

ORIGINAL ARTICLE

## 다목적 용수를 고려한 제주도 농업용 지하수 이용량 모델 개발

안중기\* · 송성호 · 이동림<sup>1)</sup>

한국농어촌공사 농어촌연구원, <sup>1)</sup>한국농어촌공사 제주지역본부

### Development of Agricultural Groundwater Usage Model Considering Multipurpose Water in Jeju Island

Jung-Gi An\*, Sung-Ho Song, Dong-Rim Lee<sup>1)</sup>

Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Ansan 426-170, Korea

<sup>1)</sup>Jeju Regional Headquarters, Korea Rural Community Corporation, Jeju 690-072, Korea

#### Abstract

The estimation of groundwater usage in Jeju island is important to understand hydrologic cycle system and to plan management of water resource because large amounts of groundwater have been used for agricultural and domestic purpose. The model has been developed to estimate agricultural groundwater usage for garlic at uplands and citrus at orchards raising outdoors using the soil water balance model from FAO 56, respectively. The total amount of water supplied for the crop evapotranspiration and the multipurpose function such as sprout promotion can be simulated by the model. However, due to the discrepancy of water use in initial stage between calculated and observed, the model was calibrated and verified using actual groundwater usage monitoring data for 3.5 years (2011.6 to 2014.12) at three uplands for garlic and three orchards for citrus. Consequently, it would be concluded that the model simulated efficiently actual water usage in that root mean square (RMS) and normalized RMS of the validation stage were less than 8.99 mm and 2.43%, respectively, in two different conditions.

**Key words** : Agricultural groundwater usage, Citrus, Crop evapotranspiration, Garlic, Multipurpose water, Soil water balance model

#### 1. 서론

수문 순환 과정은 인간의 물이용으로 복잡하게 변형되므로 물 이용량 평가는 수문 순환의 이해와 수자원 개발·관리 계획 수립을 위해 반드시 고려할 요인이다. 제주도는 수자원 이용량의 83.9%를 지하수로 공급하며 (JSSP, 2013), 도내 대표적인 채소 재배지역인 서부는 농업용수의 집중적인 사용으로 지하수위 변동이 크게 영

향을 받는다 (Song 등, 2013). 따라서 지하수 이용량의 정확한 평가는 제주도의 지하수 관리에 매우 중요한 일이다. 생활용과 농업용 지하수 이용량은 원수대금 징수를 위해 실제 사용량이 정확하게 관리되고 있기 때문에 인구나 생산량 등의 지표로 평가도 가능하다. 그러나 농업용 관정은 대부분 이용량을 측정하지 않으며, 재배 작물과 기상에 따라 이용량의 시·공간적 변동이 크기에 평가가 어려운 특성이 있다.

Received 30 January, 2015; Revised 5 April, 2015;

Accepted 8 April, 2015

\*Corresponding author: Jung-Gi An, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Ansan 426-170, Korea  
Phone: +82-31-400-1853  
E-mail: angro40@hanmail.net

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

농업용수는 크게 수분보급용수와 다목적용수로 구분된다. 수분보급용수는 작물 증발산을 위해 필수적으로 공급해야 하는 용수이므로 이용량 평가는 토양 물수지 방법을 기초로 작물의 실제증발산량을 산정하는 접근이 필요하다. 현재 우리나라에서 개발된 HOMWRS (KRC, 2010), AFKAE0.5 (Seo 등, 2012)나 FAO의 CROPWAT (Smith, 1992)는 이런 방법으로 작물이 수분스트레스가 발생한 시기에 포장용수량까지 공급해야 하는 양 (필요 관개수량)을 산정하고 있다.

다목적용수는 파종기나 정식기 재배관리, 농약 살포, 경운작업 등에 공급되는 용수이다. 제주도에서 마늘과 노지감귤은 다목적 용수의 비중이 큰 작물이다. 마늘의 경우 8월 하순에 파종 후 9월 하순 발아까지 주 1~2회 관개를 하는데 (KRC, 2005), 발아 촉진을 위해 토양 표층토가 포화상태가 될 때까지 용수를 공급한다. 노지감귤의 경우 농약살포 용수의 비중이 커서 2002년부터 2004년까지 조사결과에 의하면 30개 과수원의 평균 이용량 8.4 mm/년 중 농약살포용으로 총 6.4 mm/년을 사용한 바 있다 (KRC, 2005).

그러나 기 개발된 모델은 이런 다목적 용수량 평가가 불가능한 문제점이 있다. 또한 당도 저하 등을 이유로 용수를 충분히 공급하지 않는 노지감귤의 경우, 수분보급 용수의 관개시기, 1회 관개량에 대한 경작자의 의사결정, 관개 관행 등에 의해 결정되므로 이런 요인을 반영하여 기존의 모델을 개선할 필요가 있다.

본 연구에서는 시·공간적으로 변화가 심한 농업용 지하수의 실제 이용량을 평가하기 위해 토양물수지법을 기초로 하여 수분보급용수량과 함께 다목적용수량을 모의하는 모델을 개발하였다. 모델은 제주도에서 생육초기에 다량의 용수를 사용하는 마늘과 재배면적이 가장 넓은

노지 감귤을 대상으로 하였다.

## 2. 이론적 배경

토양물수지법은 Allen 등 (1998)의 FAO Irrigation and Drainage paper No.56 (이하 FAO 56)에 제시된 실제증발산량 및 토양 물수지 계산 절차에 의해 1일 단위로 토양수분량을 산정한다. 경작자는 토양수분량이 일정 수준 이하가 되면 수분보급용수를 공급하며, 마늘 발아 시나 일정 기간이 경과하면 다목적용수를 사용한다. 실제 농경지에서 마늘 재배를 위해 피복하는 멀칭(Mulching)에 의한 증발산 감소 효과는 작물계수 감소율로 정의하여 모델에 반영하였다.

1~3필지 규모의 농경지에서 작물 뿌리지대 토양에 대한 물수지는 다음과 같다.

$$P_i + Q_i = R_i + Eta_i + DP_i + \Delta S_i \quad (1)$$

여기서,  $P_i$ 는  $i$ 일의 강수량 (mm),  $Q_i$ 는  $i$ 일의 1회 관개량 (mm),  $R_i$ 는 직접유출량 (mm),  $Eta_i$ 는 실제증발산량 (mm),  $DP_i$ 는 깊은 침투량 (mm),  $\Delta S_i$ 는 토양수분 저장량 변화 (mm)로  $i$ 일 최종 토양수분량 ( $SW_i$ )과  $i-1$ 일 최종 토양수분량 ( $SW_{i-1}$ )의 차이이다 (Fig. 1).

제주도에서 지하수는 지하 깊은 곳에 위치하고 토양과 대수층 사이에 화산암반이 위치하여 모세관 현상으로 대수층에서 토양으로 공급되는 양은 무시할 수 있다.

$i$ 일의 최종 토양수분량 ( $SW_i$ )은 아래 식과 같다.

$$SW_i = SW_{i-1} + P_i - R_i + Q_i - Eta_i - DP_i \quad (2)$$

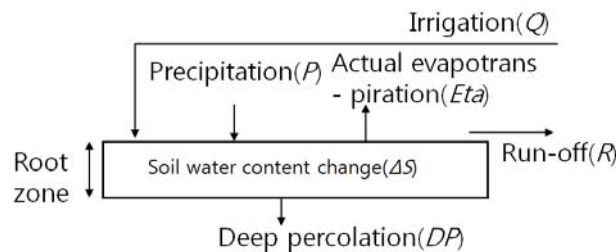


Fig. 1. Conceptual model of water balance for irrigation in field scale.

$P_i$ 는 인근 기상관측소의 값을 이용하고, 본 연구에서 유출량 ( $R_i$ )은  $P_i$ 와 유출곡선지수 ( $CM$ )를 이용하여 미국 농무성의 SCS방법으로 산정한다.

본 연구에서  $i$ 일 관개량은 1회 수분보급용수량 ( $Q_e$ )에 관개효율 ( $IE$ )을 적용한 양과 1회 다목적용수량 ( $Q_m$ )으로 구성된다.

$$Q_i = Q_e/IE + Q_m \quad (3)$$

경작지는 다음과 같은 수분상태가 되면 수분보급용수를 공급한다.

$$SW_{i-1} + P_i - R_i < Pqs \cdot TAW \text{ 이면 } Q_e > 0 \quad (4a)$$

$$SW_{i-1} + P_i - R_i \geq Pqs \cdot TAW \text{ 이면 } Q_e = 0 \quad (4b)$$

$$TAW = Zr(SW_{fc} - SW_{wp}) \quad (5)$$

여기서,  $Pqs$ 는 관개가 필요한 시기의 토양수분 감소율,  $TAW$ 는 총 이용가능 수분량 (mm),  $SW_{fc}$ 는 포장용수량일 때의 토양수분량 (V/V),  $SW_{wp}$ 는 위조점일 때의 토양수분량 (V/V),  $Zr$ 은 작물의 유효 뿌리깊이 (mm)이다.

1년생 채소는 토양수분 감소율이 “수분 스트레스가 없는 상태의 수분감소율( $p$ )”보다 크면 작물이 활력을 잃으므로 경작지는 토양수분량이  $TAW$  가 되도록 관개를 한다.

$$\text{마늘의 경우 } Pqs = p \quad (6)$$

$$Q_e = TAW - (SW_{i-1} + P_i - R_i) \quad (7)$$

다년생 작물인 감귤은 당도 저하 등을 이유로 충분한 관개를 하지 않는 관행이 있으므로  $Pqs$ 와  $Q_e$ 는 모델 보정과정을 통해 결정된다.

1회 다목적용수량 ( $Q_m$ )은 마늘 파종이후 발아용수와 농약살포용수로 구성된다. 마늘은 파종이후 발아 촉진을 위해 토양이 포화상태가 될 때까지 충분한 물을 공급하며 발아 후에도 생육 촉진과 지온 상승을 위해 많은 양의 물을 준다. 따라서 본 연구에서는 1회 다목적용수량을 토양 표면부터 일정 깊이 ( $Z_s$ )까지 토양을 포화시키는 양으로 정의하였다.

$$\text{마늘의 경우 } Q_m = SAT - (SW_{i-1} + P_i - R_i) \quad (8a)$$

$$SAT = Z_s \cdot (SW_{sat} - SW_{wp}) \quad (8b)$$

여기서,  $SAT$ 는 일정 깊이 표층토의 포화 수분량 (mm),  $SW_{sat}$ 는 포화 상태의 수분량(V/V)이다.

농약살포용수량은 농약 종류, 작물의 엽 면적 지수 등에 따라 다르지만 본 연구에서는 일정한 것으로 가정하였다.

실제증발산량은 작물 수분스트레스계수 ( $K_s$ )와  $i$ 일의 잠재증발산량 ( $Etp_i$ )로 부터 산정된다.

$$Eta_i = K_s \cdot Etp_i \quad (9a)$$

$$Etp_i = RC \cdot Kc \cdot Etr_i \quad (9b)$$

여기서,  $Kc$ 는 작물계수,  $Etr_i$ 은  $i$ 일의 기준작물 잠재증발산량 (mm),  $RC$ 는 작물계수 감소율이다.

작물계수는 토양 건조 방지, 지온 상승 등을 위해 토양을 비닐로 덮는 멀칭, 하우스시설 등에 의해 감소되므로 본 연구에서는 이를 작물계수 감소율(Reduction ratio in crop coefficient)로 정의하였다.

$K_s$ 는 다음과 같이  $SW_{ti}$ 와 신속 이용가능 토양수분량 ( $RAW$ )으로 부터 산정된다.

$$SW_{ti} = SW_{i-1} + P_i - R_i + Q_i \quad (10)$$

$$SW_{ti} \geq RAW \text{ 이면 } K_s = 1 \quad (11a)$$

$$SW_{ti} < RAW \text{ 이면}$$

$$K_s = \frac{SW_{ti}}{(TAW - RAW)} \quad (11b)$$

$$RAW = p \cdot TAW \quad (12)$$

토양수분이  $TAW$ 을 초과하면 초과된 물은 작물뿌리 지대 하부로 침투되어  $i$ 일의 최종 토양수분 함량 ( $SW_i$ )과 깊은 침투량 ( $DP_i$ )은 다음과 같다.

$$SW_{i-1} + P_i - R_i + Q_i - Eta_i \geq TAW \text{ 이면} \\ SW_i = TAW \quad (13a)$$

$$DP_i = SW_{i-1} + P_i - R_i + Q_i - Eta_i - TAW \quad (13b)$$

$$SW_{i-1} + P_i - R_i + Q_i - Eta_i < TAW \text{ 이면} \\ SW_i = SW_{i-1} + P_i - R_i + Q_i - Eta_i \quad (13c)$$

$$DP_i = 0 \quad (13d)$$

3. 자료 및 매개변수 적용

3.1. 지하수 이용량 및 기상자료

마늘 3개소와 노지감귤 3개소의 실제 이용량 관측 자료를 모델의 일부 매개변수를 보정 및 검증하였다 (Table 1)(Fig. 2). 농경지 급수 관료에 설치된 유량계를 2011년 6월부터 2014년 12월까지 월 2~5회씩 검침하였고, 마늘 높이와 감귤 지름 측정으로 생육단계를 파악하고 멀칭 및 수확 시기 등을 조사하였다.

물수지 분석에 필요한 기상 자료는 농경지 인근의 고산과 서귀포 기상청 관측소의 일 단위 자료를 이용하였다. 이용한 기상요소는 강수량과 FAO-56 Penman-Monteith 방법에 의한 기준작물증발산 계산에 필요한 최고기온, 최저기온, 평균풍속, 일조시간, 상대습도이다.

3.2. 매개변수 적용

개발한 모델의 매개변수는  $CN_{II}$ ,  $TAW$ ,  $p$ ,  $p_{qs}$ ,  $IE$ ,  $K_c$ ,  $RC$ ,  $SAT$ (감귤의 경우  $Q_m$ ),  $Q_e$  등 총 9개로 이중에서 3

개 변수는 보정에 의해 결정하고 다른 변수들은 기존 문헌의 값을 적용하였다. 보정에 의해 결정한 변수는 마늘의 경우  $K_c$ ,  $RC$ ,  $SAT$ 이며 감귤의 경우  $K_c$ ,  $P_{qs}$ ,  $Q_e$ 이다.

$K_c$ 는 기존 연구 (Choi 등, 2013)에서 이용한 계수를 적용한 후 관측자료로 보정하여 일부 기간의 계수를 변경하였다. 마늘의 발아초기 다목적용수 사용기간은 FAO 56의 생육초기의 작물계수 계산 방법을 적용하였다. 작물계수는 농경지에 피복하는 멀칭에 의해 일반적으로 0.1~0.3배 정도 감소하므로 (Allen 등, 1998)  $RC$ 는 이 범위에서 보정하여 사용하였다.  $RC$ 를 포함한 매개변수 보정에는 지하수 이용량 검침 시점의 누적 관측 이용량과 모의 이용량으로 구한 Root Mean Square (RMS)와 Normalized RMS를 지표로 사용하였다.

제주도 농경지는 주위보다 표고가 낮은 요지에 위치하여 유출률이 적은 경우가 많으므로  $CN_{II}$  산정을 위한 토지이용은 “이랑농경지, 식생피복 상태는 등고선, 테라스 경작, 수문학적 좋은” 등급으로 적용하였다. 토양 수

Table 1. Crop cultivation period at the monitoring sites with different soil series

Crop type	Site	Cultivation area (m <sup>2</sup> )	Cultivation period	Soil series (ratio : %)
Garlic	G1	4,157	from September to May next year	MUREUNG (100%)
Garlic	G2	4,224	from September to May next year	JOCHEON (69%), MUREUNG (31%)
Garlic	G3	1,482	from September to May next year	HAWEON (82%),DONGHONG (18%)
Citrus	C1	9,211	from January to December	GUJWA (100%)
Citrus	C2	6,267	from January to December	GUEOM (91%),IDO (9%)
Citrus	C3	6,554	from January to December	JUNGMUN (100%)

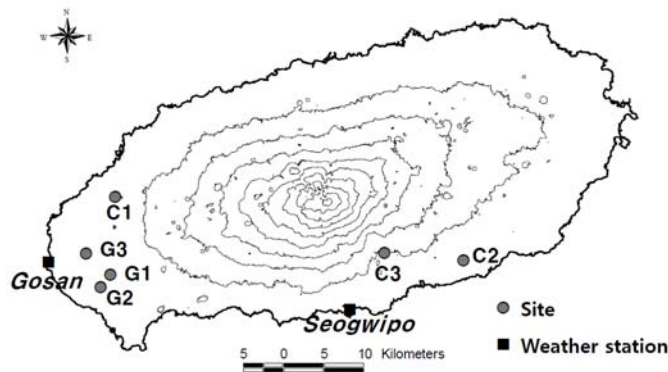


Fig. 2. Groundwater usage monitoring sites with two adjacent weather stations.

문학적 분류는 Jung 등 (2006)의 분류를 이용하였다. TAW는 국립농업과학원 토양환경정보시스템(NAAS, 2015)의 대표 토양통에 대한 보수력 및 가비중 자료, FAO 56의 최대유효뿌리깊이의 중간 값으로 산정하였다. 보수력과 가비중 자료가 없는 경우 같은 토색에 속하는 토양의 평균값을 이용하였다.

토양수분 감소율 ( $p$ )은 FAO 56에 제시된 증발산량 5 mm일 때의 작물별 감소율을 사용하였다. 관개효율은 스프링클러 적용효율의 중간 값 85% (MIAFRA, 1998)를 사용하였다.

감굴의 수분보급용수와 관련된  $P_{qs}$ 와  $Q_s$ 는 토심이 얇아 수분보급용수를 다량으로 사용하는 C1 자료로 보정하였다. 마늘 SAT 산정을 위해  $SW_{sat}$ 는 대표토양통의 공극율을 적용하고 표층토 깊이 ( $Z_s$ )는 관측값으로 보정하였다. 공극률 자료가 없는 경우 가비중과 진비중의 관계식으로 부터 구하였다. 감굴의 1회 농약살포용수량은 기존 연구(KRC, 2005)의 평균 살포량 0.64 mm를 적용하고, 마늘의 경우 0.15 mm를 적용하였다.

#### 4. 결 과

##### 4.1. 마늘의 이용량

제주도에서 마늘은 8월 하순에 파종 후 9월 하순 밭아까지 주 1~2회 관개 관리를 한 후 노지 비닐을 피복하여 관리 후 이듬해 5월 하순부터 6월 상순에 수확한다(KRC, 2005). 이용량 관측지점도 이런 재배 작형을 보이나 G3 지점은 파종과 동시에 비닐 멀칭을 피복하고 있다.

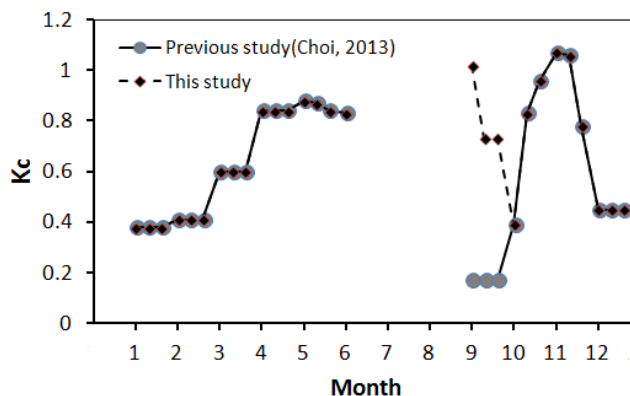
마늘 이용량 모의에는  $K_c$ 를 포함한 총 8개 매개변수가 필요한데 이중에서  $K_c$ , SAT와 관련된 표층토 깊이 ( $Z_s$ ), RC는 G1 관측 값으로 보정한 후 G2, G3 값으로 검증하였다(Table 2).

작물계수는 작물의 생육단계, 관개량 등에 따라 달라지는데 생육 단계에 따라 보통 월별 상, 중, 하순으로 나누어 적용한다(Fig. 3). 기존 연구(Choi 등, 2013)에서는 마늘의 10년 빈도 수요량 산정을 위해 농촌진흥청 난지농업연구소가 라이지메터를 이용하여 실측한 계수(KRC, 2005)를 사용하였다. 기존 작물 계수로 다목적용수 및 RC를 고려치 않고 수분보급용수량을 모의할 경우

**Table 2.** Parameters applying for groundwater usage simulation for galic at uplands

Site	$CN_{II}$	TAW	$p$	$p_{qs}$	IE	SAT ( $Z_s$ )	RC
G1	62	58 mm	0.3	0.3	0.85	81 mm (150 mm)	0.8
G2	72	46 mm	0.3	0.3	0.85	80 mm (150 mm)	0.8
G3	72	76 mm	0.3	0.3	0.85	90 mm (150 mm)	0.75

$CN_{II}$  : Curve number of SCS method, TAW : Total available soil water content in the root zone,  $p$  : Soil water depletion fraction for no stress,  $p_{qs}$  : Soil water depletion fraction for the irrigation start IE : Irrigation efficiency, SAT : Soil water at saturation state in the top soil,  $Z_s$  : Depth of the top soil, RC : Reduction ratio in crop coefficient



**Fig. 3.** Crop coefficients used for previous study (Choi et. al., 2013) and this study for galic at uplands.

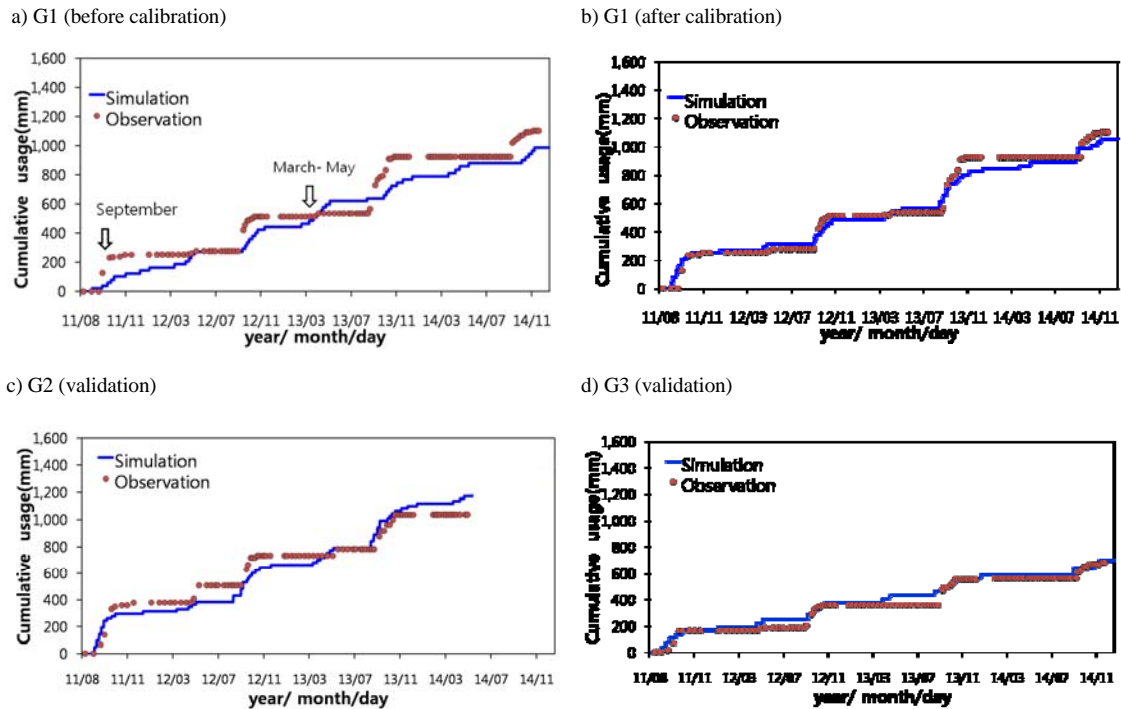


Fig. 4. Comparison of simulated usage and observed usage for garlic at uplands

- a) simulation of groundwater usage for crop evapotranspiration with previous study's crop coefficient.  
 b, c, d) simulation of groundwater usage for crop evapotranspiration and multipurpose function with modified crop coefficient.

모델은 파종 이후부터 발아 초기인 9월까지 지하수 이용량 증가를 모의하지 못하고 있다. 또한 3월 중순부터 5월까지 실제 이용량보다 많은 용수를 사용하는 것으로 모의한다 (Fig. 4(a)). 모의 결과 RMS는 13.40 mm, N-RMS는 1.24%이다.

9월 다목적용수 공급을 모델에 고려하기 위해서는 우선 작물계수의 변경 필요하다. 생육초기 작물계수는 관개빈도, 관개량에 따라 결정되는데 (Allen 등, 1998) 기존 연구에서 이를 고려치 않아 FAO 56의 생육초기 작물계수 결정방법에 따라 변경하였다. 이용량 관측 자료에 의해 관개량은 40 mm 이상, 관개빈도는 9월 초순 4일 간격, 발아 이후인 중순과 하순은 8일 간격을 적용하였다. 변경된 작물계수는 9월 초순 1.02, 중순과 하순은 0.73이다 (Fig. 3).

수정된 작물계수로 수분보급용수와 다목적 용수를 공

급하는 상황에서 SAT와 관련된 표층토 깊이 ( $Z_s$ )와 RC를 보정하였다.  $Z_s$ 를 5~20 cm 범위에서 2.5 cm 간격으로 RC는 0.1~0.3 범위에서 0.05 간격으로 모의를 반복한 결과  $Z_s$ 는 150 mm, RC는 0.8일 때 RMS는 6.47 mm, N-RMS는 0.66%로 가장 작아 이 값을 사용하였다. 보정된 모델은 수분보급용수만 고려한 경우보다 생육초기와 3~5월의 지하수 이용량을 비교적 잘 모의하고 있다 (Fig. 4(b)).

모델 검증을 위해 다른 2개 농경지를 대상으로 지하수 이용량을 모의한 결과, G2는 RMS 8.99 mm, N-RMS는 1.01%, G3는 RMS 3.65 mm, N-RMS는 0.68%로 모델이 실제 지하수 이용량을 유사하게 모의하고 있다 (Fig. 4(c)(d)). G1 자료로 보정한 3개 변수 중에서 2개 변수는 검증결과 동일하나 RC의 경우 G1과 G2는 0.8, G3 0.75로 약간 차이가 나는데 (Table 2), 이는 멀칭에

의한 작물계수 감소 정도가 멀칭 색깔, 작물밀도, 멀칭 간격에 따라 다르기 때문에 향후 RC의 적용방법에 대한 추가 연구가 필요하다.

모델은 용수를 실제 거의 사용하지 않는 3월과 5월 사이에 일정 양의 용수를 이용하는 것으로 모의하는데 이것은 작물계수가 높게 평가되었거나 모델이 실제 농업현장의 다양한 관개 관행을 반영하지 못하기 때문이다. 생육 후기에 해당하는 이 시기는 토양수분상태 외에도 마늘 품종, 또는 수확 용이성 등의 요인에 따라 지하수 이용량이 달라질 수 있다. 향후 이 시기의 작물계수와 관개관행에 대한 검토 및 수정이 필요한 것으로 판단된다.

4.2. 노지감굴 이용량

이용량 모의에는 Kc를 포함한 총 9개 매개변수가 필요한데 이중에서 Kc, p<sub>qs</sub>, Q<sub>e</sub>는 C1 관측값으로 보정하였다(Table 3). Q<sub>m</sub>의 경우 노지감굴 30개소의 조사 결과에 의하면 (KRC,2005) 농약살포용으로 연간 10회 총 6.4 mm를 사용하므로 4월부터 10월까지 20일 간격으로 0.64 mm를 적용하였다.

기존 작물계수로 C1을 대상으로 p<sub>qs</sub>는 0.1 간격으로 0.5~0.7 범위에서, Q<sub>e</sub>는 5 mm 간격으로 5~30 mm 범위에서 이용량을 모의한 결과 p<sub>qs</sub>는 0.7, Q<sub>e</sub>는 10 mm일 때 RMS와 N-RMS가 각각 1.82 mm, 0.80%로 가장 적어 이 값을 사용하였다 (Fig. 5(a)). 모델은 실제 용수를 사용하지 않은 2013년 11월부터 2014년 12월까지 지하수를 이용하는 것으로 모의하는데 이것은 실제 당도 저하 등을 사유로 급수를 하지 않는 수확시기인 11월과 12월의 작물계수가 각각 0.59, 0.31로 크기 때문이다 (Fig. 6). 따라서 작물계수를 0.1로 변경하여 용수가 필요치 않은 토양수분상태가 되도록 하였다.

보정된 모델은 2013년 11월 이후 실제 이용량을 비교 적 잘 모의하고 있다. RMS는 1.27 mm, N-RMS 0.55%

로 설명력이 약간 증가하였다 (Fig. 5(b)).

모델 검증을 위해 다른 2개 농경지를 대상으로 모의한 결과는 C2는 RMS 0.34 mm, N-RMS 0.6%, C3는 RMS 0.89 mm, N-RMS 2.43%로 개발된 모델이 실제 지하수 이용량을 모의 가능한 것으로 판단된다 (Fig. 5(c)(d)). 또한 C1 관측값으로 보정한 3개 변수 값은 C2, C3 지점에도 적용이 가능하다.

농약살포용수를 사용하지 않고 수분보급용수만을 공급하는 것으로 모의하면 C2는 RMS 1.7 mm, N-RMS 0.74%, C3는 RMS 2.1 mm, N-RMS 5.72%로 설명력이 작아지므로 TAW가 큰 농경지는 이용량 모의를 위해 농약살포용수를 고려해야 한다. 본 연구에서 1회 농약살포 용수량을 기존 연구의 평균값을 사용하였으나 이 양은 감귤의 엽 면적과 관계가 깊으므로 향후 항공사진을 이용한 감귤 나무 밀도와 수관의 면적 추정 자료로부터 농약살포용수량을 산정하는 연구가 필요하다.

4.3. 고찰

마늘 3개소 및 노지 감귤 3개소의 실제 지하수 이용량과 모의 이용량의 비교 결과 수분보급용수 외에 다목적 용수를 고려함으로써 토양 물수지식으로 지하수 이용량 모의가 가능하였다. 마늘의 경우 파종 이후 9월에 다량의 다목적용수를 사용하기 때문에 수분보급용수 산정만으로 지하수 이용량을 모의할 수 없었다. 토양의 총 이용 가능 수분량이 크기 때문에 수분보급용수 사용량이 적고 상대적으로 농약살포용수의 비중이 큰 노지감귤 과수원 (C2와 C3)의 경우 이용량 모의를 위해 다목적용수의 도입이 필요한 것으로 나타났다.

개발된 모델은 실제 지하수 이용량 관측 자료로 작물계수, 1회 관개량 및 관개시기 등 매개변수를 보정하고 검증한 모델이므로, 제주도 농업 현장의 실제 이용량을

Table 3. Parameters applying for groundwater usage simulation for citrus at orchards

Site	CN <sub>I</sub>	TAW	p	p <sub>qs</sub>	IE	Q <sub>e</sub>	Q <sub>m</sub>	RC
C1	81	45 mm	0.5	0.7	0.85	10 mm	0.64 mm	1
C2	62	97 mm	0.5	0.7	0.85	10 mm	0.64 mm	1
C3	78	348 mm	0.5	0.7	0.85	10 mm	0.64 mm	1

CN<sub>I</sub>: Curve number of SCS method, TAW: Total available soil water content in the root zone, p: Soil water depletion fraction for no stress, p<sub>qs</sub>: Soil water depletion fraction for the irrigation start, IE: Irrigation efficiency, Q<sub>m</sub>: once multipopose water quantity, Q<sub>e</sub>: once water quantity supplying for crop evapotranspiration, RC: Reduction ratio in crop coefficient



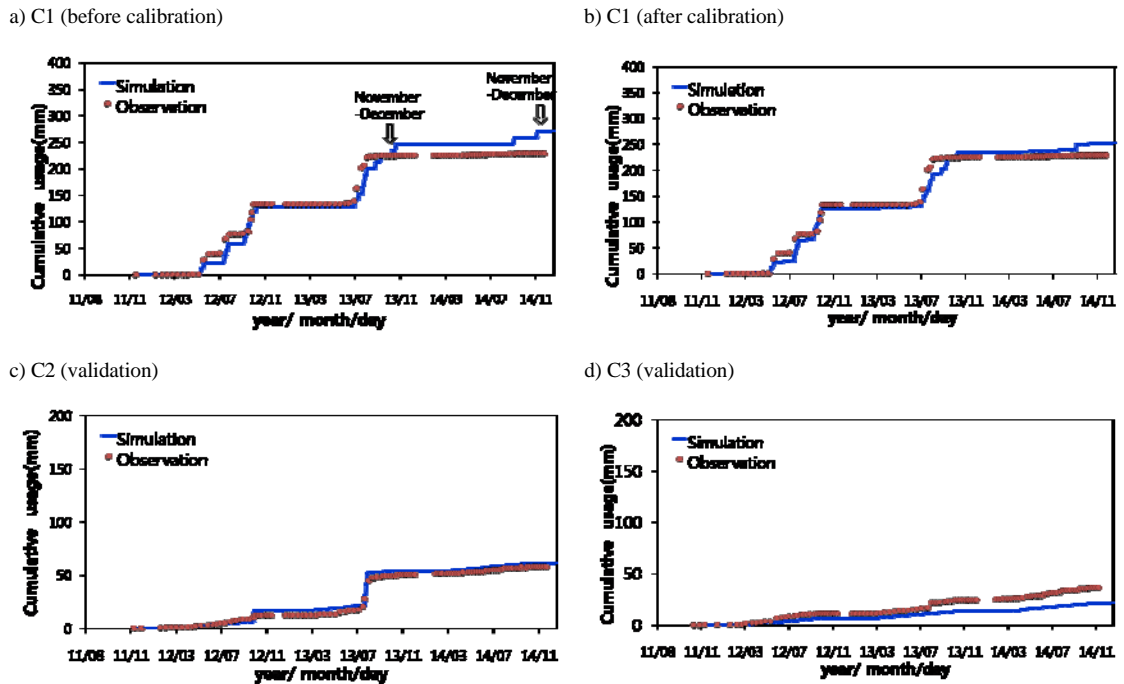


Fig. 5. Comparison of simulated usage and observed usage for citrus at orchards  
 a) simulation of groundwater usage for crop evapotranspiration with previous study's crop coefficient.  
 b, c, d) simulation of groundwater usage for crop evapotranspiration and multipurpose function with modified crop coefficient.

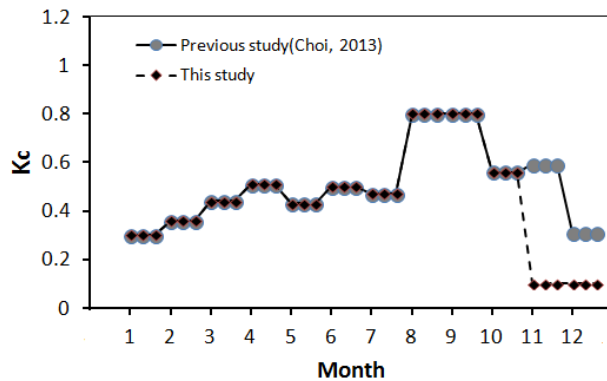


Fig. 6. Crop coefficients used for previous study (Choi et al., 2013) and this study for citrus at orchards.

예측할 수 있다는 차별성이 있다. 특히 마늘 발아 촉진을 위한 다목적 용수량을 표층토의 포화 수분량으로 정의하고 작물계수에 영향을 미치는 매개변수(RC)를 도입한 것은 기존 모델과 차이가 있다. 또한 9개 매개변수 중에

서 6개 변수가 정밀토양도, FAO 56 등 기존 자료로부터 도출 가능하여 실용적이라는 장점이 있다.

개발된 모델은 작물재배에 필요한 총 물의 양과 강수 중에서 이용량, 관개량을 산정할 수 있으므로, 지하수영



**Table 4.** Total water demand and supply derived by model at citrus orchards

(unit: mm/year)

Site	TAW (mm)	Total water demand (A=B+C)	Precipitation supply (B)	Irrigation supply (c)
C1	44.5	521	437.3	83.7
C2	97	535.5	515.1	20.4
C3	348	544.9	538.5	6.4
Average	163.2	533.8	497.0	36.8

향조사 시 관정 개발량 결정이나 수자원 개발·관리계획 수립에 활용이 가능하다. 3개 노지 감귤 과수원에 대한 3년간(2012~2014년) 지하수 이용량 모의 결과 감귤 생육을 위해 평균 533.8 mm/년의 물이 필요하며, 강수로 497 mm/년 (93.1%), 관개용수로 36.8 mm/년 (6.9%)가 공급되었다 (Table 4). 관개량은 총 이용가능 수분량 (TAW)에 따라 크게 변화하여 토양 심도가 작아 TAW가 작은 농경지는 감귤 재배를 위해 많은 용수가 필요한 것을 알 수 있다. 따라서 노지 감귤에 대한 지하수 개발 및 공급계획은 TAW가 적은 지역을 대상으로 우선 수립되어야 한다.

관개시기, 1회 관개량 및 작물계수 축소율 등의 매개변수는 경작자의 작물재배 경험, 지역별 관개급수 관행 등에 따라 차이가 크므로 향후 설문조사 등을 통해 이런 특성이 고려되면 모델의 설명력이 더 높아 질 것으로 생각된다. 또한 모델의 실용화를 위해서 제주도 전역 농경지 토양의 CN, TAW 등 매개변수의 DB화와 도내 재배면적이 넓은 하우스 감귤과 양배추등과 같은 타 작물에 대한 모델의 적용과 검증이 필요하다.

## 5. 결론

제주도에서 다량의 다목적 용수를 사용하는 마늘과 재배면적이 가장 넓은 노지감귤을 대상으로 토양 물수지 방법으로 지하수 이용량을 모의하는 모델을 개발하였다. 모델의 개발 및 매개변수 보정 및 검증에는 실제 이용량 관측 자료를 사용하였다.

1) 증발산에 소요되는 수분보급용수 외에 마늘 밭아 용수 등 다목적용수를 고려한 모델은 실제 지하수 이용량을 유사하게 모의할 수 있었다.

2) 본 모델은 마늘의 다목적 용수량을 표층토의 포화

수분량으로 정의하고, 작물계수에 영향을 미치는 멀칭효과를 설명하는 매개변수 (RC)를 도입한 점이 기존 모델과 차이가 있다.

3) 본 모델은 실제 지하수 이용량 관측 자료로 일부 매개변수를 보정 및 검증한 모델이며, 많은 변수를 정밀도양도, FAO 56 등 기존 자료로부터 도출 가능한 실용적인 모델이라는 장점이 있다.

4) 개발된 모델은 작물재배에 필요한 총 물의 양과 강수 중에 이용량, 관개량을 산정할 수 있으므로 지하수영향조사의 관정 개발량 결정이나 수자원 개발·관리개발 관리 계획 수립에 활용이 가능하다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업 “제주형 물순환 해석 및 수자원 관리 기반 구축 연구(10 지역기술혁신B02)” 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCE

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., 1998, Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements, FAO irrigation and drainage paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Choi, K. J., Song, S. H., Kim, J. S., Lim, C. W., 2013, Estimation of regional agricultural water demand over the Jeju Island, J. Environ. Sci. Int., 22(5), 639-649.
- Jeju Special Self-Governing Province(JSSP), 2013, Master plan for water resources management in Jeju Special Self-Governing Province.
- Jung, K. H., Jung, S. J., Sonn, Y. K., Hong, S. Y., 2006, Classification of hydrologic soil group of Korean soils,

- Report of National Academy of Agricultural Science (NAAS).
- Korea Rural Community Corporation(KRC), 2005, Estimation of irrigation water requirements for upland crops in Jeju.
- KRC, 2010, Hydrological operation model for water resources system.
- NAAS, 2015, Korean soil information system, <http://soil.rda.go.kr/soil/koreaSoils>.
- Ministry of Agriculture, Food, and Rural Affairs(MIAFRA), 1998, Planning and Design Criteria for the agricultural infrastructure maintenance projects ; irrigation.
- Seo, M. C., Hur, S. O., Cho, H. S, Jeon., W. T., Kim. M. K., Kim. M. T., 2012, The development of estimation model (AFKAE 0.5) for water balance and soil water content using daily weather data, Korean J. Soil Sci. Fert. 45(6), 1203-1210.
- Smith. M., 1992. CROPWAT : a computer program for irrigation planning and management by FAO Irrigation and Drainage Paper No. 26, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Song, S. H., Choi, K. J., Kim, J. S., 2013, Evaluation of regional characteristics using time-series data of ground-water level in Jeju Island, J. Environ. Sci. Int., 22(5), 609-623.