



다양한 토양의 물리적 특성과 작물에 따른 발작물 관개용수량 산정

Estimation of Irrigation Water Amounts for Farm Products based on Various Soil Physical Properties and Crops

이태화* · 신용철*†
Lee, Taehwa · Shin, Yongchul

Abstract

Crop damages due to agricultural drought has been increased in recent years. In Korea, water resources are limited indicating that proper management plans against agricultural drought are required for better water-use efficiency in agriculture. In this study, irrigation intervals and amounts for various crops and soil physical properties (sandy and silt loams) were estimated using the IWMM model. Five different crops (soybean, radish, potato, barley and maize) at the Bangdong-ri site in Chuncheon were selected to test the IWMM model. IWMM assessed agricultural drought conditions using the soil moisture deficit index (SMDI), and irrigation intervals and amounts were determined based on the degree of agricultural drought (SMDI). Additionally, we tested the effects of surface irrigation and sprinkler irrigation methods and various irrigation intervals of 2, 3, 5 and 7 days. In our findings, the irrigation intervals of 5 and 7 days showed the minimum irrigation amounts than others. When we considered that the intervals of 3 or 5 days are usually preferred to fields, the interval of 5 days was determined in our study. The estimated irrigation amounts for different crops were shown as maize > radish > barley > soybean > potato, respectively. The irrigation amounts for maize and barley were highly affected by soil properties, but other crops have less differences. Also, small differences in irrigation amounts were shown between the surface and sprinkler irrigation methods. These might be due to the lack of consideration of water loss (e.g., evapotranspiration, infiltration, etc.) in IWMM indicating model structural uncertainties. Thus, possible water loss (e.g., evapotranspiration, infiltration) need to be considered in application to fields. Overall, IWMM performed well in determining the irrigation intervals and amounts based on the degree of agricultural drought conditions (SMDI). Thus, the IWMM model can be useful for efficient agricultural water resources management in regions at where available water resources are limited.

Keywords: Agricultural drought; IWMM; Irrigation amount; Irrigation interval

1. 서론

최근들어 기후변화로 인한 기상·기후 변동성의 증가와 함께 홍수, 가뭄 등의 자연재해 발생빈도 및 피해가 증가하고 있다. 우리나라의 경우 겨울부터 봄에 발생하는 가뭄으로 인한 피해가 빈번히 발생하고 있다. 특히 우리나라의 이용가능한 전체 수자원중에서 약 62% (국토해양부, 2011)가 농업용수로 사용되고 있기 때문에, 농업가뭄에 대비하여 농업용수의 절약을 위한 효율적인 관개용수량 산정 기술 개발이 시급하다.

우리나라의 곡물자급률의 경우 24%로 조사되었으며, 이중 쌀의 자급률이 95.7%이며, 발작물의 자급률은 약 20% 정도인 것으로 조사되었다 (농림축산식품부, 2015). 이는 OECD회

원국 34개국 중 32번째로 낮은 수치로 발작물의 해외 의존도가 매우 높은 것을 의미한다. 이에 정부는 2015년 발작불금지 급 품목 제한을 없애는 등 농가의 발작물 재배를 장려하고 있으며, 이에 따라 논을 밭으로 전환하는 농가들이 늘고 있다. 하지만 논벼를 대상으로 활발한 연구가 진행된 반면, 발작물의 경우 작물의 종류가 다양하고 토양 내 물 소비기구가 복잡하여 (Kim et al., 1999; Suh and Lee, 2002), 토양별, 작물별, 생육시기별 용수수요량 산정 기술 개발이 시급하다 (Nam et al., 2014).

관개시 농민들의 주관적인 판단에 따라서 일정량의 관개용수량을 결정하여 관개 할 수 있지만, 실제 물 부족시 작물의 수분스트레스의 정도는 강우의 양과 빈도뿐만 아니라 지표특성에 큰 영향을 받는다 (Shin and Jung, 2014). 충분한 양의 관개용수가 이용가능할 경우, 수분스트레스가 발생하면 충분한 관개용수를 공급하여 가뭄피해를 예방할 수 있다. 그러나 이용가능한 수자원이 제한된 지역에서는 물 부족시 가뭄에 의한 농작물의 피해가 발생하게 된다. 물 부족시 작물의 수분스트레스가 생장저해 수분점 이상이 되도록 관개용수를 공급할 수 있다면, 불필요한 수자원의 손실을 최소화 할 수 있을 것이다. 따라서, 근역층에서 작물성장에 영향을 미치는 실제 수분 부족의 정도

* 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: September 9, 2016

Revised: September 26, 2016

Accepted: September 26, 2016

를 평가하여 수자원을 최소한으로 소비하고 작물의 피해를 방지할 수 있는 적절한 관개일수와 관개량의 산정이 필요하다.

본 연구에서는 Irrigation Water Management Model-IWMM (Shin and Jung, 2014)을 이용하여 다양한 작물과 토양의 특성에 따라 관개일수와 관개용수량을 산정하고 스프링클러관개와 지표관개에 따른 관개용수량 변화 특성을 분석하였다. 연구목적은 1) 관개일수에 따른 관개용수량의 변화를 분석하여 적정 관개일수를 추정, 2) 다양한 토양 및 작물의 적정 관개용수량을 산정 및 3) 지표관개와 스프링클러관개에 따른 관개용수량 특성을 분석하였다.

II. 자료 및 연구방법

본 연구에서는 Irrigation Water Management Model-IWMM (Shin and Jung, 2014) 모형을 이용하여 토양 및 작물 특성에 따른 효율적인 관개용수량을 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., 2006). 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)와 같다.

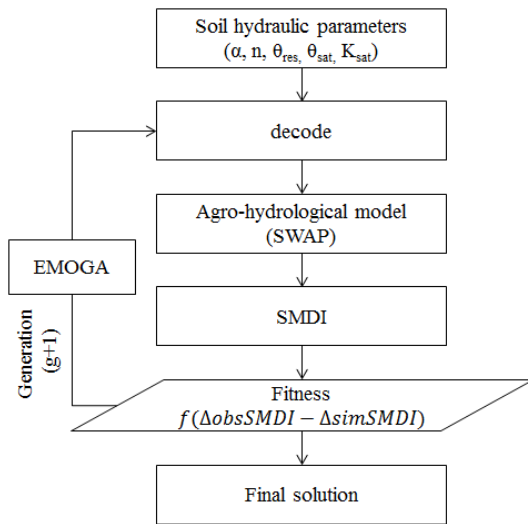


Fig. 1 Schematics of the irrigation water management model (IWMM)

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

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

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 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), $\min SW_m$: 장

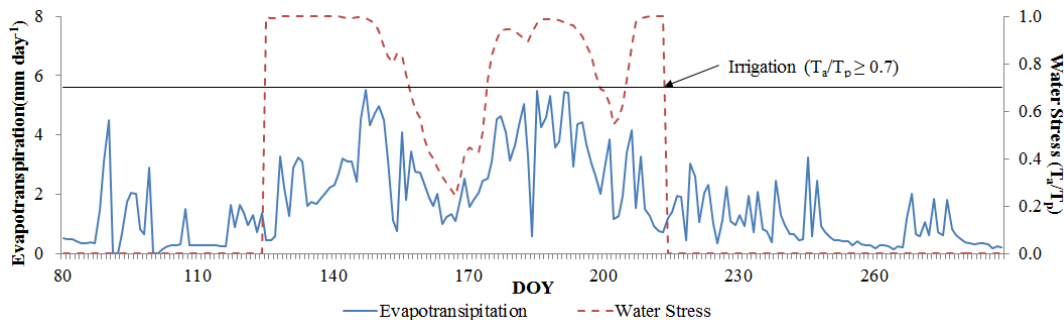


Fig. 2 Determination of irrigation intervals based on the water stress of crop

기간의 주별 최소값 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), 1: 모의기간 (2001-2015), 및 $m = (1-52)$ 주 (일년)이다. 주별 SMDI는 -4에서 +4의 범위로 나타내며 극한 상황의 건조 및 습윤 상태를 의미한다.

1. Soil Water Atmosphere Plant(SWAP) 모형

SWAP 모형은 Richard 공식을 이용하여 토양수의 흐름을 모의한다. SWAP 모형은 토양의 수리학적 매개변수 (α , n , θ_{res} , θ_{sat} , K_{sat})와 기상자료를 이용하여 토양층의 일별 토양수분을 계산한다.

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

여기서 K : 수리전도도 (cm d^{-1}), h : 토양의 압력수두 (-cm), z : 토양의 깊이, C : 미분된 수분함량 (cm^{-1}), $S(h,z,t)$: 식 (4)로 정의된 뿌리에 의해 흡수되는 실제 토양수분 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3} \text{d}^{-1}$)이다.

$$S(h,z,t) = \begin{cases} \alpha_w(h,z,t) \frac{T_{pot}(t)}{Z_r} & ; z < Z_r \\ 0 & ; z > Z_r \end{cases} \quad (4)$$

여기서 T_{pot} : 잠재증발산 (cm d^{-1}), Z_r : 뿌리 깊이 (cm), α_w : 깊이 (z)와 시간 (t)에서 압력수두 (h)에 따른 감소계수를 의미하고 또한 산소 및 수분 부족에 의한 stress를 나타낸다 (Feddes et al., 1978).

토양의 수리학적 함수들 ($\theta(h)$ 및 $K(h)$)은 van Genuchten (1980)과 Mualem (1976)에 의해 해석된다.

$$S_e(h,z,t) = \frac{\theta(h(z,t)) - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} = \left[\frac{1}{1 + |\alpha h(z,t)|^n} \right]^m \quad (5)$$

$$K(h,z,t) = K_{sat} S_e(h,z,t)^\lambda [1 - (1 - S_e(h,z,t))^{1/m}]^2 \quad (6)$$

S_e : 상대적 포화도 (-), θ_{res} 및 θ_{sat} : 최소 및 포화된 토양수분 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), α (-), n (-), m (-), 및 λ (-): 수분함량과 수리전도도의 형상계수, K_{sat} : 포화 상태의 수리전도도, $m = 1 - 1/n$ 이다.

SWAP 모형은 다양한 지표와 지하의 조건을 고려하여 토양수분을 모의하며, 관개배수모듈 및 작물성장 (WOFOST) 모듈을 포함하고 있어서 다양한 시나리오를 모의 할 수 있다 (van Dam et al., 1997; van Dam, 2000). SWAP 모형은 일별 기상자료를 이용하여 Penman-Monteith 공식에 따라 증발량과 증산량을 각각 계산하여 일별 증발산량을 산정할 수 있다.

2. Ensemble Multiple Operators Genetic Algorithm (EMOGA)

유전자 알고리즘 (Genetic Algorithm-GA, Holland, 1975; Goldberg, 1989)은 유전학을 바탕으로 하여, 실제 생물 진화를 모방하여 실측값에 근사한 매개변수를 산정하는 최적화 기법이다. 유전자 알고리즘은 해를 찾는 데 필요한 매개변수들을 2진수로 변환하여 세대 (Generation)를 구성하는 개체군 (Population)에서 가장 적합도가 높은 개체 (Individual)를 선택 (Selection), 교차 (Crossover), 변이 (Mutation)의 과정을 거쳐 더욱 적합도가 높은 해를 찾아낸다. Shin and Mohanty (2013)는 더 좋은 해 (k)를 찾기 위해 유전자 알고리즘 Ensemble Multiple Operators Genetics Algorithm (EMOGA)를 개발하였다. 최적화 알고리즘의 경우 찾아야 할 매개변수 개수가 증가하면 해의 불확실성도 증가한다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 EMOGA는 주어진 세대안의 가장 좋은 해를 찾기 위해 매개변수의 개수만큼 새로운 유전자를 생성하여 탐색영역을 확장한다. 또한 불확실성 분석을 위하여 EMOGA는 GA operator와 다양한 초기값 (initial random seed number)를 이용하여 다양한 ensemble을 생성한다. 이는 유전자 알고리즘이 해와 가까운 값을 주어진 시간과 불확실한 매개변수 범위 안에서 좀 더 효율적으로 해를 탐색 할 수 있도록 해준다. 본 연구에서 개체는 관개용수량 ($k = \{IWA_{i=1, \dots, N}\}$)으로 구성되며, ensemble 횟수는 3회로 하였다. 결과값은 3회 평균값만을 표기하였으며, 세대안의 관측값 (SMDI=0)과 모의값 (SMDI) 차이의 최소화를 이용한 목적함수 (Z)는 공식 (7)과 같다.

$$Z(k)_e = \min \left[\frac{1}{T} \sum_i^N |ObsSMDI_i - SimSMDI(k)_{e,i}| \right] \forall e \quad (7)$$

ObsSMDI_{*i*}: *i* 시간의 측정 SMDI 값, SimSMDI_{*i*}: *i* 시간의 모의 SMDI 값, I : 관개간격의 실행지수, N : 총관개된 일수, e : ensemble의 실행지수, E : 총 ensemble 횟수이다. 여기서 관측값은 물 부족시 작물의 피해가 발생하지 않는 SMDI="0"으로 설정하였다.

3. 연구 대상 지역

IWMM 모형의 적용성 평가를 위하여 연구대상 지역으로 강원도 춘천시 서면 방동리 (Fig. 3)를 선택하였으며, 기상자료는 춘천기상청의 중관기상관측소 (Automated Synoptic Observing System, ASOS)의 기상자료를 사용하였다. 토양환경정보시스템 휴토람에서 토양특성 정보를 수집하였으며, 방동리의 토양자료는 sandy loam이 전체토양의 28.6%를 차지

하고 있으며, 68 %는 silt loam으로 이루어져있다 (Fig. 4). 이러한 토양특성의 수리학적 매개변수는 미국 USDA에서 제공하는 Unsaturated Soil Hydraulic Database-UNSODAdatabase (Leij et al., 1999)에서 제공하는 수리학적 매개변수 값을 이용하였다 (Table 1). 토양층은 단일토층으로 가정하여 총 20 개 층으로 구성하였다. 총 토양깊이는 지표면으로부터 200 cm로 하였으며, 각 토양층의 구성은 지표면으로부터 1 cm × 10

(토양층의 갯수), 5 cm × 10, 10 cm × 12 및 20 cm × 1로 구성하였다. 또한 토양층의 지하수면은 지표면으로부터 -300 cm로 가정하였다. 방동리는 논이 약 180 ha, 밭이 약 190 ha로 이루어져있다. 발작물로는 오래전부터 여러 가지 작물을 재배하고 있으며 대표적으로 감자, 가을배추, 무, 고추, 수박 등이 있다. 본 연구에서는 5가지 발작물(무, 감자, 배추, 보리, 콩)을 선정하여 적정 관개일수와 관개용수량을 산정하였다. Table 2는 본 연구에서 사용한 발작물의 정보를 나타낸 것이다.

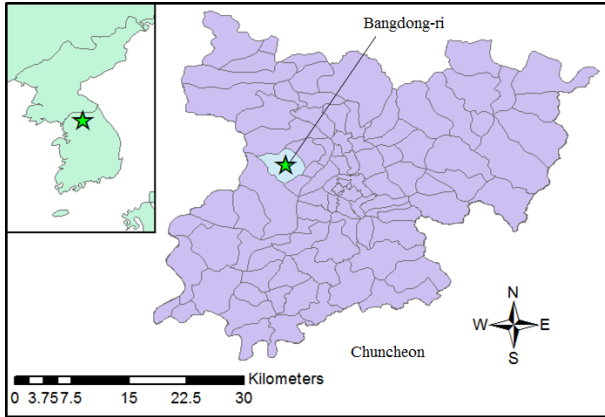


Fig. 3 Study area at the Banddong-ri site in Chuncheon for assessing the applicability of IWMM

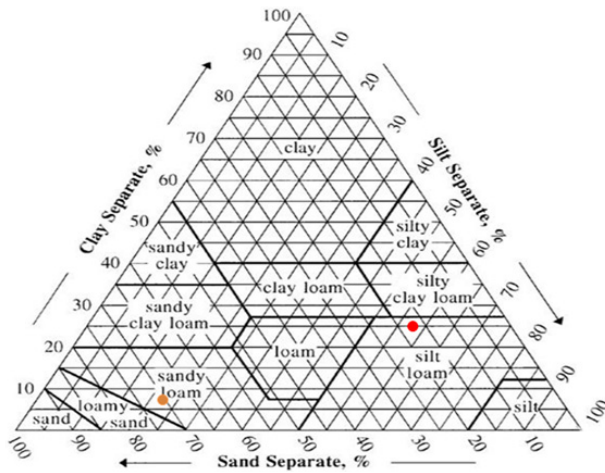


Fig. 4 Soil characteristics of the study area at the Banddong-ri site in Chuncheon

Table 1 Soil hydraulic properties obtained from the UNSODAdatabase* corresponding to the silt and sandy loam soils at the Banddong-ri site in Chuncheon

Soil textures	α	n	θ_{res}	θ_{sat}	K_{sat}
Silt loam	0,012	1,390	0,061	0,430	30,5
Sandy loam	0,021	1,610	0,670	0,370	41,6

* Leij et al. (1999)

III. 결과 및 고찰

1. 적정관개일수 산정

IWMM 모형을 이용하여 강원도 춘천시 서면 방동리 지점의 감자 작물의 적정관개일수를 산정하였다. 강수량에 따른 관개용수량의 변화를 분석하기 위하여, 2001년부터 2015년까지의 연도별 총 강수량중에서 강수량이 가장 많은 2011 (2,029.3 mm)년과 가장 적은 2014 (677.4 mm)년을 대상으로 IWMM 모형 기반의 관개용수량을 산정하였다. Fig. 5는 춘천 ASOS 관측소에서 측정된 연강수량을 나타낸 그래프이다.

방동리 지점에서 가장 우세한 토양특성인 silt loam-SiL (68 %) 및 sandy loam-SL (28.6 %) 토양과 대상작물로 감자를 선택하여 관개일수에 따른 관개용수량을 분석하였다 (Table 3). 2011년과 2014년의 관개용수량의 경우 강우가 적게 발생한 2014년에는 관개가 필요한 것으로 나타났으나,

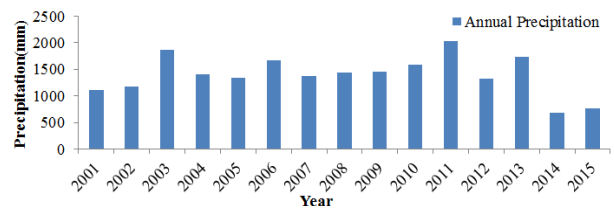


Fig. 5 Yearly precipitation amounts at the Chuncheon ASOS weather station (2001–2015)

Table 2 Crop information at the Banddong-ri site in Chuncheon

Crop types	Crop heights (m)	Maximum root depths (m)	Crop growth periods
Maize	1,4	0,9 ~ 1,2	May 05 ~ Oct 05
Soybean	0,36	0,75	May 05 ~ Oct 05
Potato	1,2	0,6 ~ 0,8	May 05 ~ Oct 05
Radish	0,6	0,4	Apr 20 ~ Jul 25
Barley	1,0	1,25	May 05 ~ Oct 05

2011년에는 많은 강우가 발생하여 작물이 물 부족에 의한 가뭄피해를 받지 않는 것으로 나타났다. SiL 및 SL 토양의 관개 일수에 따른 관개용수량의 차이를 보면 2일 간격으로 관개를 하였을 때 가장 많은 관개용수량(1189.0 mm, 1182.7 mm)이 필요하였고, 5일 (294 mm, 299.7 mm)과 7일 (292.3 mm, 329.7 mm) 간격으로 관개를 하였을 때 가장 적은 관개용수량이 필요한 것으로 나타났다. 1회 관개 시 관개용수량을 비교 하면 5일 간격으로 관개를 하였을 때의 일평균 관개용수량 (16.3 mm, 16.6 mm)이 7일간격으로 관개를 하였을 때의 일 평균 관개용수량 (22.5 mm, 25.4 mm)보다 적은 것으로 나타났다 (Table 4). 모의 결과와 일반적으로 현장에서 3~5일 간격으로 관개하는 것을 고려했을 때 5일간격으로 관개를 하는 것이 가장 적절한 것으로 판단되었다.

Table 3 Irrigation amounts based on the irrigation intervals

Years	Soil textures	Interval periods (mm)			
		2 Days	3 Days	5 Days	7 Days
2011	Sandy loam	0.0	0.0	0.0	0.0
	Silt loam	0.0	0.0	0.0	0.0
2014	Sandy loam	1182.7	624.3	299.7	329.7
	Silt loam	1189.0	609.0	294.0	292.3

Table 4 Daily averaged irrigation amounts for the sandy and silt loam soils in 2014

Year	Soil textures	Interval periods (mm)			
		2 Days	3 Days	5 Days	7 Days
2014	Sandy loam	27.0	21.0	16.3	22.5
	Silt loam	26.9	21.5	16.6	25.4

2. 발작물의 관개용수량 산정

적정 관개일수 5일 간격으로 SiL/SL 토양 및 5종류 (옥수수, 무, 감자, 보리 및 콩) 발작물의 관개용수량을 산정하였다 (Table 5). 연구기간은 가장 많은 강우와 적은 강우가 발생한 2011년 및 2014년을 대상으로 관개용수량을 산정하였다. 작물별 관개용수량을 비교하면 옥수수, 무, 보리, 콩, 감자순으로 관개용수량이 많이 발생한 것으로 나타났다. 옥수수와 보리의 경우 토양 특성에 의해서도 관개용수량이 큰 차이를 보였으나, 무와 감자, 콩의 경우 토양특성에 따라 상대적으로 큰 차이를 보이지 않았다. 특히 감자와 콩의 경우 다른 작물등과 비교하여 물 소비량이 상대적으로 적기 때문에, 관개용수량이 적은 것으로 나타났다. Fig. 6 및 Fig. 7은 2011 및 2014년 작물생육기간 (감자, May 05 ~ Oct 05)의 농업가뭄지수 SMDI, 관개용수량, 토양수분 변화량을 토양별로 나타낸 것이다. 강우가 많이 발생한 2011년의 경우 SMDI값이 (+)값을 나타냈으며, 강우가 적은 2014년의 경우 무관개 조건에서의 SMDI 값은 80일~240일 동안 방동리 지점에서 (-)값으로 나타날 물 부족에 의한 작물 피해가 발생한 것으로 나타났다. 작물재배 시기인 125일~278일 (May 05 ~ Oct 05)동안에 IWMM 모

Table 5 Irrigation amounts for various crops

Years	Soil Textures	Crop types (mm)				
		Maize	Radish	Barley	Soybean	Potato
2011	Sandy loam	524.7	380.7	314.7	0.0	0.0
	Silt loam	203.7	188.3	50.3	0.0	0.0
2014	Sandy loam	1407.0	956.7	819.7	412.3	299.7
	Silt loam	865.0	899.0	288.7	386.7	294.0

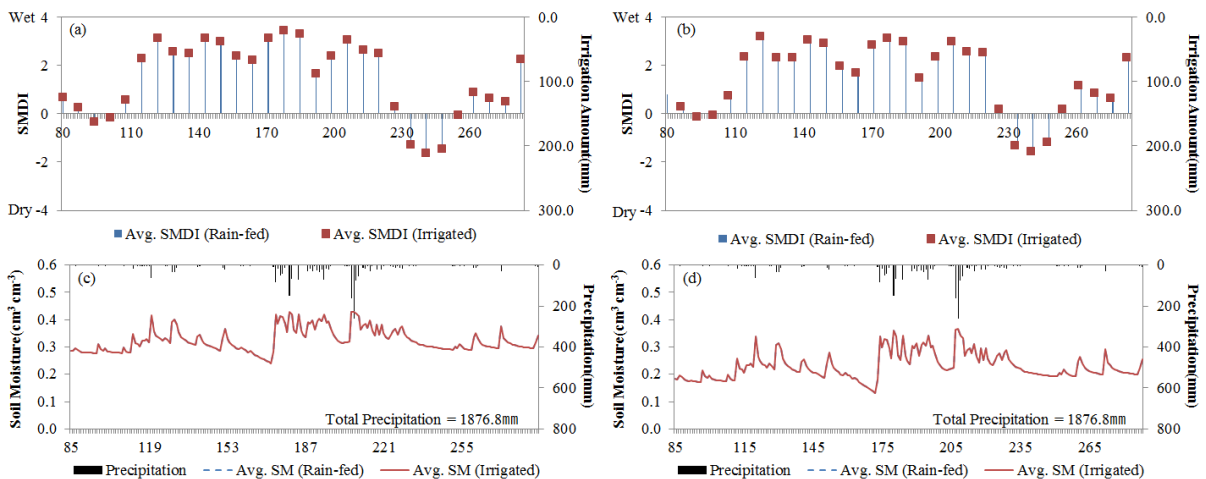


Fig. 6 (a, b) Estimated weekly SMDI and (c, d) root zone (0~60 cm) soil moisture dynamics with potato at the Bangdong-ri site in Chuncheon (2011); (a, c) silt loam, (b, d) sandy loam

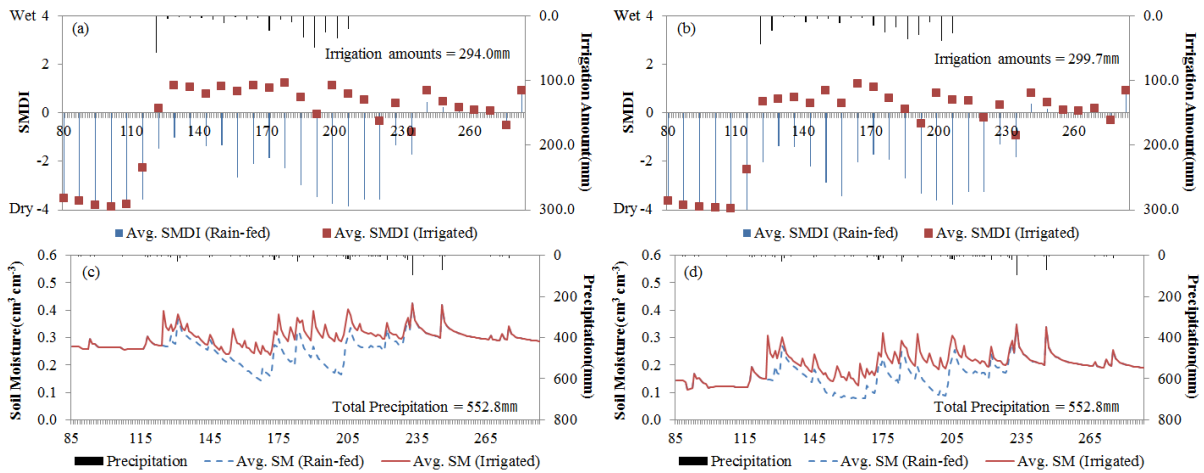


Fig. 7 (a, b) Estimated weekly SMDI and (c, d) root zone (0~60 cm) soil moisture dynamics with potato at the Bangdong-ri site in Chuncheon (2014); (a, c) silt loam, (b, d) sandy loam

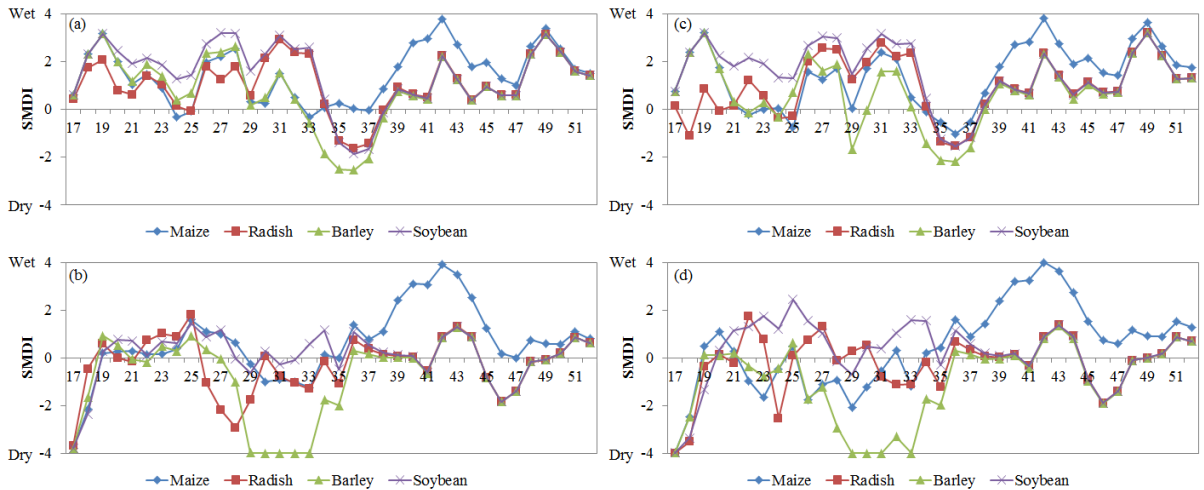


Fig. 8 Weekly soil moisture deficit index (SMDI) dynamics; (a) silt loam in 2011, (b) silt loam in 2014, (c) sandy loam in 2011, (d) sandy loam in 2014

형이 물 부족 정도에 따라 관개한 결과, 무관개시 -2~-4 범위로 나타났던 SMDI 값이 관개시에는 정상상태인 0에 가까운 값으로 증가하였다. 결과적으로 가뭄이 발생하는 기간동안 IWMM 모형이 가뭄의 정도에 따라 최소한의 관개용수를 공급하여 심각한 가뭄으로부터 작물피해를 최소화하는 것으로 나타났다. Fig. 8은 나머지 4개 작물(옥수수, 무, 보리, 콩)의 주별 SMDI 값을 나타낸 것이다. 작물별 농업가뭄지수 SMDI 값이 큰 차이를 보였으나, 토양특성 따른 SMDI 값은 변동성은 상대적으로 작게 나타났다. 이는 작물별 잎의 면적, 성장 높이, 뿌리 분포 및 성장 등이 작물별로 차이가 발생하며, 이러한 차이는 토양에서 대기로 환원되는 증발량, 식물의 표면에서 발생하는 증산량, 뿌리에 의한 토양층의 수분 흡수 등에 영향을 미치게 된다. 이러한 작물의 특성에 의해 물 부족시 작

물별로 가뭄에 대항하는 저항의 정도가 다르게 되며, 작물별 농업가뭄지수 SMDI의 값의 차이가 토양특성과 비교하여 상대적으로 크게 나타난 것으로 판단되었다.

3. 발작물의 지표관개와 스프링클러 관개시 관개용수량을 비교분석

Table 6은 지표관개와 스프링클러 관개시 작물별 관개용수량을 나타낸 것이다. 스프링클러 관개시 관개용수량은 지표관개 관개용수량과 큰 차이를 보이지 않았다. 연도별로는 강수량이 적은 2011년의 관개용수량이 옥수수, 보리, 무 순서로 많은 나타났으며, 감자와 콩의 경우 관개용수량이 필요 없는 것으로 나타났다. 2014년의 경우 옥수수, 무, 보리, 콩, 감자 순으로 관개용수량이 많이 공급되었다. 토양에 따른 비교 역

Table 6 Irrigation amounts based on the surface and sprinkler irrigation methods

Years	Irrigation methods	Soil textures	Crop types (mm)				
			Maize	Radish	Barley	Soybean	Potato
2011	Sprinkler	Sandy loam	610.3	327.7	372.7	0.0	0.0
		Silt loam	198.0	184.0	23.7	0.0	0.0
	Surface	Sandy loam	524.7	380.7	314.7	0.0	0.0
		Silt loam	203.7	188.3	50.3	0.0	0.0
2014	Sprinkler	Sandy loam	1363.3	1003.7	779.3	384.7	283.0
		Silt loam	783.0	922.3	267.3	428.3	285.3
	Surface	Sandy loam	1407.0	956.7	819.7	412.3	299.7
		Silt loam	865.0	899.0	288.7	386.7	294.0

시 지표관개와 동일하였다. 옥수수, 무, 보리의 경우 SL 토양에서 SiL 토양보다 더 많은 관개용수량이 필요한 것으로 나타났으며, 감자와 콩의 경우 SL 토양과 SiL 토양에서의 관개용수량이 비슷한 것으로 나타났다. 지표관개의 경우 작물이 이용될 수 있도록 유효토층 내에 저류된 물의 손실되는 비율이 스프링클러관개 보다 크기 때문에 실제 스프링클러관개 관개용수량은 지표관개 관개용수량보다 더 적어야 하지만 SWAP 모형에서는 거의 동일한 결과값이 나타났다. 이는 필지단위의 관개용수량을 분석한 것이 아니라 지점 (point-scale)에서 토양과 작물 특성에 따른 관개용수량을 산정한 것이므로 관개용수량의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 실제 현장에서 지표 및 스프링클러 관개를 시행할 경우 증발산, 침투량 등을 고려할 경우 지표관개에 의한 관개용수량이 스프링클러에 의한 관개용수량보다 크게 나타날 것으로 사료된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 IWMM모형을 이용하여 적정관개일수를 산정하고, 토양 및 작물 특성에 따른 효율적인 관개용수량을 분석하였다. 관개일수를 정하기 위한 대상작물로는 감자를 사용하였으며 적정관개일수는 2일, 3일, 5일, 7일 간격으로 관개를 하였을 때의 1회당 평균관개용수량이 가장 적은 관개일수는 5일, 7일 간격으로 나타났다. 실제 현장에서 3~5일 간격으로 관개를 하는 것을 고려하여 본 연구에서는 관개일수를 5일로 결정하였다. 강우가 많이 발생한 2011년의 경우 무관개로 발작물의 재배가 가능하기 때문에 IWMM 모형이 관개사상을 발생시키지 않았다. 그러나 물 부족이 심한 2014년의 경우 SMDI값이 "0"에 근사할 정도의 적정량의 관개용수량이 공급된 것으로 나타났다. 따라서 IWMM 모형이 기상자료를 반영하여 농업기상시 효율적인 농업용수 관리에 기여

할 수 있을 것으로 판단되었다. 작물별로 관개용수량을 비교하면 옥수수, 무, 보리, 콩, 감자 순으로 관개용수량이 많이 적용된 것으로 나타났으며, 무와 감자, 콩의 경우 토양특성에 따라 관개용수량이 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 강수가 적게 발생한 2014년에는 감자와 콩의 경우 강수의 영향을 적은 것으로 나타났으며, 옥수수와 보리는 상대적으로 더 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 토양별로는 SiL 토양에서의 관개용수량이 SL 토양보다 적은 것으로 나타났으며, 토양별로 관개용수량의 큰 차이를 보였다. 스프링클러관개시 관개용수량은 작물별로는 강수량이 많은 2011년의 경우 옥수수, 보리, 무 순으로 관개용수량이 많이 필요한 것으로 나타났으며, 2014년의 경우 옥수수, 무, 보리, 콩, 감자 순으로 관개용수량이 많이 필요한 것으로 나타났다. 또한 옥수수와 보리는 토양특성에 따라 관개용수량의 변화가 크게 나타났으며, 무, 감자 그리고 콩의 경우 차이를 보이지 않았다. 일반적으로 지표관개의 경우 증발산, 침투량 등의 물의 손실이 발생하기 때문에 스프링클러보다 많은 양의 관개용수량이 필요하지만, 1차원 해석 모형인 SWAP의 경우 공간적으로 발생하는 지표면에서의 물의 손실을 고려하지 못하기 때문에 스프링클러와 지표관개 기반의 관개용수량이 유사한 것으로 나타났다. 실제 현장에서 물의 손실을 고려할 경우 지표관개 기법의 관개용수량이 상당히 크게 나타날 것으로 사료된다. 따라서 IWMM 모형을 이용하여 가뭄 발생시 관개용수량을 산정할 경우, 실제 강우사상을 고려하여 물 부족에 의한 작물의 피해를 최소화 할 수 있는 정도의 관개용수량만을 공급하기 때문에 효율적인 농업용수 관리에 기여할 수 있을 것으로 판단되었다. 비록 본 연구에서는 2가지 토양특성 및 5가지 작물에 따른 IWMM 모형의 적용성을 평가하였으나, 향후 국내에서 재배되는 다양한 발작물을 대상으로 최적화된 관개일수, 관개용수량, 관개 방법에 관한 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

REFERENCES

1. Efron, B., 1982. The jackknife, the bootstrap and other re-sampling plans. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, Philadelphia, PA.
2. Feddes, R. A., P. J. Kowalik, and H. Zarandy, 1978. Simulation of field water use and crop yield, Wiley, New York.
3. Goldberg, D. E., 1989. Genetic algorithms in search and optimization and machine learning, Addison-Wesley Publ., Reading, MA.
4. 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.
5. Ines, A. V. M., K. Honda, A. D. Gupta, P. Droogers, and R. S. Clemente, 2006. Combining remote sensing-simulation modeling and genetic algorithm optimization to explore water management options in irrigated agriculture. *Agric. Water Manage.* 83(3): 221-232.
6. Kim, H. Y., Y. J. Suh, M. S. Sim, and K. Y. Lee, 1999. Determination of a new method for the upland water requirements. *Proceedings of the Korean Society of Agricultural Engineers Conference*: 41-46 (in Korean).
7. Korea Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011. Water Vision 2020, 18. Sejong, Korea.
8. Korea Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2015. [Http://www.mafra.go.kr](http://www.mafra.go.kr). Accessed 29 March. 2015.
9. 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. Rep. 81, DLO Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands.
10. Leij, F. J., W. J. Alves, M. Th. van Genuchten, and J. R. Williams, 1999. The UNSODA unsaturated soil hydraulic database. In: M.Th. Van Genuchten F. J. Leij and L. Wu. (eds.). Characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media, University of California, Riverside, CA. 1269-1281.
11. Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12(3): 513-522.
12. 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).
13. 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(1-4): 69-88.
14. 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.* 10.1061.
15. 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(10): 6208-6228.
16. Suh, Y. J. and K. Y. Lee, 2002. Method of calculation in upland irrigation. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers*. 44(1): 25-34 (in Korean).
17. van Dam, J. C., et al., 1997. Theory of SWAP version 2.0: Simulation of water flow and plant growth in the soil-water-atmosphere-plant environment. Technical Document 45, DLO Winand Staring Centre, Wageningen, Netherlands.
18. 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.
19. van Genuchten, M. T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44(5): 892-898.