

# 관개블럭에서의 유출량 추정 모형 개발 -시스템의 개발 및 구성-

## Development of Runoff Simulation Model from Paddy Block - System formulation and Development -

김학관\*·박승우\*\*·임상준\*\*\*

Hak Kwan Kim·Seung woo Park·Sang Jun Im

### 요 지

본 연구에서는 관개블럭에서의 유출량을 추정할 수 있는 모형을 개발하였다. 개발된 모형은 관개량 자료, 기후 자료, 강수량 자료, 토양특성 자료 등을 입력받아 관개블럭의 담수심, 증발산량, 심층 침투량, 측방침윤량, 지표배수량 등을 모의하여 유출량을 추정할 수 있도록 구성하였다. 논에서의 물수지방정식을 기본으로 담수심을 추정하고, FAO 수정 Penman식을 이용하여 증발산량을 산정하며, 근역(root zone)의 토양수분을 고려하여 실제증발산량을 산정할 수 있도록 하였다. 심층 침투량(deep percolation)은 정상상태의 흐름방정식과 Richard식을 이용하여 산정하며, 지표배수량은 광정웨어공식과 Runge Kutta법을 이용하여 추정한다. 관개블럭에서의 최종유출량은 지표배수 관개량, 지표배수량, 침윤손실량의 합으로 계산하도록 모형을 구성하였다.

**핵심용어 : 유출량, 관개블럭**

### 1. 서 론

일반적으로, 농업유역의 논 관개지구는 저수지, 양수장 등의 수원공 시설로부터 농업용수를 취수하여 용수조직에 따라 관개지구로 도수되고, 포장에 유입된 수량은 담수심을 보충하며, 초과된 수량은 물꼬를 월류하여 배수로를 통해 하천으로 배수된다. 관개지구의 배수량은 강수량뿐만 아니라 당일의 담수심에 영향을 받게 되고, 관개량이나 강수량으로 인하여 증가된 담수심이 물꼬보다 높을 경우에는 지표 배수가 발생하며, 토양 중으로 침투되는 수량은 지하수위를 상승시키고, 장기간에 걸쳐 지하수 유출의 형태로 하천으로 유출된다.

이처럼 논 관개지구의 수문기작은 복잡하고, 기상, 작물, 토양 등의 물리적인 요소와 물관리 등의 인위적인 요인 등이 작용하기 있기 때문에 단순한 배수량의 측정만으로 그 양을 정확하게 추정할 수 없다. 따라서 논 관개지구의 정확한 유출량을 산정을 위해서는 관개량, 담수심, 물꼬높이, 토양수분변화 등을 고려하여야 하며, 관개지구의 유출량을 모의할 수 있는 수학적 모형을 구성하고 정밀한 수문모니터링 결과로부터 현장 적용성 평가를 수행하여야 한다.

따라서, 본 연구의 목적은 관개지구의 기본단위인 관개블럭의 유출량 추정을 위해 관개블럭의 담수심, 증발산량, 토양수분변화량, 지표배수량 등을 모의할 수 있는 관개블럭 단위에서의 유출모형을 개발하는데 있다.

\* 정회원·서울대학교 지역시스템공학과 박사수료E-mail : kwans2@snu.ac.kr

\*\* 정회원·서울대학교 지역시스템공학과 교수E-mail : swpark@snu.ac.kr

\*\*\* 정회원·서울대학교 산림환경학과 조교수E-mail : junie@snu.ac.kr

## 2. 모형의 구성

본 모형에서는 논에서의 물수지를 기본으로 하여 관개블럭 단위에서의 유출량의 변화요소는 그림 1과 같은 기본요소로 구성되는 것으로 가정하여 모형을 구성하였다. 그림 1과 같이 강우량, 관개량, 증발산량, 심층 침투량, 측방침윤량, 지표배수량 등으로 구성되며, 식(1)과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$WD_t = WD_{t-1} + RAIN_t + WIRR_t - ETA_t - VTFLO_t - HZFLO_t - SURFLO_t \quad (1)$$

여기서, WD는 담수심(mm), RAIN은 강우량(mm), WIRR은 관개량(mm), ETA은 실제증발산량, VTFLO는 심층 침투량(mm), HZFLO는 논둑을 통해 손실되는 측방침윤량, SURFLO는 지표배수량(mm), t는 시간(day)이다.

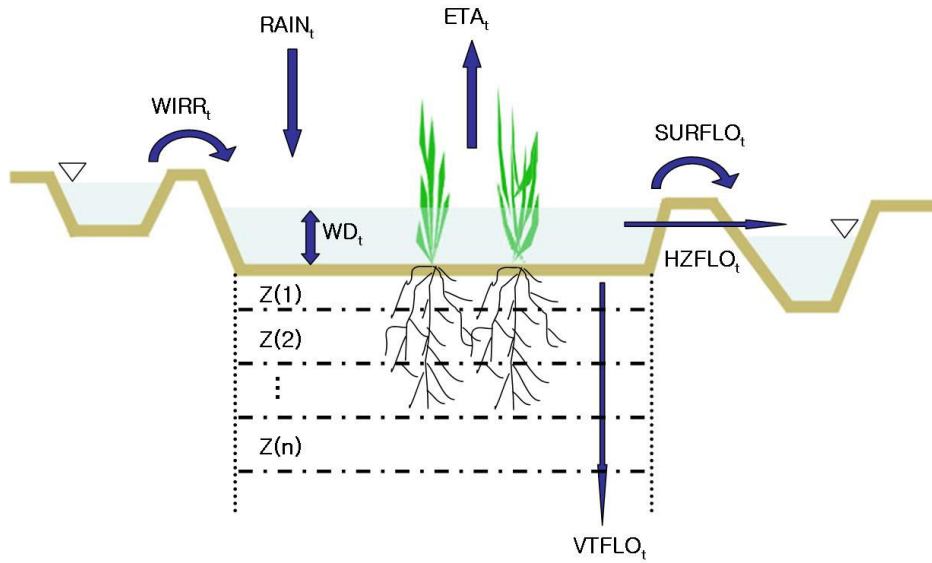


그림 1. 논에서의 물수지 구성요소

### 2.1 실제증발산량

논에서의 실제증발산량은 식(2)와 같이 구하였다.

$$ETA_t = KC_t \cdot KSS_t \cdot ETP_t \quad (2)$$

여기서, ETA는 논에 실제증발산량(mm/day), KC는 논벼의 작물계수, KSS는 토양수분계수, ETP는 잠재증발산량(mm/day), t는 시간(day)이다.

잠재증발산량은 FAO-24 Penman method(Doorenbos and Pruitt, 1984)을 이용하여 식(3)과 같이 계산하였다.

$$ET_p = C [ W \cdot R_n + (1 - W) \cdot f(u) \cdot (e_a - e_d) ] \quad (3)$$

여기서, ETP는 기준작물(reference crop)의 잠재증발산량(mm/day), W는 온도로 계산되는 가중치(weighting factor), Rn은 순일사량(mm/day), f(u)는 풍속함수, ea는 평균기온에서의 포화증기압(mmHg), ed는 대기에서의 실제 평균 증기압(mmHg)이며, C는 주야의 기후차에 의한 보정계수이다.

토양수분계수 KSS는 근역(root zone)에서의 토양수분 효과를 고려하기위한 계수로써, 실제 토양함수율과 포화상태에서의 토양함수율의 관계를 이용하여 식(4)~식(6)과 같이 계산한다(Li와 Cui,1996).

$$KSS_t = 1.0, \quad WACO_t \geq SWCO_t \quad (4)$$

$$KSS_t = \frac{\ln[1 + 100(1 - SWCO_t/WACO_t)]}{\ln 101}, \quad n \cdot SWCO_t \leq WACO_t < SWCO_t \quad (5)$$

$$KSS_t = \varepsilon \cdot \exp\left(-\frac{WACO_t - n \cdot SWCO_t}{n \cdot SWCO_t}\right), \quad WACO_t < n \cdot SWCO_t \quad (6)$$

여기서, WACO는 실제 토양수분 함수비, SWCO는 포화상태에서의 토양함수비,  $n$ ,  $\varepsilon$ 는 경험계수,  $t$ 는 시간(day)이다.

## 2.2 심층 침투량

심층 침투량(deep percolation)은 작물 또는 식생의 근역 밑으로 손실되는 양으로 본 연구에서는 토양이 포화상태인 경우와 비포화상태인 경우로 구분하였으며, 모두 연직방향의 흐름만을 고려하여 계산하였다.

### 2.2.1 포화상태에서의 심층침투량

포화상태일때의 심층침투량은 정상상태의 흐름방정식을 이용하였다. 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (7)$$

여기서,  $h$ 는 수두(m),  $z$ 는 깊이(m)이다.

식(7)을 풀기위하여 수치적 방법인 LU 분해법을 이용하였다.

### 2.2.2 비포화상태에서의 심층침투량

비포화상태에서의 심층침투량은 Richards 식을 이용하여 다음과 같은 연속방정식을 이용하여 계산하였다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial(-k(\theta) \frac{(\partial \Psi(\theta))}{(\partial z)})}{\partial z} \quad (8)$$

여기서,  $\theta$ 는 토양함수비( $m^3/m^3$ ),  $t$ 는 시간(s),  $k$ 는 수리전도도(m/s),  $\Psi$ 는 모관수두와 깊이에 따른 수리학적 수두,  $q$ 는 비유속(m/s),  $z$ 는 깊이이다.

식(8)을 이산방정식(discretised equation)으로 변환하면 식(9)와 같다.

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{\Delta q}{\Delta z} = q_{inflow} - q_{outflow} \quad (9)$$

여기서,  $q_{inflow}$ 는 토양층으로 유입되는 양(m/s),  $q_{outflow}$ 는 토양층에서 유출되는 양(m/s)이다.

식(8)과 식(9)를 이용하여 상위층(u)과 하위층(l)과의 유량변화는 식(10)~식(11)과 같이 계산한다.

$$q = k_{eff} \cdot \frac{h_h(\theta_u) - h_h(\theta_l)}{0.5 \times (d_u + d_l)} \quad (10)$$

$$\frac{1}{k_{eff}} = \frac{d_u}{d_l + d_u} \cdot \frac{1}{k(\theta_u)} + \frac{d_l}{d_l + d_u} \cdot \frac{1}{k(\theta_l)} \quad (11)$$

여기서,  $q$ 는 두 층사이에 흐르는 유량(m/s),  $k_{eff}$ 는 유효 수리전도도(m/s),  $h_h$ 는 수리학적 수두(m),  $d$ 는 토양층의 두께(m)이다.

불포화 토양층의 함수비는 Van Genuchten식(1980)을 이용하여 계산하였다. 사용된 식은 아래와 같다.

$$\psi(\theta) = \frac{1}{\alpha} \left[ \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{-\frac{1}{m}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} \quad (12)$$

$$\frac{k(\theta)}{k_s} = \left[ \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (13)$$

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left( \frac{1}{1 + (\psi a)^n} \right)^m \quad (14)$$

여기서,  $\psi$  는 모관압력수두(m),  $a$  는 경험계수(1/m),  $n$ ,  $m$  은 경험계수( $m=1-1/n$ ),  $\theta$  는 실제함수비,  $\theta_r$  는 잔류함수비,  $\theta_s$  는 포화함수비,  $k_s$  는 포화상태의 수리전도도(m/s)이다.

### 2.3 측방 침윤량

측방 침윤량은 논안의 물이 논둑을 통해 배수로 또는 다른 논으로 횡방향으로 침윤되는 양을 의미하며, 아래 식(15)와 같이 계산한다.

$$HZFLO_t = \frac{\Delta H}{R_{hor}} \quad (15)$$

여기서,  $\Delta H$ 는 필지수위와 배수로 수위의 수두차이(mm),  $R_{hor}$  는 수압저항력(hydraulic resistance[days])이다. 수압저항력은 Ernst 방정식을 이용하여 식 (16)과 같이 계산한다(ILRI, 1983).

$$R_{hor} = \frac{L^2}{8T} \quad (16)$$

여기서, L은 배수로 사이의 거리(mm), T는 투수계수(transmissivity)이다.

### 2.4. 지표배수량

지표배수량이란 관개지구에 공급된 수량이 물꼬를 넘어 배수로나 하천으로 지표 월류하는 양으로 담수심과 물꼬높이에 영향을 받는다. Odhiambo와 Murty(1996)는 지표배수량과 담수심을 추정하기 위하여 다음 3가지를 가정하였다. 첫째, 논에서의 유속 및 물꼬의 월류속도를 무시한다. 둘째, 배수되는 물은 논둑을 월류하지 않는다. 셋째, 논둑면은 지표와 수직을 이루며, 관개지구 면적은 담수심과 무관하다. 이상의 가정을 통해 식 (17)과 같이 물꼬 상류 수두 변화를 상미분 방정식으로 표현하였다.

$$\frac{dH}{dt} = [WIN(t) - SURFLO(H_t)]/A \quad (17)$$

여기서, WIN(t)는 시간에 대한 논에서의 관개유입량, SURFLO(H<sub>t</sub>)는 물꼬 상류높이(H<sub>t</sub>)에 대한 물꼬를 통해 배수되는 양, A는 필지 면적, t는 시간간격이다.

WIN(t)는 t시간동안의 강수량과 관개량의 합이며, SURFLO(H<sub>t</sub>)는 광정 weir(broad crested weir) 공식에 의해 아래와 같이 계산한다.

$$SURFLO(H_t) = \mu \cdot LEN \cdot H^{1.5} \quad (18)$$

여기서,  $\mu$ 는 유량계수, LEN은 물의 흐름방향과 수직되는 물꼬 폭(m), H는 물꼬 상류높이이다.

물꼬를 통하여 유출되는 광정 weir의 유량계수는 아래와 같이 구할 수 있다(Wang과 Hagan, 1981)

$$\mu = \frac{\sqrt{2g}}{2} \left[ \left( \frac{DisCF^2 - 1}{DisCF^2} \right) \left( \frac{GateHgt + H}{DisCF(GateHgt + H) - H} \right) \right]^{0.5} \quad (19)$$

여기서, GateHgt는 물꼬높이(m)이고, DisCF는 상수이다. 상수 DisCF의 값은 자유흐름 조건에서는 2.0이며, 정상흐름조건인 경우에는 1.7이다. 물꼬를 월류하는 경우는 자유흐름과 정상흐름이 복합적으로 일어나므로 평균값이 1.85를 사용하였으며, 일반적으로 광정 weir의 유량계수는 0.85에서 1.0의 범위를 가진다.

식 (19)를 풀기위하여 수치적 방법인 고전적인 4차 Runge-Kutta법을 이용하였다.

## 2.6 관개블럭에서의 유출량

관개블럭에서의 최종유출량은 식(20)과 같이 계산한다.

$$PRF_t = OF_t + SURFLO_t + HZFLO_t \quad (20)$$

여기서, PRF는 관개블럭에서의 최종유출량(mm), OF는 지표배수 관개량(mm), HZFLO는 침윤손실량(mm)이다.

월류량, OF는 다음과 같이 구한다.

- ① 무강우시에는 0으로 한다.
- ② 강우량에 의하여 증가된 담수심이 물꼬보다 높을 경우에는 관개량을 모두 지표배수 관개량으로 한다.

## 3. 요약 및 결론

본 연구에서는 관개블럭에서의 유출량을 추정할 수 있는 모형을 개발하였다. 개발된 모형은 관개량 자료, 기후 자료, 강우량 자료, 토양특성 자료 등을 입력받아 관개블럭의 담수심, 증발산량, 심층 침투량, 측방침윤량, 지표배수량 등을 모의하여 유출량을 추정할 수 있도록 구성하였다. 논에서의 물수지방정식을 기본으로 담수심을 추정하고, FAO 수정 Penman식을 이용하여 증발산량을 산정하며, 근역(root zone)의 토양수분을 고려하여 실제증발산량을 산정할 수 있도록 하였다. 심층 침투량(deep percolation)은 정상상태의 흐름방정식과 Richard식을 이용하여 산정하며, 지표배수량은 광정웨어공식과 Runge Kutta법을 이용하여 추정한다. 관개블럭에서의 최종유출량은 지표배수 관개량, 지표배수량, 침윤손실량의 합으로 계산하도록 모형을 구성하였다. 향후 관개블럭에서의 수문모니터링을 활용하여 모델의 적용성을 평가하여 시스템이 구축된다면, 본 연구에서 개발된 모형은 논둑에 의한 저류, 물꼬규모에 따라 좌우되는 논에서의 유출특성을 규명하는데 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 감 사 의 글

본 연구는 농림부 농림기술개발사업의 지원에 의해 이루어진 것임

## 참 고 문 헌

1. 김철겸, 박승우, 임상문, 2000. 논 의 유출특성을 고려한 소유역의 유출곡선 합성, 한국농공학회지, 42(6), pp. 56-62.
2. 임상준, 2000. 농업유역의 논 관개회귀수량 추정 모형의 개발, 서울대학교 박사학위 논문
3. Doorenbos, J. and Pruitt, W. O., 1984. Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. Irrig. Drain. Pap. 24, FAO, Rome 144 pp.
4. ILRI, 1983. Drainage Principles and Applications. Vol. II, Theories of Field Drainage and Watershed Runoff. ILRI Publ. 16, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen.
5. Li, Y. H. and Cui, Y.L., 1996. Real-time Forecasting of Irrigation Water Requirements of Paddy Fields. Agricultural Water Management, 31:185-193.
6. Odhiambo, L.O. and Murty, V.V.N., 1996. Modeling Water Balance Components in Relation to Field Layout in Lowland Paddy Fields(I), Agricultural Water Management, 30:185-199.
7. Van Genuchten, M.T., 1980, A Closed-Form equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Jr. of Soil Sci. Soc. Am., pp.892-898.
8. Wang, J.K. and Hagan, E.R.(Editors), 1981. Irrigated Rice Production Systems : Design Procedures. Westview Tropical Agriculture Series, No. 3, 192 pp.