



IWMM 모형을 이용한 작물과 토양의 물리적 특성에 따른 관개용수량 변동 특성 분석

Analysis of Irrigation Water Amount Variability based on Crops and Soil Physical Properties Using the IWMM Model

신용철^{*,†}

Shin, Yongchul

Abstract

In this study, we analyzed the variability of irrigation water amounts based on the combination of various crops and soil textures using the Irrigation Water Management Model (IWMM). IWMM evaluates the degree of agricultural drought using the Soil Moisture Deficit Index (SMDI). When crops are damaged by the water scarcity under the drought condition indicating that the SMDI values are in negative (SMDI<0), IWMM irrigates appropriate water amounts that can shift the negative SMDI values to "0" to crop fields. To test the IWMM model, we selected the Bandong-ri (BDR) and Jucheon (JC) sites in Gangwon-do and Jeollabuk-do provinces. We derived the soil hydraulic properties using the near-surface data assimilation scheme from the Time Domain Reflectometry (TDR)-based soil moisture measurements. The daily root zone soil moisture dynamics (R: 0.792/0.588 and RMSE: 0.013/0.018 for BDR/JC) estimated by the derived soil parameters were matched well with the TDR-based measurements for validation. During the long-term (2001~2015) period, IWMM irrigated the minimum water amounts to crop fields, while there were no irrigation events during the rainy days. Also, Sandy Loam (SL) and Silt (Si) soils require more irrigation water amounts than others, while the irrigation water were higher in the order of radish, wheat, soybean, and potato, respectively. Thus, the IWMM model can provide efficient irrigation water amounts to crop fields and be useful for regions at where limited water resources are available.

Keywords: IWMM; SMDI; SWAP; Agricultural Drought

1. 서 론

전 세계적으로 기후변화로 인한 수문순환의 비정상성이 증가하며 기상·농업재해의 피해와 발생빈도가 점진적으로 증가하고 있다. 특히 농업분야는 기상상태에 따라서 영향을 크게 받기 때문에 기후변화로 인한 기상재해에 여전히 취약하다. 우리나라의 농업 형태는 크게 논과 밭 작물로 구분된다. 우리나라의 주식량인 논 작물의 경우 대부분 평야지역에서 담수상태로 이루어지고 있으며, 전체 논농사 지역의 용·배수 공급을 위한 기반시설이 약 80% 정도 갖추어져 있다 (MAFRA, 2012). 그러나 밭작물의 경우 물부족시 관개용수를 위한 비용과 밭작물의 판매 단가를 고려할 경우 이윤 발생 가능성이 낮기 때문에 대부분 필요한 경우에만 개별농가에서 산발적인 관개가 이루어지고 있다. 따라서 밭 재배 지역의

경우 논 재배 지역과 달리 관개시설 및 기술이 매우 열악한 실정이다. 2008년 우리나라의 쌀 생산 자급률은 100% 달성하였으나, 이후 다시 감소하는 추세를 보이고 있다. 이는 기후변화와 같은 외적인 요인보다는 국민의 식생활 패턴의 변화로 인하여 밀과 같은 밀가루 등의 소비가 증가하여 쌀 소비량이 상대적으로 낮아진 것으로 판단된다. 또한 시설원예를 통한 화훼, 과수, 채소 등의 작물 생산을 통한 고소득 농작물의 선호도가 증가하며, 쌀을 제외한 작물들의 생산이 점차적으로 증가하고 있다. 쌀 소비량의 감소와 쌀을 제외한 작물 소비량의 증가를 고려하여, 최근 논 재배 지역에서 밭 작물을 재배하는 환지에 관한 연구가 점차적으로 증가하고 있다. 기후변화로 인한 수자원 변동성의 증가는 노지 밭작물에 큰 영향을 미칠 수 있으므로, 밭 작물 재배지역의 기상·기후특성 토양환경, 작물 종류에 따른 효율적인 물관리 방안이 수립되어야 한다.

고품질의 밭 작물 생산을 위해 물 관리가 매우 중요하나 일반 농민들이 토양수분상태를 고려한 체계적인 물 관리 및 노동력 절감을 위한 토양수분관리의 자동화 등을 고려하는 것은 현실적으로 불가능하다. 최근 여러 전문가들에 의해 밭작물 용수공급을 위한 연구가 수행되었다. Jeon (2010)는 실제 농가에까지 보급되지 못하였던 자동관개시스템을 농가현장

* School of Agricultural Civil & Bio-Industrial Engineering, Kyungpook National University

† Corresponding author

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

E-mail: ycshin@knu.ac.kr

Received: January 20, 2017

Revised: February 15, 2017

Accepted: February 15, 2017

에 적용함과 동시에 오이의 적정관개시점을 구명하는 연구를 수행하였다. Kim et al. (2005)은 제주도 지역별 강우와 토양 특성에 따라 주요재배 작물과 영농특성, 주요 발작물의 용수 사용량 측정/분석을 통하여 제주지역의 농업 용수계획과 지하수 및 지표수 개발계획 수립에 필요한 기초 자료를 도출하였다. Jung et al. (2011)은 농촌진흥청에서 제공하는 물 관리 지침서보다 적은양의 물을 사용하여 작물의 수량 감소가 최소화 되는 물 절약형 관개기준(관개간격 및 1회 관개량) 수립에 관한 연구를 수행하였다. 국립농업과학원에서는 물관리 지침모델 설정을 위해 Pan 증발량을 이용하여 지역별, 시기별 잠재증발산량 추정모형을 개발하였으며, 작물별 및 토양 수분 계수에 의한 실제 증발산 임계점을 토성별로 구명함과 함께 실제 증발산량 추정모형을 개발하였다. 농촌진흥청에서는 작물의 생육 시기별 물공급량 결정과 토양특성에 따른 토양수분의 효율적인 관리를 위하여 발작물 물관리지침서(Eom et al., 1999)를 농민들에게 보급하였다. 또한 Eom et al. (2010)은 봄철 배추작물 재배시 효율적인 관개용수 공급을 위한 관개기준을 설정하였다. Shin and Jung (2014)은 미국 Lubbock 및 Iowa 지역을 대상으로 원격탐사된 토양수분 이미지 자료를 이용하여 밭 작물의 관개용수량을 결정하기 위한 Irrigation Water Management Model (IWMM) 모형을 개발하여 적용하였다. 그러나 현재까지 국내에서는 작물의 생산성을 유지하며 최소한의 물 공급을 위한 최적의 관개기법에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 또한 밭 재배 지역의 경우 논 재배 지역과 달리 비답수 상태에서 영농활동이 이루어지고 있으며, 토양내의 수분함량의 적절한 조절을 통하여 지속적으로 안정적인 작물생산이 이루어져야 한다. 토양내의 수분함량은 기상특성, 토양의 물리적 특성 및 재배 작물 등에 따라 크게 영향을 받는다. 따라서 기상상태, 재배작물 및 토양의 물리적 특성을 고려하여 토양수분을 효율적으로 조절할 수 있는 관개기술의 개발이 시급하다.

본 연구에서는 Irrigation Water Management Model (IWMM, Shin and Jung, 2014) 모형을 이용하여 다양한 작물과 토양의 물리적 특성에 기반한 관개용수량을 산정 및 변동특성을 분석하였다. 연구목적은 1) 밭작물 재배지역에서의 IWMM 모형의 적용성을 평가하고 2) 다양한 작물과 토양특성에 따른 토양수분 및 관개용수량의 변동특성을 분석하였다. 본 연구는 다양한 작물과 토양의 물리적 특성에 따라서 변화하는 관개용수량을 분석하여, 재배환경에 따른 적정 관개용수량을 결정할 수 있다. 본 연구결과는 농업가뭄에 대응하기 위한 수자원의 효율적인 이용에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

II. 재료 및 연구방법

본 연구에서는 Irrigation Water Management Model-IWMM (Shin and Jung, 2014) 모형을 이용하여 토양 및 작물 특성에 따른 효율적인 관개용수량 (irrigation water amount, IWA) 을 산정하였다. 유전자 알고리즘 (Genetic Algorithm)을 기반으로 하는 IWMM 모형은 작물의 수분 스트레스를 산정하여 관개 계획을 결정하고 농작물의 물부족에 의한 가뭄피해를 최소화하기 위하여 개발되었다. IWMM 모형은 토양수분 및 증발산 산정을 위하여 Soil Water Atmosphere Plant-SWAP (Kroes et al., 1999; van Dam et al., 1997) 모형과 연계하였다. SWAP 모형은 실제증산량(T_a)/잠재증산량(T_p)의 비율에 따라 작물의 수분스트레스 (T_a/T_p)를 산정한다. 작물의 수분스트레스 ($T_a/T_p \geq 0.7$)를 초과할 경우, SWAP 모형은 일정량의 관개용수를 지표관개/스프링클러 방식으로 관개한다 (Ines et al., 2005). 그러나 대부분의 현장에서는 수분스트레스 정도를 고려하지 않고, 일정량의 관개용수를 공급하기 때문에 수분스트레스가 크지 않은 경우에는 불필요한 수자원의 손실이 발생하게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위하여, IWMM 모형은 토양수분 기반의 농업가뭄지수 (Soil Moisture Deficit Index-SMDI, Narasimhan and Srinivasan 2005)를 이용하여 수분스트레스를 평가하며, 가뭄(수분스트레스)의 정도에 따라서 가뭄피해를 최소화할 수 있는 관개용수량을 산정하여 작물에 공급한다. Fig. 1은 IWMM 모형의 모식도를 나타낸다. 유전자 알고리즘과 연계된 IWMM 모형은 관개시 SMDI 값이 "0"이 될 수 있는 정도의 최소한의 관개용수량을 산정한다. 농업가뭄지수는 식 (1)과 식 (2)과 같다.

$$SMDI_m = 0.5 \times SMDI_{m-1} + \frac{SD_m}{50} \quad (1)$$

$$SD_{l,m} = \begin{cases} \frac{SW_{l,m} - MSW_m}{MSW_m - \min SW_m} \times 100, & \text{if } SW_{l,m} = MSW_m \\ \frac{SW_{l,m} - MSW_m}{\max SW_m - MSW_m} \times 100, & \text{if } SW_{l,m} > MSW_m \end{cases} \quad (2)$$

여기서 $SD_{l,m}$: 토양수분 부족량(%), $SW_{l,m}$: 주별 평균 토양수분 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), MSW_m : 장기간의 주별 중간값 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), $\max SW_m$: 장기간의 주별 최대값 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), $\min SW_m$: 장기간의 주별 최소값 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), l : 모의기간(2001~2015), 및 $m=(1\sim 52)$ 주(일년)이다. 주별 SMDI는 -4에서 +4의 범위로 나타내며 극한 상황의 건조 및 습윤 상태를 의미한다.

IWMM 모형은 SMDI 값이 물과잉 및 물부족이 발생하

지 않는 SMDI="0" ($SMDI_{obs}$)이 될 정도의 관개용수량 ($k = \{IWA_{i=1, \dots, N}\}$)을 EMOGA를 이용하여 산정한다. EMOGA는 관개후 모의된 토양수분 기반 농업가뭄지수 ($SMDI_{sim}$)와 $SMDI_{obs}$ 값이 최소화 되는 관개용수량을 결정하며, 주어진 앙상블 (ensemble, e) 횟수에 따른 불확실성 구간을 산정한다. 목적함수 ($Z(k)$)와 Fitness 함수는 공식 (3)과 (4)과 같다.

$$Z(k)_e = \text{Min} \left\{ \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |SMDI_{obs} - SMDI_{sim}(k)|_{e,i} \right\} \forall e \quad (3)$$

$$\text{Fitness}(k)_e = \text{Max}[Z(k)_e]^{-1} \quad (4)$$

여기서, N: 최대 관개일수, e: 앙상블 (ensemble) 횟수, θ_{obs} : 실측 토양수분 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{sim} : 모의 토양수분 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) 및 T: 일별 최대 모의 일수 (day)를 나타낸다.

IWMM 모형은 토양의 수리학적 매개변수와 작물 정보를 이용하여 토양층의 토양수 흐름을 모의한다. 본 연구에서는 토양수분자료동화기법 (soil moisture data assimilation, Ines and Mohanty, 2008a,b; Shin and Mohanty, 2013; Shin et al., 2016)을 이용하여 토양의 수리학적 매개변수를 실측 토양수분으로부터 추출하였다. 작물 정보는 실측 자료를 사용하였으며 토양의 수리학적 매개변수 ($\alpha, n, \theta_{res}, \theta_{sat}, K_{sat}$)와 관개용수량 (IWA)의 탐색 범위는 Table 1과 같다.

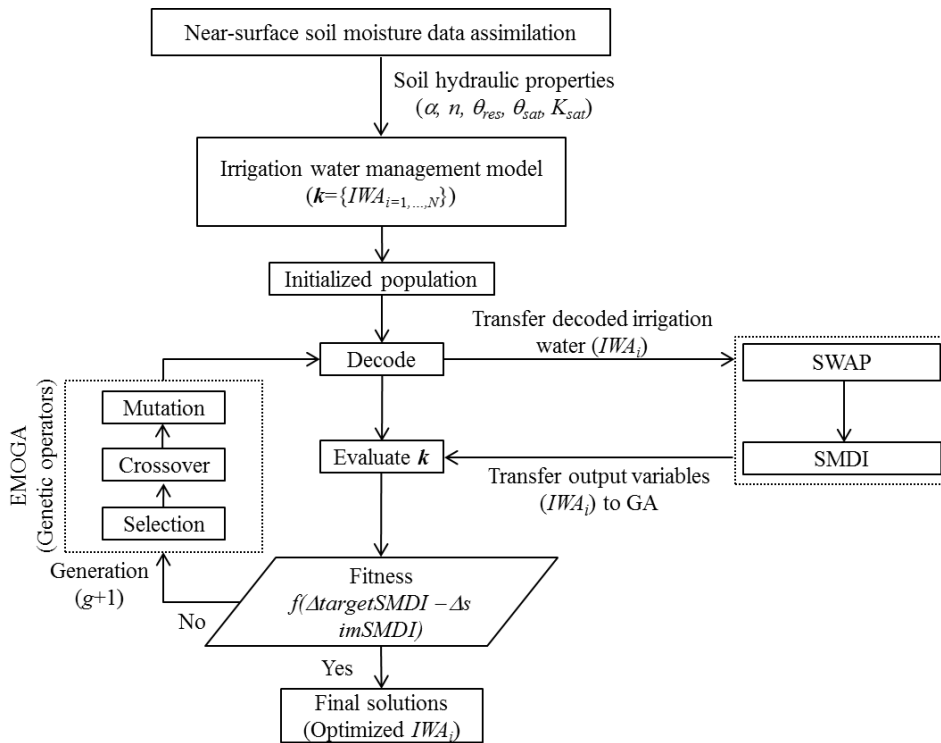


Fig. 1 Flow chart of the Irrigation Water Management Model (IWMM)

Table 1 Constrained ranges of genetic algorithm

GA types	Parameters	Minimum values	Maximum values	Pcreep	Pmutate	Pcross	Polulation size	No. generation	Seed No.
GA-SWAP	α	0,006	0,033	0.5	0.05	0.5	10	200	1000 2000 3000
	n	1,2	2,1						
	θ_{res}	0,061	0,16						
	θ_{sat}	0,37	0,55						
	K_{sat}	1,84	100						
EMOGA (P**)	$IWA_{i=1, \dots, N}$	0	100	0.5	0.05	0.5	10	30	2574

1. Soil Water Atmosphere Plant (SWAP) 모형

Richard 공식을 사용하는 Soil-Water-Atmosphere-Plant (SWAP, Belmans et al., 1983; van Dam et al., 1997) 모형은 토양의 물리적 특성에 기반하여 토양층에서 1차원의 토양수 흐름을 해석하며, 공식 (5)과 (6)와 같다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial [K(h) (\frac{\partial h}{\partial z} + 1)]}{\partial z} - S(h) \quad (5)$$

여기서, θ : 토양수분 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), K : 수리전도도 (cm d^{-1}), h : matric potential (cm), z : 토양깊이 (cm), t : 시간 (d), C : 편미분 기반의 토양수분 함수 (cm^{-1}), $S(h)$: 작물에 흡수되는 실제 토양수분 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3} \text{d}^{-1}$)을 나타낸다.

$$S(h) = \alpha_w(h) \frac{T_{pot}}{Z_r} \quad (6)$$

여기서, T_{pot} : 잠재증산량 (cm d^{-1}), Z_r : 뿌리 깊이 (cm), 및 α_w : 물부족시 압력수두 (h)에 따른 토양수분 감소계수 (Feddes et al., 1978)을 나타낸다. Mualem (1976)과 van Genuchten (1980)은 Richard 공식에 분석기법 (analytical expression)을 적용하여 공식 (9)와 (10)을 유도하였으며, SWAP 모형은 공식 (7)와 (8)을 이용하여 토양수분을 산정한다.

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} = \left[\frac{1}{1 + |\alpha h|^n} \right]^m \quad (7)$$

$$K(h) = K_{sat} S_e^2 [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (8)$$

여기서, S_e : 상대적인 포화도 (-), θ_{res} : 물부족시 토양층에 남아있는 토양수분 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{sat} : 강우시 토양층의 포화상태인 토양수분 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), α , n , m , 및 λ : 형상계수, 및 K_{sat} : 포화상태인 수리전도도 (cm d^{-1}), 및 $m=1-1/n$ 을 나타낸다.

SWAP 모형은 기상입력자료 (강수량, 최고 및 최저 온도, 습도, 일사량, 풍속)와 함께 다양한 지표 및 토양하부의 경계 조건을 모의 할 수 있으며, WOFOST 작물성장모듈과 관개배수모듈을 연계하여 다양한 시나리오에 따른 토양수분을 모의 할 수 있다 (van Dam et al., 1997; van Dam, 2000). 또한 Penman Monteith 공식을 이용하여 토양과 작물의 증발량과 증산량을 각각 산정하여 일별 증발산량을 모의 한다.

본 연구에서 전체 토양층의 깊이는 0~200 cm로 하였으며,

지표면으로부터 0~10 cm까지는 1 cm 깊이의 토양층 10개, 10~60 cm까지는 5 cm 깊이의 토양층 10개, 60~180 cm까지는 10 cm 깊이의 토양층 12개 및 180~200 cm까지는 20 cm 깊이의 토양층 1개로 구성하였다.

2. Ensemble Multiple Operators Genetic Algorithm (EMOGA)

유전자 알고리즘 (Genetic Algorithm-GA, Holland, 1975; Goldberg, 1989)은 자연선택설에 기반하여 실측값에 근사한 매개변수를 산정하는 최적화 알고리즘이다. 유전자 알고리즘은 10진수로 표현되는 유전자 (매개변수)를 2진수로 변환하여 GA operator를 통해 새로운 유전자를 재생산한다. GA operator는 선택 (selection), 교배 (crossover) 및 변이 (mutation) 과정으로 구성되며, 세대 (generation)를 구성하는 개체 (individual chromosome)들의 집합인 개체군 (population)에서 가장 우수한 유전자를 선택하여, 교배 및 변이를 통해서 새로운 유전자를 재생산한다. 실측값과의 적합도 (fitness)가 높은 유전자를 선택, 교배 및 변이 하여 더욱 우수한 (실측에 가까운) 유전자 (해)를 찾아낸다. 본 연구에서 유전자는 관개용수량 ($k=\{IWA_{i=1, \dots, N}\}$)으로 구성되며, 목적함수 (Z)와 적합도 (Fitness)는 공식 (3)과 (4)와 같다. 토양수분모형 (SWAP)의 토양의 수리학적 매개변수를 산정하기 위한 역추적기법과 유전자 알고리즘을 연계한 다양한 연구가 수행되었다 (Ines and Mohanty, 2008a; 2008b; 2009, Shin et al., 2012; Shin and Mohanty, 2013). 그러나 유전자 알고리즘은 찾아야 할 매개변수의 개수와 초기값 (initial seed number)의 위치에 따라 해를 찾는 탐색능력 (search ability)이 큰 영향을 받는다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 Shin and Mohanty (2013)는 Ensemble Multiple Operators Genetic Algorithm (EMOGA)를 개발하였다. EMOGA는 주어진 세대 (generation)안에서 찾아야 할 매개변수의 개수에 따라서 탐색공간을 확장하여 해를 찾는다. 또한 Monte Carlo 기반의 앙상블 (ensemble: e) 기법을 연계하여 다양한 초기값을 이용하여 유전자 알고리즘의 탐색능력을 향상시켰다. Monte Carlo 기반의 앙상블 기법 기반의 EMOGA는 단일 해가 아닌 앙상블 (ensemble, e=3)에 따른 다수의 해를 찾아낸 후, 다수의 해의 통계치를 이용하여 찾아낸 매개변수의 불확실성 구간을 산정한다. EMOGA에 관한 자세한 설명은 Shin and Mohanty (2013)의 논문 참조하기 바란다.

III. 연구유역 및 실험방법

IWMM 모형을 이용하여 다양한 작물과 토양의 물리적 특

성에 따른 관개용수량을 산정하기 위하여 강원도 춘천시 방동리 (Site 1) 지점과 전라북도 용담댐 유역 주천 (site 2) 지점을 선정하였다 (Fig. 2). 방동리 지점에서는 무 작물을 2011년 4월 29일에 파종하여 7월 25일에 수확하였으며 처음 뿌리의 길이는 10 cm로 최대 30 cm까지 성장하였다. 무 재배지역에서의 토양수분 실측은 2011년 3월 23일부터 4월 21일까지 Time Domain Reflectometry (TDR) 장비를 이용하여 측정

하였으며, 3월부터 7월까지 자기우량계를 이용하여 강수량을 실측하였다(2011년도 새만금 조사연구, 2011). 측정된 일별 실측 토양수분과 강수량 자료를 이용하여 토양수분자료 동화기법을 검보정 및 토양의 수리학적 매개변수를 실측 토양수분으로부터 추출하였다. 용담댐 유역의 주천 지점은 한국수자원공사에서 2013년부터 현재까지 잔디가 우세한 지표피복 (native grass)에서 토양수분을 실측하여 자료를 제공하고 있다. SWAP 모형의 경우 겨울철 해빙현상을 고려하지 않기 때문에 잔디의 모의기간은 3월 1일~10월 31일로 설정하였다. 본 연구에서는 2015년도에 측정된 토양수분으로부터 토양의 수리학적 매개변수를 추출하였다. 토양의 수리학적 매개변수는 시간에 따라 크게 변하지 않는다는 가정하에 2001~2015년까지 15년간의 춘천 및 주천 지점 인근에 위치하고 있는 전주 기상청으로부터 기상자료를 수집하여 장기간의 토양수분 및 가뭄을 평가하였다. 이후 IWMM 모형을 이용하여 장기간의 관개용수를 산정하여 분석하였다. 또한 미국 UNSODA (Leij et al., 1999)에서 제공하는 9개 토양특성 (Sandy Loam-SL, Loam-L, Silt-Si, Silt Loam-SiL, Sandy Clay Loam-SCL, Clay Loam-CL, Silty Clay Loam-SiCL, Silty Clay-SiC, Clay-C)과 4개 작물 (무, 콩, 감자, 옥수수)의 조합에 따라 36개의 다양한 시나리오를 구성하여 작물과 토양의 물리적 특성에 따른 관개용수량 변화를 분석하였다. 작물과의 성장기간과 토양의 물리적 특성은 Table 2 및 Fig. 3과 같다. Fig. 3에 나타난 것처럼 9개 토양특성은 모래와 점토질 사이의 토양수분함량과 수리전도도의 범위를 나타낸다. 방동리 무 작물 재배지점에서 자기우량계를 이용하여 측정된

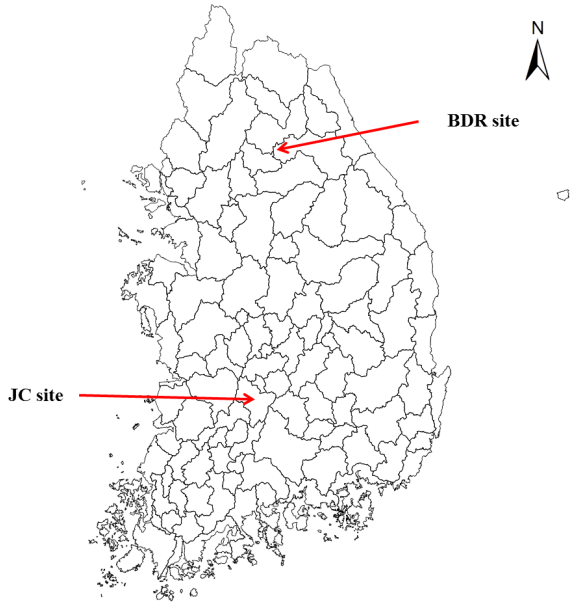


Fig. 2 The bangdong-ri (BDR) and Jucheon (JC) sites in Gangwon-do and Jeollabuk-do provinces

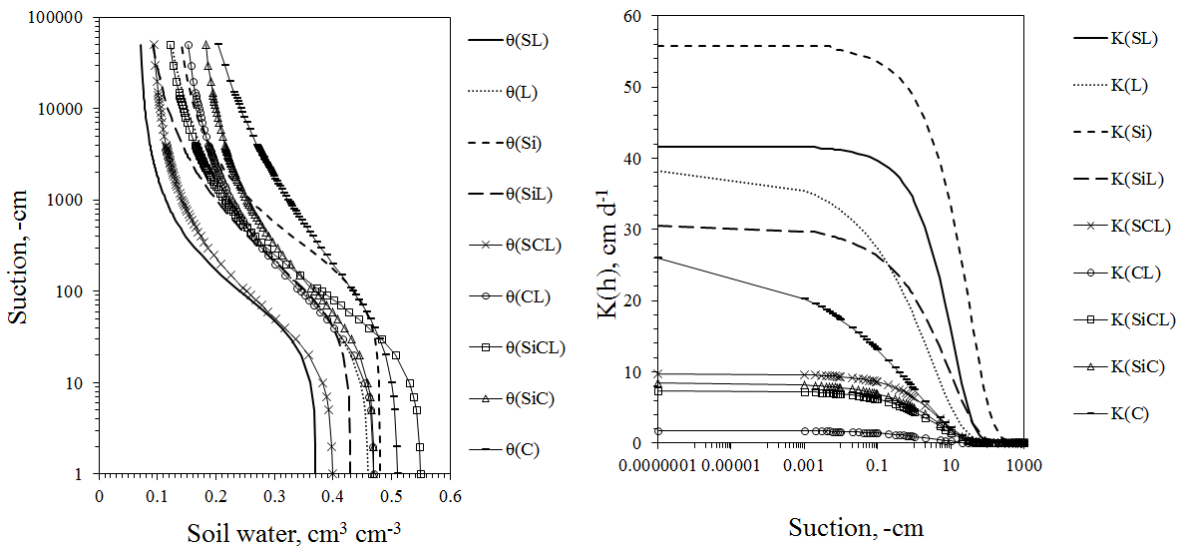


Fig. 3 The water retention (q(h)) and hydraulic conductivity (K(h)) functions for 9 soil textures from the UNSODA^a database (USA)
^aLeij et al. (1999)

강우량과 춘천기상청에서 제공하는 강우를 제외한 기상자료를 수집하여 SWAP 모형의 입력자료로 활용하였다. 용담댐 유역 주천 지점자료는 한국수자원공사에서 운영하는 강우관측자료를 이용하였으며 강우자료를 제외한 기상자료는 인근 춘천기상청의 자료를 수집하여 입력자료로 사용하였다. IWMM 모형을 이용한 관개용수 공급시 관개일수는 5일 간격으로 하였다 (Shin and Jung, 2014). 방동리와 주천 지점의 토양층의 초기 및 하부토양층의 초기 지하수위는 실측되지 않았다. 따라서 지하수위가 지표면으로부터 -100, -200, 및 -300 cm 일 때 토양수분자료동화기법의 모의값과 실측값의 적합도가 가장 높은 -300 cm을 선택하였다.

Table 2 Crop information

Crops	Sowing/Harvesting dates
Radish	April 29th/July25th
Grass	March 1th/October31th
Soybean	May 5th/October10th
Wheat	May 5th/October10th
Potato	May 5th/October10th

IV. 결과 및 고찰

본 연구에서는 IWMM 모형을 이용하여 다양한 작물과 토양의 물리적 특성에 따라 노지 발작물의 관개용수량을 산정하였다. 방동리와 주천지역의 실측된 토양수분자료로부터 토양수분자료동화기법을 이용하여 토양의 수리학적 매개변수를 도출하였으며, 도출된 매개변수와 IWMM 모형을 이용하여 2001~2015년 까지 장기간의 일별 토양수분 및 농업가뭄을 평가하여 물부족시 최적의 관개용수량을 산정하였다. 또한 UNSODA에서 제공하는 9지 토양특성과 다양한 작물(무, 밀, 감자, 옥수수)을 이용하여 작물과 토양 특성에 따른 관개용수량의 변동특성을 분석하였다.

1. 토양수분자료동화기법의 검증

토양수분자료동화기법을 이용하여 IWMM 모형의 입력자료인 토양의 수리학적 매개변수를 도출하고 근역층(0~30 cm)의 일별 토양수분을 산정하였다. Fig. 4는 방동리와 주천 지점에서 관측된 TDR 기반의 실측 토양수분과 토양수분자료동화기법 기반의 매개변수를 이용하여 산정된 토양수분 모

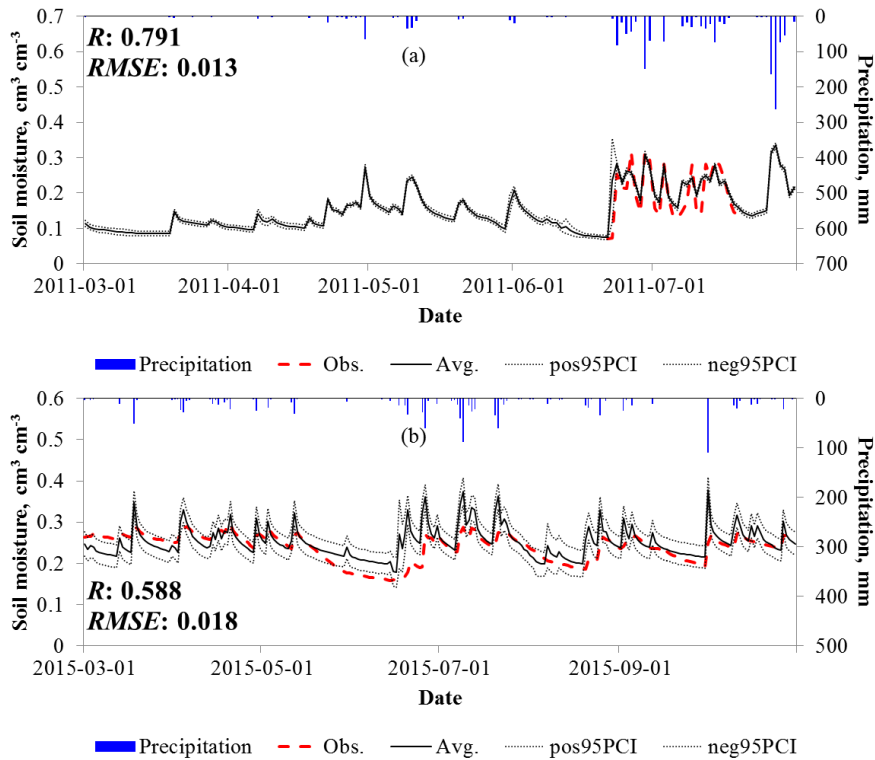


Fig. 4 Comparison of the TDR^a-based and estimated^b root zone (0~30 cm) soil moisture dynamics; (a) Bangdong-ri site (2011) and (b) Jucheon site (2015)

^aTDR—Time Domain Reflectometry theta probe

^bNear-surface soil moisture data assimilation scheme (Ines and Mohanty, 2008a)

의값을 나타낸다. 비록 모의값의 불확실성이 나타났지만, 전체적으로 방동리 (R: 0.794 및 RMSE: 0.013)와 주천 (R: 0.588 및 RMSE: 0.018) 지점의 모의값과 실측값이 일치하는 것으로 나타났으며, 근역층의 토양수분 값이 강우사상을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 방동리 지점과 비교하여 주천지점 모의값의 불확실성(R 및 RMSE)이 상대적으로 높게 나타났다. 주천지점에서 6월 17일부터 6월 20일까지 총 4일간 3번(17일: 14 mm, 19일: 14 mm, 20일: 30 mm)의 강우사상과 함께 총 61 mm 강우가 발생하였으나, 실측된 TDR 기반의 토양수분이 강우발생에 반응정도가 매우 낮게 나타났다. 따라서 실측된 토양수분 자료의 실측오차가 모의값에 불확실성에 영향을 미친 것으로 판단되었다. 상대적으로 방동리지점의 경우 단기간동안 토양수분이 실측되었지만, 강우발생 및 강우량을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 주천지점과 비교하여 방동리 지점의 토양수분이 전체적으로 낮은 것으로 나타났다. 방동리와 주천 지점의 토양은 각각 SiL (모래: 24.9 %, 실트: 51.9 %, 점토: 23.2 %) 및 SiCL (모래: 15.4 %, 실트: 51.3 %, 점토: 33.3 %)이며, 유사한 토양특성을 가지고 있다 (토양환경정보시스템). 그러나 잔디로 피복되어 있는 주천지점과 달리 무를 재배하는 방동리 지점의 경우 비록 SiL 토양을 가지고 있지만 경운 등의 농업 활동으로 인하여 토양이 교란되기 때문에 상대적으로 주천지점보다 방동리 지점의 토양의 수분 보유력이 낮은 것으로 나타났다. Table 3에 나타난 토양수분자료동화기법을 이용하여 실측된 토양수분으로부터 도출된 토양의 수리학적 매개변수 값은 이러한 특성을 잘 반영한다. 방동리 지점의 경우 포화상태에서의 수리전도도 (K_{sat})은 94.7 mm/day로 나타나, 주천 지점의 34.6 mm/day와 비교하여 2~3배 이상 빠른 침투율을 나타냈다. 따라서 토양수분을 이용하여 관개용수량을 산정할 경우 농업 활동으로 인한 토양의 교란 특성이 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

2. 장기간의 농업가뭄평가

토양수분자료동화기법을 이용하여 산정된 매개변수를 이용하여 장기간(2001~2015)의 일별 토양수분을 모의 및 농업가뭄 (SMDI)을 평가하였다. Fig. 5는 방동리와 주천지점의

연도별 총강우량을 나타낸다. 2개 지점의 연도별 강우량은 유사한 특성을 보였으나, 방동리와 주천 지점의 연도별 최대 및 최소강우량은 각각 2011 (2,029.3 mm) 및 2014 (677.4 mm)년 그리고 2003 (1,860.3 mm)년 및 2008 (1,000.0 mm)년으로 나타났다. Fig. 6은 방동리 및 주천 지점의 2011 및 2014년의 자연강우상태와 IWMM 모형을 이용하여 최적의 관개용수를 공급한 상태의 토양수분을 나타낸다. 방동리 및 주천 지점에서 2011/2014년 및 2003/2008년의 관개일수는 각각 12/22 및 5/23회로 나타났으며, 총 관개용수량은 각각 195/659 mm 및 43/568 mm로 최소 강우가 발생한 방동리 지점의 2014년과 주천 지점의 2008년의 관개용수량이 최대 강우가 발생한 기간보다 3~4배 이상 높게 나타났다. 전체적으로 2개 지점에서 강우발생기간에는 관개가 발생하지 않았으나, 무 강우 혹은 적은 강우가 발생하는 기간동안 IWMM 모형은 최소한의 관개용수를 공급하는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 방동리와 주천지점에서 자연강우 및 IWMM 기반의 최적의 관개용수 공급시 산정된 농업가뭄지수 (SMDI)를 나타낸다. 방동리와 주천 지점에서 무 작물과 잔디의 생육기간동안 자연강우에만 의존할 경우 구간별로 농업가뭄지수가 -값을 나타내며 농업가뭄이 발생하는 것으로 나타났다. 전체적으로 농업가뭄은 적은 강우가 발생한 방동리와 주천지점의 2014년 및 2008년의 SMDI의 -값이 2001년 및 2003년에 비해 상당히 높은 것으로 나타났다. Fig. 6에 나타난 것처럼

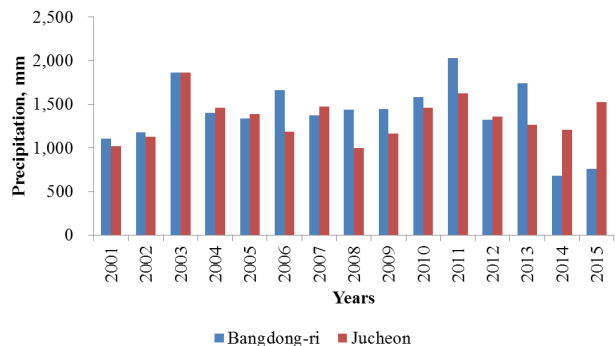


Fig. 5 The yearly averaged precipitation amounts from 2001 to 2015 for the Bandong-ri and Jucheon sites

Table 3 The soil hydraulic properties derived by the near-surface data assimilation scheme for the Bandong-ri (BDR) and Jucheon (JC) sites

Site	Statistics	α	n	θ_{res}	θ_{sat}	K_{sat}
BDR	Avg.	0.031	2,075	0.063	0.372	94.7
	SD	0.001	0.026	0.003	0.004	4.2
JC	Avg.	0.025	1,852	0.136	0.399	34.6
	SD	0.005	0.093	0.024	0.030	22.4

IWMM 모형을 이용하여 관개 할 경우 농업가뭄지수가 “0”에 근접하며 물 부족으로 인한 농업가뭄피해를 최소화 하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 방동리와 주천 지점의 장기간 (2001~2015년)의

연도별 총 강우량과 관개용수량을 나타낸다. 전체적으로 연도별 총 관개량은 강우량과 반비례하는 것으로 나타났으며, 특히 무작물을 재배하는 방동리 지점의 경우 더 많은 관개용수량이 필요한 것으로 나타났다. 주천지점의 경우 지표상태

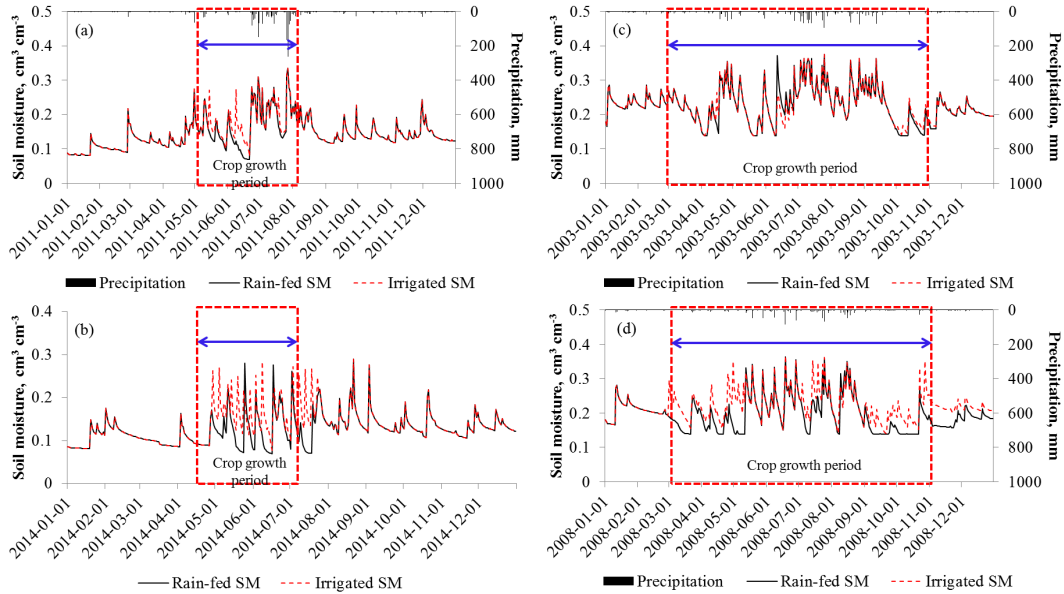


Fig. 6 Comparisons of the ensemble^a-averaged root zone soil moisture dynamics derived by IWMM under the rain-fed and irrigated conditions; (a-b) wet (2011) and dry (2014) years for the Bangdong-ri (BDR) site and (c-d) wet (2003) and dry (2008) years for the Jucheon (JC) site

^aNo. of ensemble: 3

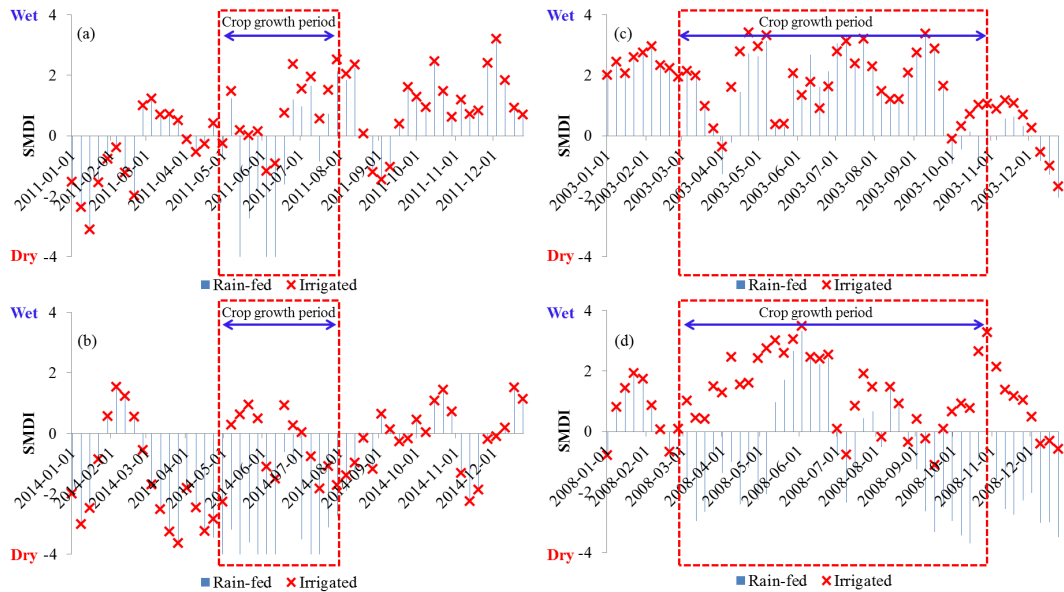


Fig. 7 Comparisons of the ensemble^a-averaged soil moisture deficit index (SMDI) derived by IWMM under the rain-fed and irrigated conditions; (a-b) wet (2011) and dry (2014) years for the Bangdong-ri (BDR) site and (c-d) wet (2003) and dry (2008) years for the Jucheon (JC) site

^aNo. of ensemble: 3

가 잔디로 피복되어 있고 농업활동에 의한 토양의 교란현상이 발생하지 않기 때문에, 지표면에서 증발산의 형태로 발생하는 수분의 손실이 상대적으로 무 재배지점보다 낮은 것으로 판단되었다. 그러나 수분 손실량은 재배 지점에서 증발산 실측 장비를 이용한 연구가 추후에 수행되어야 할 것으로 판단되었다. 방동리와 주천지점의 연도별 관개용수량의 변동은 각각 약 500~1,500 mm 및 1,000~1,500 mm 정도로 상당히 높게 나타났다. 우리나라의 경우 연도별 강수량 (Fig. 5)의 변화가 상당히 크기 때문에 이러한 IWMM 모형이 이러한 강수량 특성을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 따라서 기후변화로 인하여 농업가뭄 발생시 IWMM 모형이 피해를 최소화하는데 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4는 방동리 지점을 대상으로 다양한 작물 (밀, 감자, 무, 콩)과 토양특성에 따른 장기간 (2001~2015년)의 IWMM 기반의 모의된 관개용수량의 통계치를 나타낸다. 전체적으로 토양특성에 따라 관개용수량의 변화가 크게 나타났다. 작물중에서 무, 밀, 콩 및 감자 순서로 물부족시 관개용수량이 높은 것으로 나타났으며, 토양특성에 따라서 SL과 Si 토양에서 상대적으로 관개용수량이 다른 토양에 비교하여 상대적으로

로 높게 나타났다. 전체적으로 점토 토양이 적고 실트 및 모래 토양이 많아 질수록 관개용수량이 증가하였으며, 작물과 비교하여 토양의 물리적 특성이 관개용수량에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 토양의 물리적 특성은 토양의 보수력, 투수계수 등을 결정하기 때문에 토양층의 수분 증가·감소하는 정도에 직접적으로 영향을 미친다. 따라서 작물과 비교하여 토양의 물리적 특성이 관개용수량에 미치는 영향이 상대적으로 높은 것으로 판단되었다.

V. 결 론

본 연구에서는 IWMM 모형을 이용하여 다양한 작물과 토양의 물리적 특성에 따른 관개용수량의 변동특성을 분석하였다. IWMM 모형은 농업가뭄지수 (SMDI)를 이용하여 농업가뭄의 정도를 산정한다. 가뭄시 물부족 (SMDI < 0)으로 인한 작물의 피해가 발생할 경우 농업가뭄지수 SMDI 값이 '0'에 근접하도록 관개용수를 공급하여 작물의 피해를 최소화한다. IWMM 모형의 적용성 평가를 위하여 강원도 춘천 방

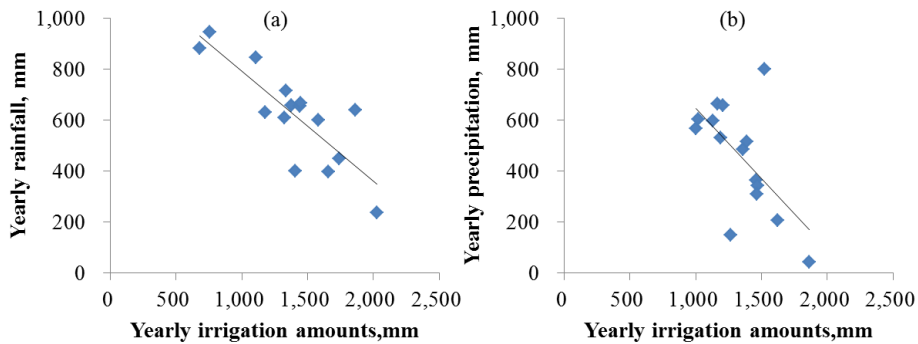


Fig. 8 Scatter plots between the yearly precipitation and irrigated water amounts; (a) Bandong-ri site and (b) Jucheon site

Table 4 The statistics of IWMM-based yearly irrigation amounts for various vegetation and soil textures for the Bandong-ri (BDR) site

Soil Textures	Wheat		Potato		Radish		Soybean	
	Avg.	SD	Avg.	SD	Avg.	SD	Avg.	SD
C	119	98	127	89	146	98	157	150
CL	139	149	160	159	103	133	168	126
L	119	126	129	124	122	99	152	153
SCL	119	124	130	95	164	107	172	140
Si	491	127	143	120	298	112	153	126
SIC	134	125	130	98	124	99	172	121
SiCL	126	110	155	144	108	110	173	130
SiL	114	113	119	105	180	111	132	137
SL	244	140	128	102	433	148	150	134

동리와 전라북도 용담댐 주천 지점을 선택하였다. 토양수분 자료동화기법을 이용하여 방동리 및 주천 지점의 TDR 기반 토양수분 자료로부터 토양의 수리학적 매개변수를 도출하였으며, 도출된 매개변수 기반의 모의값 (R: 0.791/0.588 및 RMSE: 0.013/0.018)이 실측값을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 방동리와 주천 지점은 유사한 토양특성을 가지고 있으나, 주천지점과 비교하여 방동리 지점의 토양수분이 전체적으로 낮은 것으로 나타났다. 이는 잔디로 피복되어 있는 주천지점과 달리 무를 재배하는 방동리 지점에서는 경운 등의 농업 활동으로 토양이 교란된다. 농업활동에 의한 토양의 교란으로 인하여 상대적으로 주천지점보다 방동리 지점의 토양의 수분 보유력이 낮은 것으로 나타났다. 따라서 토양층의 수분 정도에 따라 관개용수량을 결정할 경우 농업 활동으로 인한 교란되는 토양특성을 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다. 장기간 (2001~2015)의 토양수분을 산정하여 농업가뭄을 평가하였으며, 강우기간을 제외한 무강우 혹은 적은 강우가 발생하는 기간에만 물부족에 의해 피해를 최소화 할 수 있는 정도의 관개용수를 공급하는 것으로 나타났다. 또한 방동리 지점에서 다양한 토양 및 작물을 대상으로 관개용수량을 산정한 결과 SL과 Si 토양에서 상대적으로 관개용수량이 다른 토양보다 높게 나타났다. 또한 작물의 경우 무, 밀, 콩 및 감자 순서로 관개용수량이 높은 것으로 나타났다. 본 연구에서 제한한 IWMM 모형을 이용하여 노지 밭작물에 효율적인 관개용수를 공급할 수 있으며, 특히 가뭄이 심하고 물이 부족한 지역에서 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 판단되었다.

사 사

이 성과는 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2016R1D1A3B03932106).

REFERENCES

1. Belmans, C., J. G. Wesseling, and R. A. Feddes, 1983. Simulation of the water balance of a cropped soil. SWATRE. *J. Hydrol.* 63: 271-286.
2. Eom, K. C., S. K. ha, S. O. Hur, Y. S. Jung, and K. S. Ryu, 1999. Soil Water. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42: 102-125.
3. Eom, K. C., P. K. Jung, M. H. Koh, S. H. Kim, S. Y. Yoo, S. H. Park, S. O. Hur, and S. K. Ha, 2010. Water saving irrigation manual of spring chinese cabbage, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(6): 812-822.
4. Feddes, R. A., P. J. Kowalik, and H. Zarandy, 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs. Pudoc. Wageningen, The Netherlands.
5. Goldberg, D. E., 1989. Genetic algorithms in search and optimization and machine learning. Addison-Wesley Publishing Co Inc, USA.
6. Holland, J. H., 1975. On quantifying agricultural and water management practices from low spatial resolution RS data using genetic algorithms: a numerical study for mixed pixel environment. *Adv Water Resour.* 28: 856-870.
7. Ines, A. V. M. and K. Honda, 2005. On quantifying agricultural and water management practices from low spatial resolution RS data using genetic algorithms: A numerical study for mixed-pixel environment. *Adv. Water Resour.* 28: 856-870.
8. Ines, A. V. M. and B. P. Mohanty, 2008a. Near-surface soil moisture assimilation to quantify effective soil hydraulic properties using genetic algorithm. I. Conceptual modeling. *Water Resour. Res.* 44: doi:10.1029/2007WR005990.
9. Ines, A. V. M. and B. P. Mohanty, 2008b. Near-surface soil mMoisture assimilation for quantifying effective soil hydraulic properties using genetic algorithms: II. Using airborne remote sensing dyring SGP97 and SMEX02. *Water Resour. Res.* 45: doi:10.1029/2008WR007022.
10. Ines, A. V. M. and B. P. Mohanty, (2009), Near-surface soil moisture assimilation for quantifying effective soil hydraulic properties using genetic algorithms: II. Using airborne remote sensing dyring SGP97 and SMEX02. *Water Resour. Res.* 45: doi:10.1029/2008WR007022.
11. Jeon, S., 2010. Optimum conditions of automatic irrigation control system and irrigation for cucumber cultivation under greenhouse, Ph.D Dissertation. Major in Agricultural Chemistry, Chungbuk National Univerity.
12. Jung, P. K., K. C. Eom, Y. K. Son, M. H. Koh, S. H. Kim, S. H. Park, and S. Y. Yoo, 2011. Water saving irrigation manual of autumn chinese cabbage. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(5): 679-687.
13. Kim, H. S., Y. I. Lee, B. K. Kang, C. K. Song, and T. K. Jun, 2005. Analysis of irrigation water use for upland crops in Jeju. *KCID.* 12(1): 50-59.
14. Kroes, J. G., J. C. van Dam, J. Huygen, and R. W. Vervoort, 1999. User's guide of SWAP version 2.0; Simulation of water, solute transport, and plant growth in the Soil-Atmosphere-Plant environment, Wageningen Agricultural University, Report 81, DLO Winand Staring Centre. Technical Document, pp. 53-128.
15. Leijf, F. J., W. J. Alves, M. T. van Genuchten, and J. R. Williams JR, 1999. The UNSODA unsaturated soil hydraulic database, in Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media. edited by M. T. Van Genuchten et al., Univ. of Calif., Riverside, USA, pp. 1269-1281.
16. Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs, 2012. Food,

- agriculture, forestry and fisheries statistical yearbook.
17. Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12: 513-522.
 18. Narasimhan, B. and R. Srinivasan, 2005. Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and Evapotranspiration deficit index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agric. Forest Meteorol.* 133: 69-88.
 19. Shin, Y., B. P. Mohanty, and A. V. M. Ines, 2012. Soil hydraulic properties in one-dimensional layered soil profile using layer-specific soil moisture assimilation scheme. *Water Resour. Res.* 48: W06529, doi:10.1029/2010WR009581.
 20. Shin, Y. and B. P. Mohanty, 2013. Development of a deterministic downscaling algorithm for remote sensing soil moisture footprint using soil and vegetation classifications. *Water Resour. Res.* 49. doi: 10.1002/wrcr.20495.
 21. Shin, Y. and Y. Jung, 2014. Development of irrigation water management model for reducing drought severity using remotely sensed soil moisture footprints, *J. Irrig. Drain. Eng.* 140(7): 1-11.
 22. Shin, Y., K. S. Choi, Y. Jung, J. E. Yang, and K. J. Lim, 2016. Soil moisture estimation and drought assessment at the spatio-temporal scales using remotely sensed data: (I) Soil moisture, *J. Korean Soc. Water Envir.* 32(1): 60-69.
 23. van Genuchten, M. T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *J. Soil Sci Soc Am.* 44: 892-898.
 24. van Dam, J. C., J. Huygen, J. G. Wesseling, R. A. Feddes, P. Kabat, P. E. V. van Waslum, P. Groenendijk, and C. A. van Diepen, 1997. Theory of SWAP version 2.0: Simulation of water flow and plant growth in the soil water-atmosphere-plant environment. Tech. Doc. 45, Wageningen Agric.Univ., and DLO Winand Staring Cent., Wageningen, Netherlands.
 25. van Dam, J. C., 2000. Field-scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation and case studies. Ph.D dissertation, Wageningen Univ., Wageningen, the Netherlands.