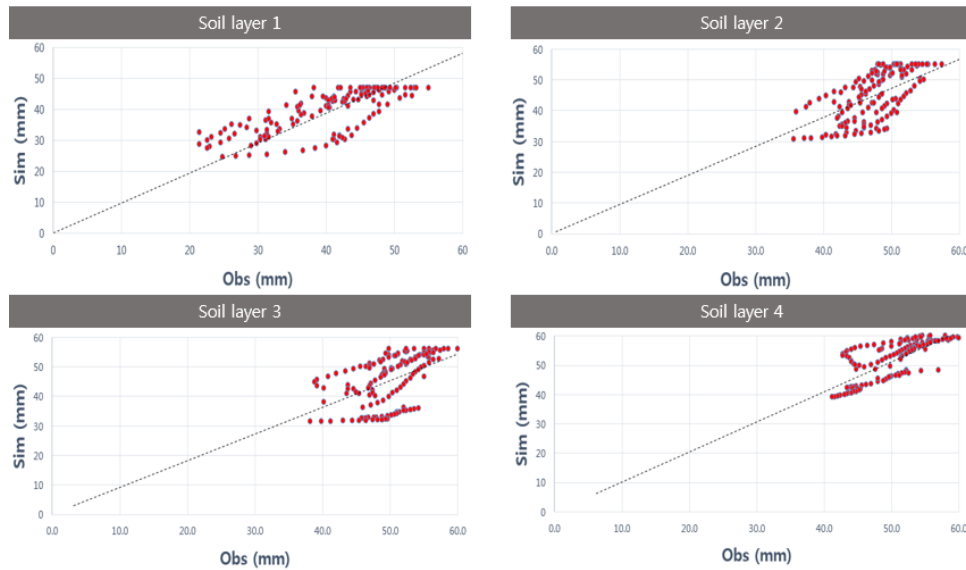


Fig. 4 Linear relationship of simulation results and observed data

Table 1 Performance statistics for the soil moisture simulation using the model

Soil layer	R	R^2	RMSE
1	0.76	0.58	5.45 mm
2	0.61	0.37	6.73 mm
3	0.52	0.27	8.64 mm
4	0.68	0.45	5.29 mm

모두 1에 가깝게 나타났고 RMSE 값이 최대 8.66 mm, 최소 5.27 mm의 범위로 나타난 것을 종합한 결과 본 토양 물수지 모형의 토양수분 모의 능력이 유효하다고 판단된다.

2. 모형의 적용

가. 입력 자료 및 대상 지역

본 연구에서는 경기도 여주시 점동면의 청미천 부근의 가로와 세로 각각 12.96 km의 지역을 대상지역으로 선정하였다. 대상 지역에 대하여 2014년 9월 10일부터 9월 29일까지 20일간 모의가 진행되었으며 가로세로 길이 270 m의 격자형태 기상자료가 생성되었다. 본 연구의 토양 물수지 모형에서는 강우량, 순복사량, 기온, 상대습도, 풍속의 5가지 기상인자들을 사용하였으며 Fig. 5은 2014년 9월 24일의 WRF 기상모의 결과를 격자 형태로 나타낸 것이다.

또한 환경부에서 제공하는 중분류 토지 피복도를 기반으로 과수원을 포함한 밭작물 (보통, 특수) 재배 지역을 추출하여 토양 물수지 모형에 적용하였다. 토양자료의 경우 국립농업과학원에서 제공하는 토양도를 활용하였고, 토양도 분석 결과 대상 지역의 토성은 사질, 사양토, 식양토, 식질의 4가지

토성으로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 토양도와 토지이용도를 가로세로 길이 90 m의 단위의 격자로 분할하여 GIS를 이용해 도시한 결과는 Fig. 6과 같으며 총 20,739개의 격자 중 밭 격자는 3,449개로 나타났다.

작물의 경우 실제 작물에 대한 재배 정보를 구축하는데 어려움이 있고, 본 모형의 경우 다양한 작물의 적용이 가능하기 때문에 경기도 지역의 대표 작물인 가을배추를 시범 작물로 선정하여 적용하였다. 토성에 따른 입력 자료와 시범 작물인 가을배추의 속성 정보는 다음 Table 2와 같다.

나. 시공간적 토양수분 분포모의 결과

각 토층의 토양수분은 포장 용수량까지 채워준 상태에서 토양 물수지 분석을 실시하였다. 시범 작물로 선정된 가을배추의 뿌리 성장함수에 의해 뿌리깊이는 0.113 m-0.296 m의 범위를 갖는 것으로 나타났으므로 토양수분의 가장 활발한 변화가 예상되는 토층 1에 대하여 토양수분 분포도를 작성하였다. Fig. 7에 제시한 바와 같이 토양수분 분포도는 모의 시작일로부터 6일 간격으로 작성되었으며 이천 기상대 자료 적용 결과에 비해 WRF 모형을 적용하였을 경우 다양한 공간적

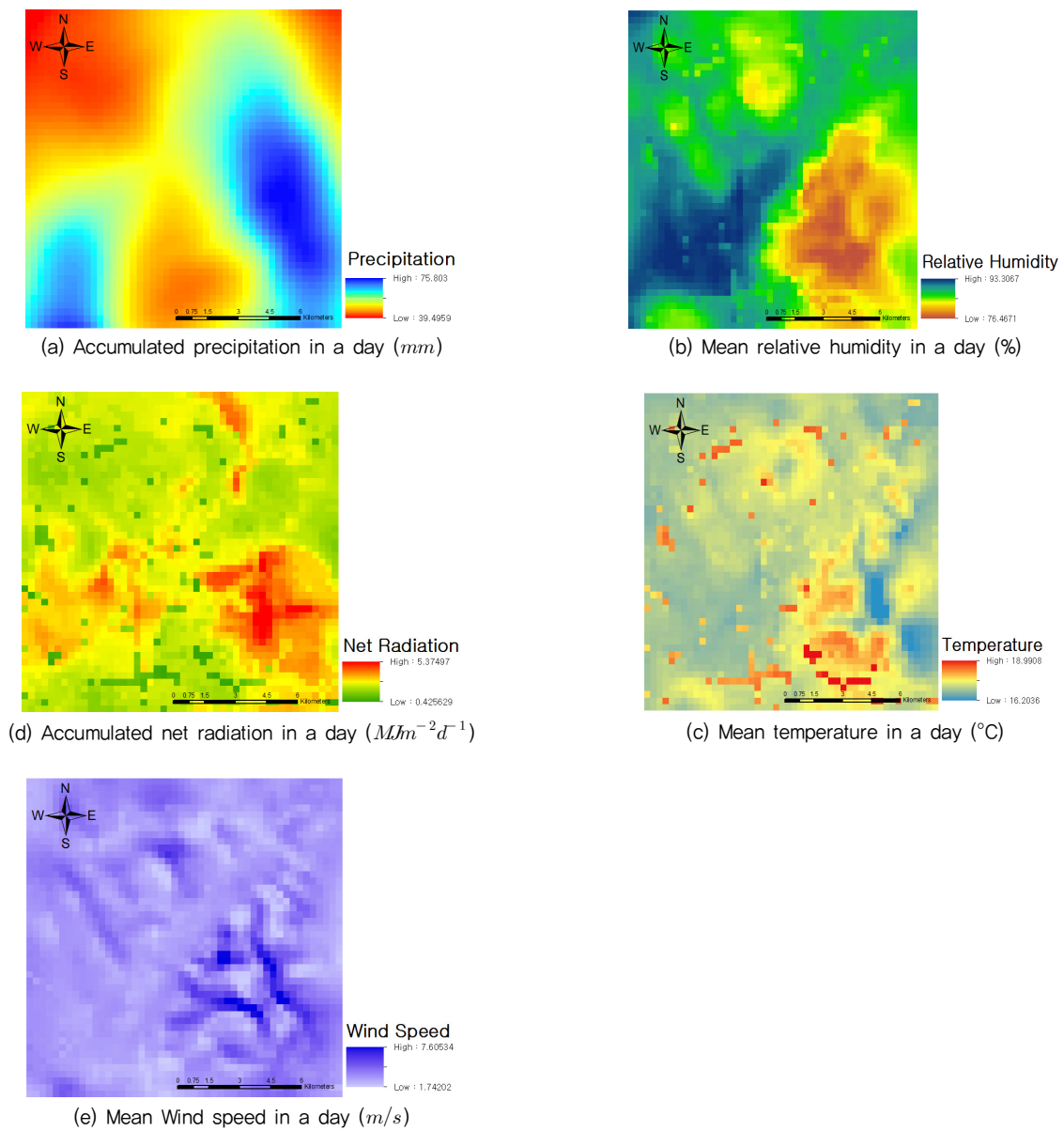


Fig. 5 Meteorological data from WRF model (2014.09.24)

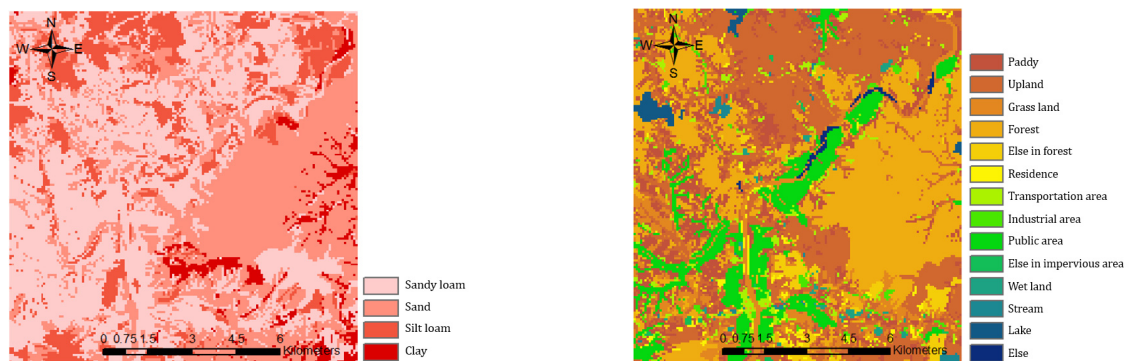


Fig. 6 Soil texture and land use map (Left: soil texture, Right: land use)

Table 2 Input data related with crop and evapotranspiration

(FAO, 2004)

Crop	K_{c-init}	K_{c-mid}	K_{c-end}	Growth period	Maximum root depth (m)	Soil water depletion fraction
Chinese Cabbage	0.9	1.7	1	8/10 ~ 11/20	0.6	0.45

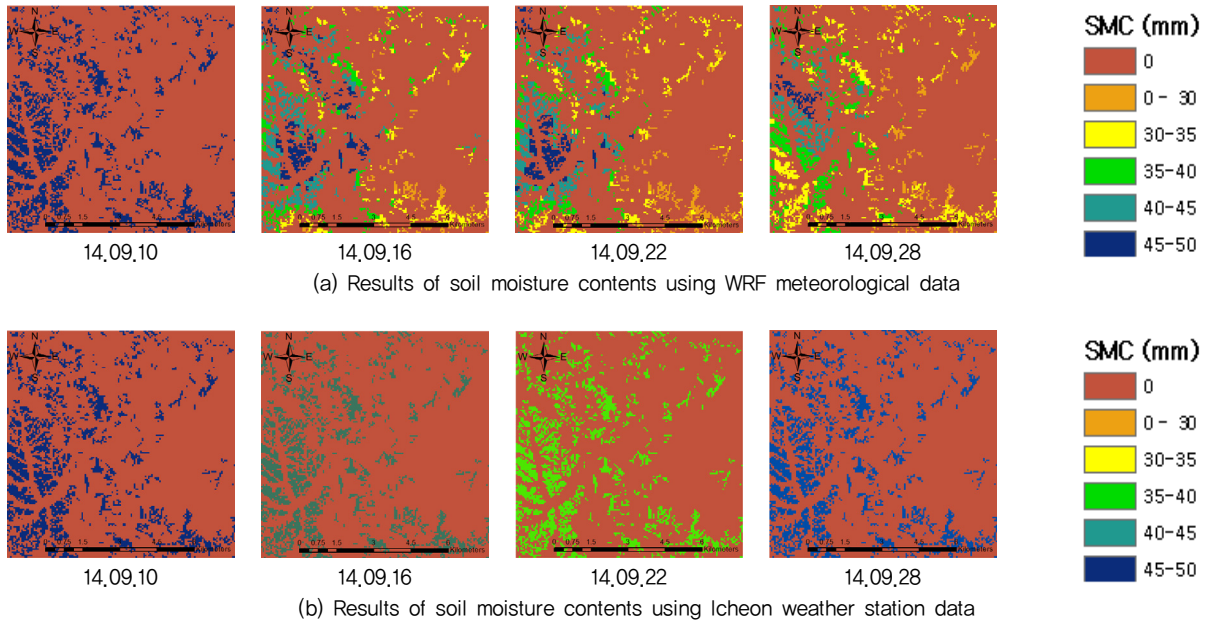


Fig. 7 Spatial and temporal distribution of simulated soil moisture contents

차이요소를 반영한 토양수분의 분포를 확인할 수 있다. 먼저 WRF 자료를 적용한 토양 물수지 결과를 살펴보면 9월 10일에는 지점당 47.0 mm, 16일 34.4 mm-39.67 mm, 22일 25.8 mm-30.4 mm, 28일 35.0 mm-42.4 mm 범위로 공간적 차이를 갖는 토양수분 산정 결과를 확인할 수 있다. 반면에 이천 기상대의 기상자료를 적용하였을 경우 격자 간 기상자료의 차이가 없기 때문에 9월 10일에는 지점 당 47.0 mm, 16일 39.2 mm, 22일 35.5 mm, 28일 42.1 mm의 값으로 전 지역에 걸쳐 동일한 토양수분이 모의 되었다. 따라서 WRF 기상자료의 결과를 토양 물수지 모형에 적용할 경우 기상현상 차이를 비롯한 다양한 공간적 차이요소를 반영하는 토양수분 분석이 가능한 것으로 판단된다.

Fig. 8은 임의로 추출된 격자의 토층별 토양수분의 시계열 변화를 나타낸 결과이다. 모의 결과 작물의 뿌리 분포로 인해 상위 2개의 토층에서 토양수분 감소가 확연히 관찰되었고, 이에 따라 수분 감소에 의한 수분 스트레스 발생도 토층 1, 2에서 활발한 점을 확인할 수 있다. 증발산에 의해 발생한 토양수분 감량은 토층 1에서 WRF 자료 적용 시 25.3 mm, 이천 기상대 자료 적용 시 16.1 mm, 토층 2에서 각각 11.6 mm, 6.42 mm, 토층 3에서 각각 7.71 mm, 4.28 mm, 토층 4에서 각각

3.85 mm, 2.14 mm로 나타났다. 상위 토층일수록 토양수분 감량이 크게 나타나고, WRF 기상자료를 적용한 경우 이천 기상대의 자료를 적용하였을 때 보다 토양수분 감량이 크게 발생하였다. 이러한 모의 결과는 WRF 기상자료를 적용할 경우 이천 기상대의 자료를 적용할 경우보다 증발산량이 크게 산정되는 것으로 인해 발생한다고 판단된다.

다. 작물 필요수량 모의 결과

토양 물수지 모형의 토양수분 모형을 기준으로 모의기간 전 기간에 대한 필요수량을 산정하였으며 Fig. 9는 격자형태의 작물 필요수량 산정 결과이다. 이천 기상대의 기상자료를 적용한 경우에는 시범 지역 내의 모든 밭 지역에서 필요수량이 발생하지 않은 반면 WRF 기상자료를 적용한 경우에는 시범 지역의 밭 격자당 필요로 하는 평균 관개수량은 26.39 mm로 나타났고, 격자별 최대 45.42 mm에서 최소 13.32 mm까지 필요수량이 다양하게 모의됨을 확인할 수 있다. 격자단위의 필요수량 결과를 밭 격자의 실제 면적을 고려하여 시범 지역의 총 필요수량을 환산한 결과 모의 기간 중 총 737,310 m³의 관개용수의 공급이 필요한 것으로 나타났다.

본 연구의 토양 물수지 모형과 WRF 기상자료를 통한 필요

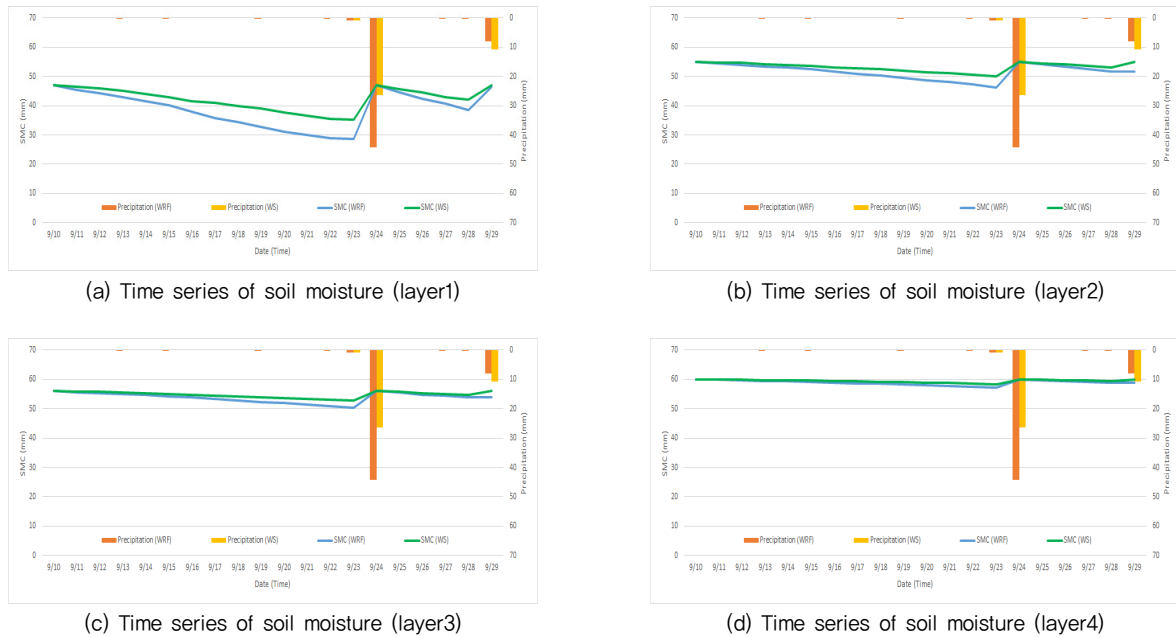


Fig. 8 Soil moisture simulation results by soil layers (2015.09.10.–2015.09.29)

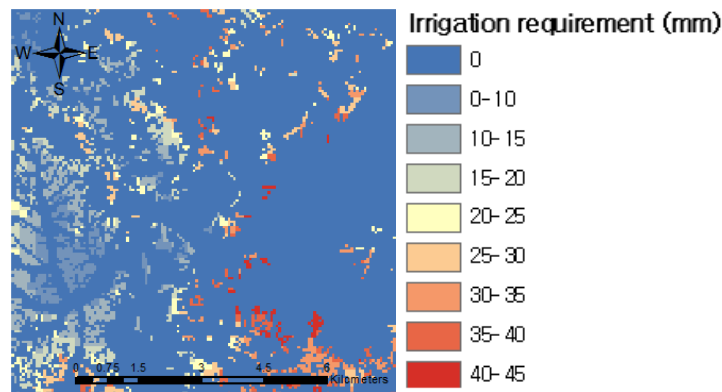


Fig. 9 Spatial distribution of total irrigation requirement (duration : 2015.9.10–2015.9.29)

수량 분석 결과 근접한 지역이라도 기상 및 토양 상태에 따라 필요수량이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있으며 따라서 향후 효율적이고 정밀한 밭 관개계획을 위해서 본 모형의 토양수분 및 필요수량의 시공간적 모의 자료가 활용 가능할 것으로 기대된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 WRF 모의 기상자료를 밭 토양수분 모형에 적용함으로써 밭 지역의 격자 단위 토양수분 및 필요수량 산정을 실시하였다. 토양수분 모형을 통해 일별로 토양 물수지 분석을 실시하여 유효수량, 지표 및 지하 유출량, 증발산량과

같은 수문인자들을 산정하였고 토양수분 값을 계산하였다. 밭 지역의 지점 단위 토양 물수지 분석은 한 지점에 대하여 4개 토층으로 분할되어 실시되었으며 각 토층에서 발생한 소비수량은 작물의 뿌리 성장과 토양수분소비형을 고려하여 산정되었다. 본 연구에서 개발된 밭 토양수분 모형의 모의 능력을 평가하기 위해 2010년 5월 18일부터 10월 6일까지 총 142일간 실측한 밤나무의 토양수분 값과의 토층별 검정을 실시하였고 이를 바탕으로 2014년 9월 10일부터 29일까지 20일간의 WRF 기상자료를 이용하여 시범 지역의 토양수분 및 필요수량 산정을 실시하였다. 토층별 검정 결과 토층별 결정계수는 토층 1이 0.579, 토층 2 0.365, 토층 3 0.279, 토층 4 0.450로 나타났으며 이에 따라 본 모형을 토양수분 모의에 사용가능하다고 판단하였다. WRF 기상자료를 본 토양수분 모

형에 적용하여 일별 토양수분 및 필요수량을 모의한 결과 이 천 기상대 자료를 적용한 경우에 비해 다양한 값을 갖는 토양수분 및 필요수량의 공간 분포를 확인할 수 있었으며 이는 격자별 기상 및 토양의 차이요소를 토양 물수지에 반영한 결과라고 생각한다. 본 연구는 기존의 토양 물수지 분석에 관한 연구들이 지배 관측소의 기상자료를 활용함으로써 발생한 기상차이에 의한 물수지 오차를 고해상도 WRF 기상자료의 격자 기반 토양수분 모형 적용을 통해 줄이고자 하였다. WRF 모형의 중·단기 예측자료를 활용하여 공간적 차이요소를 반영한 토양수분 및 필요수량의 분포 정보를 예보할 수 있을 것으로 판단되며 이러한 점은 발 관계계획 수립에 필요한 중·단기 영농 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- Bae, S. J., 1998. Drought Analysis using soil water balance model and geographic information system. Ph.D. diss., Seoul National University (in Korean).
- Baek, J. J., Y. Jung, and M. H. Choi, 2012. Estimation for runoff based on the regional-scale weather model applications : Cheongmi region, *Journal of the Korean Society of civil engineering*, 32(1B): 29-39 (in Korean).
- Chung, H. W., S. H. Park, N. H. Lee, S. J. Kim, J. Y. Choi, D. S. Kim, K. W. Park, M. W. Jang, and S. J. Bae, 2005. *Estimation of crop water requirement in Korea*. Seoul national university. HanChang Press (in Korean).
- Chung, H. W., S. J. Kim, J. S. Kim, J. K. Noh, K. W. Park, J. G. Son, K. S. Yoon, K. H. Lee, N. H. Lee, S. O. Chung, J. D. Choi, and J. Y. Choi, 2013. *Irrigation and Drainage engineering*. Seoul national university. DongMyeong Press (in Korean).
- de Bruyn, L. P., 1982. The Effect of over irrigation on the growth and Production of *Gossypium hirsutum*, *Irrigation Science* 3: 177-184.
- Food and Agriculture Organization (FAO), 2004. FAO irrigation and drainage paper No. 56: Crop evapotranspiration-guideline for computing crop water requirement.
- Han, S. H., J. H. Ahn, and S. D. Kim, 2009. Stochastic Behavior of Soil Water and the impact of climate change on soil water, *Journal of Korea Water Resources Association* 42(6): 433-443 (in Korean).
- Hong, E. M., W. H. Nam, and J. Y. Choi, 2015. Climate Change Impacts on Agricultural Drought for Major Upland Crops using Soil Moisture Model -Focused on the Jeollanam-do-, *Journal of the Korean Society of civil engineering* 57(3): 65-76 (in Korean).
- Hur, S. O., Y. G. Son, B. K. Hyun, K. S. Sin, T. K. Oh, J. K. Kim, 2014. Verification on PTF(Pedo-Transfer Function) estimating soil water retention based on soil properties. *CNU Journal of Agricultural Science* 41(4): 393-400 (in Korean).
- Kim, S. W., and S. J. Kim, 1988. Study on the Estimation of project duty of water and facility capacity in upland irrigation - On the Estimation of Duty of Water for the Upland Crops by the Measurement of Evapotranspiration, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 30(4): 23-44 (in Korean).
- Knebl-Lowrey, M. R., and Z. L. Yang, 2008. Assessing the capability of a regional-scale weather model to simulate extreme precipitation patterns and flooding in central Texas, *Weather and Forecasting* 23(6): 1102-1126.
- Lee, S. S., 2013. The introduction of 3D weather forecast model, 1-4, Climate-Change Research Institute of Korea (in Korean).
- Mishra, S. K., and V. P. Singh, 2003. *Soil conservation service curve number(SCS-CN) methodology*. Kluwer Academic Publisher.
- Nam, W. H., E. M. Hong, M. W. Jang, and J. Y. Choi, 2014. Projection of consumptive use and irrigation water for major upland crops using soil moisture model under climate change, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(5): 77-87 (in Korean).
- Seo, M. C., S. O. Heo, Y. K. Son, H. S. Jo, W. T. Jeon, M. K. Kim, and M. T. Kim, 2012. The development of estimation model(AFKAE0.5) for water balance and soil water content using daily weather data., *Korean Journal of Soil science & Fertilizer* 45(6): 1203-1210 (in Korean).
- Song, J. A., S. J. Lee., M. S. Kang., M. K. Moon., J. H. Lee., J. Kim., 2015. High Resolution atmospheric simulation in Cheongmicheon farmland during the 2014 special observation period, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 15(2): 91-99 (in Korean).
- van Dam, J. C., J. G. Wesseling, R. A. Feddes, P. Kabat, P. E. V. Van Walsum, P. Groenendijk, and C. A. Van Diepen, 1997. Theory of SWAP version 2.0. 11-14. Report 71. Department Water Resources: Wageningen University.
- Yang, M. X., Y. Z. JIANG, X. Lu, H. L. Zhao, Y. T. Ye, Y. TIAN, 2015. A weather research and forecasting model evaluation for simulating heavy precipitation over the downstream area of the Yalong River Basin, *Journal of Zhejiang University* 16(1): 18-37.
- Yoo, S. H., J. Y. Choi, S. H. Lee, Y. G. Oh, and N. Y. Park, 2012. The impact of Climate Change on Paddy Water Demand and Unit duty of water using High-Resolution Climate Scenarios, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(2): 15-26 (in Korean).