ISSN 0367-6315 (Print) / ISSN 2288-2162 (Online)
Korean J. Soil Sci. Fert. 48(4), 246-254 (2015)
http://dx.doi.org/10.7745/KJSSF.2015.48.4.246

**Article**

# Estimating Irrigation Requirement for Rice Cropping under Flooding Condition using BUDGET Model

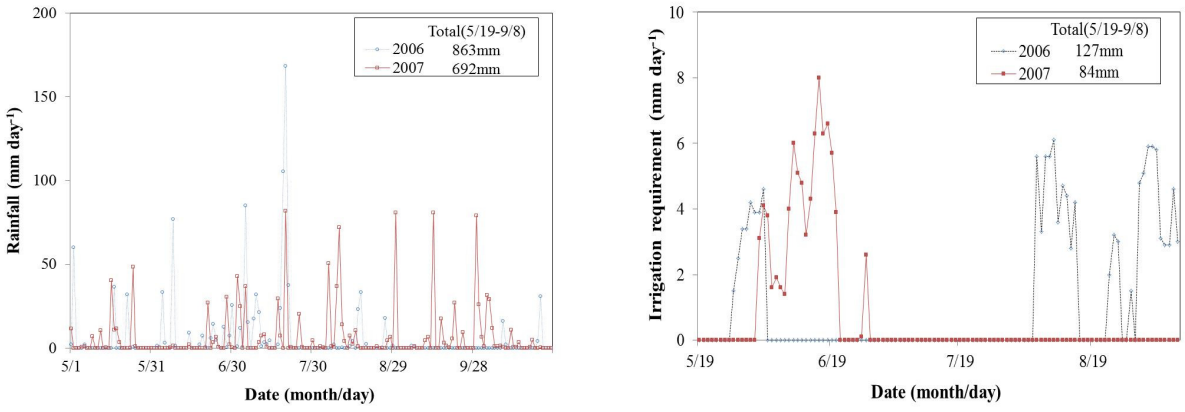
**Mi-jin Seo, Kyung-Hwa Han*, Yong-Seon Zhang, Kang-Ho Jung, and Hee-Rae Cho**

*Soil and Fertilizer Division, National Academy of Agricultural Science, RDA, Wanju, 565-851, Korea*

(Received: July 14 2015, Revised: July 27 2015, Accepted: July 29 2015)

**This study explored the effect of rainfall pattern and soil characteristics on water management in rice paddy fields, using a soil water balance model, BUDGET. In two sites with different soil textural group, coarse loamy soil (Gangseo series) and fine soil (Hwadong series), respectively, we have monitored daily decrease of water depth, percolation rate, and groundwater table. The observed evapotranspiration (ET) was obtained from differences between water depth decrease and percolation rate. The root mean square difference values between observed and BUDGET-estimated ET ranged between 10% and 20% of the average observed ET. This is comparable to the measurement uncertainty, suggesting that the BUDGET model can provide reliable ET estimation for rice fields. In BUDGET model of this study, irrigation requirement was determined as minimum water need for maintaining water-saturated soil surface, assuming 100 mm of bund height and no lateral loss of water. The model results showed different water balance and irrigation requirement with the different soil profile and indicated that minimum percolation rate by plow pan could determine the irrigation requirement of rice paddy field. For the condition of different rainfall distribution, the results presented different irrigation period and amounts, representing the importance of securing water for irrigation against different rainfall pattern.**

**Key words:** Rice paddy field, Irrigation requirement, BUDGET, Rainfall pattern, Percolation




**(a)** **(b)**

**The effect of rainfall distribution (a) on irrigation requirement† (b) in flooded loamy rice field with plow pan permeability 3 mm day$^{-1}$ predicted by the BUDGET model.**
**†The water need for maintaining water-saturated condition in surface soil.**

*Corresponding author : Phone: +82-63-238-2432, Fax: +82-63-238-3822, E-mail: bearthink@korea.kr
§Acknowledgement : This project was supported by National Academy of Agricultural Science (PJ010867).

## Introduction

인구의 증가로 식량의 대량 생산이 필요해짐에 따라 식량난 해소를 위한 대규모의 활발한 농업활동이 행해지면서 이는 관수를 위한 수자원의 공급을 요구해왔다. 한국의 경우 수자원 중 농업용수로 사용되는 물이 62% (MOLIT, 2011)에 이를 정도로 수자원 이용이 농업에 크게 편중되어 있는 편이다. 특히, 한국의 경우 논농사가 차지하는 비율이 크며 벼 재배시 물은 식물흡수뿐 아니라 담수를 위한 용수 공급이 필요하여 생육기간 동안 관개요구량이 다른 작물에 비해 매우 큰 작물이다. 전체 농업용수의 80% 정도가 논농사에 이용될 정도로 큰 부분을 차지하고 있다 (NAAS, 2010). 이런 점에서 논에서 물을 절약할 수 있는 방안을 마련한다면 농업용수절감 및 수자원의 보존과 관리 측면에 매우 긍정적인 영향을 끼칠 것이다.

물 소모량을 줄일 수 있는 방안에 대한 연구는 다양한 환경조건에서의 연구가 선행될 필요가 있다. 논에서의 물 관리에 미치는 영향은 토양환경 상태, 이상기후 등 다양한 환경조건에서 달라질 수 있기 때문이다. 농업생산환경이 기계화로 대체되면서 벼의 경우 건조를 제외한 거의 모든 농작업이 기계화로 변하였고 트랙터의 보급은 쟁기질의 생략과 로터리 경운의 대체를 야기해 토양을 얕게 가는 천경화 현상을 두드러지게 만들었다. 이러한 변화는 토양의 특성을 변화시키고 식물의 근권 영역에 영향을 주어 물의 침투와 보유에 영향을 끼칠 수 있다. 또한, 최근 두드러지는 잦은 집중강우와 이상기후 등 기후변화는 대기-식물-토양 연속계를 통한 물의 순환과 매우 밀접한 관계가 있어 토양의 적정 물 관리를 어렵게 하는 큰 요인이 되고 있다. 강우량이 많다 하더라도 강우의 분포가 집중강우로 편중되어 있어 강우가 적은 갈수기 또는 저수기 기간 동안 관개용수의 확보가 고르지 못하기 때문이다. 특히, 벼 재배 논 포장에서는 생육시기에 따른 물 요구량이 달라 강우 패턴의 변화가 물 관리에서 매우 중요한 인자가 될 수 있다. 이와 같은 다양한 환경조건에서의 물 관리 연구에 대해 Chae and Kim (2001)은 논에서의 관개수량을 절약하기 위한 목적으로 서로 다른 토성이 삼투수량에 미치는 영향을 연구한 바 있으며, Kim et al. (2001)은 무경운 담수직파, 경운 담수직파, 재식 세가지 벼 재배 방법에 따른 물의 삼투수량과 관개요구량, 그리고 질산태 질소의 용탈을 연구한 바 있다. Oh and Yoo (1972)는 논 토양에서의 감수심에 대한 연구에서 우리나라 평균 감수심과 토성별 감수심에 대한 물 소모량을 보고하였으며, 농업기술 길잡이 (구 표준영농교본; RDA, 2013)는 많은 연구를 바탕으로 논에서의 물 요구량의 산정과 생육시기별 담수심 조절 등 합리적인 물 관리 방법을 제시하였다. 모델링을 통한 연구는 장단기적 물 관리 체계를 구축하는데 효과적인 방법이 될 수 있어 토양 및 수자원 관리와 관련된 모델링 연구 또한 활발히 진행되고 있는 중이다. Nasyrov (2008)은 우즈베키스탄에서 부족한 수자원의 적절한 이용을 위해 작물의 물 요구량과 관개수량을 측정할 필요가 있다고 말하면서 BUDGET (Raes, 2002) 모형을 이용한 바 있으며, Kenjabaev et al. (2013) 또한 BUDGET 모형을 이용하여 우즈베키스탄 Fergana 지역에서 현재의 관개 시스템으로 주요작물인 목화와 밀의 생산량과 토양수분함량을 모의하고 실측값과의 비교를 통해 BUDGET 모델의 이용가능성을 평가한 바 있다.

모델을 활용한 물수지 평가는 기후 및 토양환경 특성을 고려하여 다양하게 접근할 수 있으며 특히 벼논의 경우 관리특성이 다른 작물에 비해 균일하여 모델링의 유용성이 큰 장점이 있다. 하지만 벼 논에 대한 모형의 적용은 거의 이루어진 바 없으며, 더욱이 최소의 입력자료를 바탕으로 대기-식물-토양의 연속계를 모두 고려하여 물의 이동을 연구할 수 있는 장점을 가진 BUDGET 모형의 적용 사례는 미미하다. 더욱이 BUDGET의 경우 논둑의 영향을 고려할 수 있다는 점에서 다른 모형들보다 벼논의 물수지 평가에 유용하다. 따라서 본 연구에서는 농경지에서의 물 소모량을 줄이기 위한 방안으로 물 소모량이 가장 많은 논에서 BUDGET 모형을 이용하여 기후변화 및 토양환경 조건이 물 관리에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 구체적으로 토양환경 조건의 경우 서로 다른 특성을 가진 두 논 토양이 관개요구량 및 물수지에 미치는 영향을 모의·분석하였으며 경작으로부터의 쟁기바닥층 발달에 의한 투수속도의 변화에 따른 모의 및 분석을 수행하였다. 기후조건의 경우 강우 분포에 따른 관개요구량 및 물수지의 변화를 알아보기 위해 다른 강우패턴을 적용하여 모의를 수행하였다.

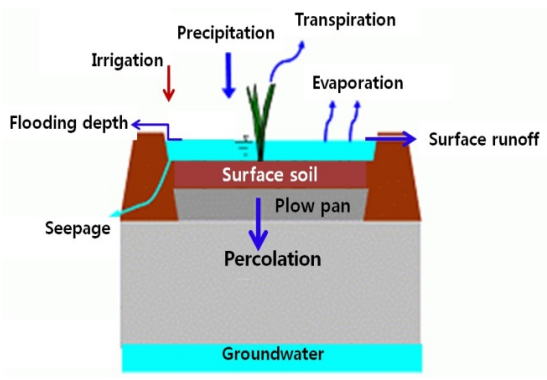
## Materials and Methods

**연구지점** 수원지역의 벼 포장 두 지점 (Table 1)을 연구대상으로 하여 벼 담수기 동안의 관개요구량과 물수지를 모의하였다. 지점 1 (N37°16.22' E126°59.38')은 토양도상으로 조립질 토양인 강서통으로 분류되며 양토가 주 토성이며, 지점 2 (N37°15.70' E126°59.16')는 세립질 토양인 화동통으로 분류되고 미사질 식양토가 주 토성이다 (Table 1). 수원지역의 벼는 일반적으로 5월에 정식하여 9월 초에 낙수하고 10월에 수확을 하는데 2010년 지점 1, 2에서 모내기 일자는 각각 5월 26일, 5월 19일이었다. 기준증발산량 ($ET_o$) 산정에 필요한 기상자료는 수원 기상대 (N37°16' E126°59')로부터의 2006, 2007, 2010년 일별 자료를 이용하였다.

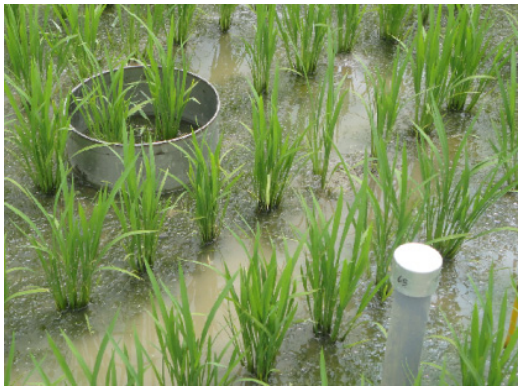
**벼논에서 물수지인자와 감수심 측정** 벼 담수기동안 물수지 인자는 유입으로 관개, 강우, 유출로는 증발산, 삼투, 표면유거가 대표적이다 (Fig. 1(a)). 논둑에서 물의 누수

**Table 1. Physico-chemical properties of studied soil profiles.**

| Site | Soil | Horizon | Sand (%) | Silt (%) | Clay (%) | Soil texture | Bulk density (Mg $m^{-3}$) | OM (g $kg^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Site 1 | Coarse loamy soil (Gangseo Series, coarse loamy, mixed, nonacid, mesic family of Aquic Fluvaquentic Eutrudepts) | Ap (0-13) | 46.9 | 41.9 | 11.2 | Loam | 1.31 | 18.3 |
| | | BAg (13-28) | 49.0 | 39.4 | 11.6 | Loam | 1.61 | 8.1 |
| | | Bw (28-78) | 52.3 | 37.3 | 10.4 | Loam | 1.55 | 8.1 |
| | | BC (78-90) | 61.4 | 31.4 | 7.2 | Sandy loam | 1.39 | 5.3 |
| | | C (90-130) | 82.1 | 14.7 | 3.2 | Loamy fine sand | 1.44 | 1.2 |
| Site 2 | Fine soil (Hwadong Series, mixed, mesic family of Aquic Hapludalfs) | Ap1 (0-15) | 12.0 | 57.1 | 30.9 | Silty clay loam | 1.30 | 27.0 |
| | | Ap2 (15-20) | 21.5 | 57.3 | 21.2 | Silty clay loam | 1.48 | 15.7 |
| | | BAg (20-40) | 13.1 | 56.3 | 30.6 | Silty clay loam | 1.48 | 7.9 |
| | | Bt (40-90) | 3.3 | 41.1 | 55.6 | Silty clay | 1.39 | 4.0 |
| | | BCt (90-150) | 9.9 | 49.2 | 40.9 | Silty clay | 1.39 | 2.0 |




(a) Water balance factors



(b) Cylinder type apparatus

**Fig. 1. Water balance factors (a) and cylinder type apparatus for measuring the decrease of water depth (b) in the rice paddy field.**

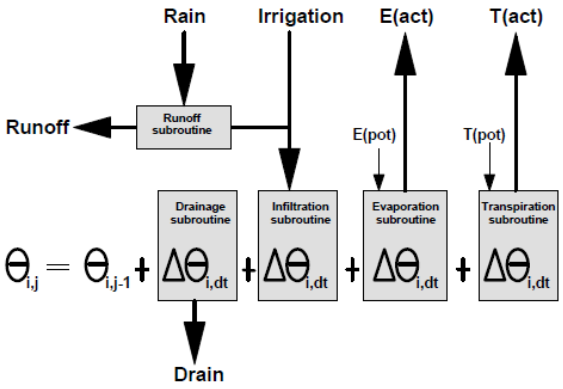



**Fig. 2. Calculation in the BUDGET model using finite difference method.**

가 일어날 수 있으나 본 연구에서는 이는 제외하였다. 벼 포장에서 물의 유출 중 표면유거는 물꼬높이에 의해 좌우되는데, 연구지점에서는 약 100 mm에 해당하였다. 강우로 담수위가 100 mm이상이 되면 물꼬를 넘어 물이 유거된다. 비강우기에 물 유출은 증발산과 삼투에 의해 좌우된다. 증발산은 일사량 등의 기상조건에 따라 변화하며 삼투의 경우 쟁기바닥층, 지하수위 등의 토양조건에 따른다. 벼 포장에서는 감수심 측정장치를 이용하여 비강우기에서 물 유출량을 산정할 수 있다. 감수심측정장치는 Fig. 1(b)와 같다. 무저원통을 벼논에 단단히 고정시킨 후 후크게이지를 장착하여 눈금을 읽고 24시간 후 감소된 수위를 다시 읽어 측정하였

다. 측정은 지점당 3반복 하였으며, 2010년 6, 7, 8월을 대상으로 하였다. 감수심 측정시 삼투량은 덮개가 덮인 PVC 관에서의 수위 감소로 측정하였다. 감수심 측정치로부터 삼투량을 뺀 증발산량 측정치와 모델의 추정치를 엑셀을 이용하여 평균제곱편차 (RMSD, root mean square difference)를 구함으로써 모델의 검·보정을 실시하였다.

**BUDGET 모형 이론** BUDGET 모형 (Version 5.0)은 대기-식물-토양의 연속계를 통한 물의 이동을 연구할 수 있는 토양 수분 수지 모형으로 이와 관련된 침투, 투수, 관개, 기상, 토양, 작물 프로세스를 다루는 다양한 서브루틴들로 구성되어 있어 토양층에서의 수분 이동과 식물 뿌리를 통한 물의 이동에 대한 프로세스를 비교적 정확하게 모의하여 물수지를 평가하고 관개계획을 설정하는데 활용할 수 있는 유용한 모델이다.

BUDGET 모형에서 대상 작물 성장기간 동안의 토양 수분 (θ) 연구는 토양 깊이 (z)와 시간 (t)에 따른 유한차분법 (Finite difference method)으로 해석할 수 있다 (Fig. 2; Raes, 2002). Fig. 2에서 사용된 변수인 $\theta_{ij}$는 i번째 토양 깊이와 j번째 시간의 토양수분함량 [$m^3m^{-3}$], $\Delta\theta_{ij}$는 i번째 토양 깊이에서 Δt에 따른 토양수분함량의 변화 [$m^3m^{-3}$], E (pot)와 E (act)는 각각 토양으로부터의 증발량과 실제증발량 [mm], T (pot)와 T (act)는 각각 작물로부터의 증산량과 실제증산량 [mm]을 의미한다.

토양층 밖으로 배수되는 양 (D)은 Eq. 1과 같이 계산하는데,

$$D = 1000\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta t}\right)(\Delta z)(\Delta t) \quad \text{(Eq. 1)}$$

여기서, D: 마지막 모의에 토양층 밖으로 배수되는 물의 양 [mm]
$\Delta\theta/\Delta t$: 배수되는 토양층에서 시간간격 Δt에 따른 토양수분함량의 변화 [$m^3m^{-3}day^{-1}$]
Δz: 배수되는 토양층의 두께 [m]
Δt: 시간간격 [day]

토양수분이 균등하게 분포하지 않는 토양이거나 다른 유출특성을 가진 토양층 사이에서의 배수량 계산은 각 토양층의 깊이 ($\Delta z_i$)별 토양수분 감소 ($\Delta\theta_i$)에 따른 누적량 ($\sum D_i = D_1 + D_2 + D_3 + \cdots$)으로써 계산된다.

서로 다른 토양특성을 가진 토양층 안에서와 밖으로의 토양수분함량의 감소 ($\Delta\theta_i$)에 대한 모의는 배수 함수 (Drainage function; Eq. 2)에 의해 지배되며 (Raes, 1982; Raes et al., 1988), 포장용수량 (Field capacity)의 경계까지로 제한되고 그 이상에서는 일어나지 않는다.

$$\frac{\Delta\theta_i}{\Delta t} = \tau(\theta_{SAT} - \theta_{FC})\frac{e^{\theta_i - \theta_{FC}} - 1}{e^{\theta_{SAT} - \theta_{FC}} - 1} \quad \text{(Eq. 2)}$$

여기서, $\Delta\theta_i/\Delta t$: Δt시간동안 i번째 토양층에서의 토양수분 감소 [$m^3m^{-3}day^{-1}$]
τ: 유출 특성 계수
$\theta_i$: i번째 토양층에서의 실제 토양수분함량 [$m^3m^{-3}$]
$\theta_{SAT}$: 포화상태의 토양수분함량 [$m^3m^{-3}$]
$\theta_{FC}$: 포장용수량 상태의 토양수분함량 [$m^3m^{-3}$]
Δt: 시간간격 [day]

지표면 유출 (Surface runoff)은 토양층으로의 침투속도보다 강우강도가 높을 때 발생하며 U.S. Department of Agriculture (USDA)에서 개발된 Curve Number (CN) 방법을 이용하여 계산한다 (USDA, 1964; Rallison, 1980; Steenhuis et al., 1995). (Eq. 3)

$$RO = \frac{[P - (0.2)S]^2}{P + (0.8)S} \quad \text{(Eq. 3)}$$

$$S = 254\left(\frac{100}{CN} - 1\right)$$

여기서, RO: 지표면 유출량 [mm]
P: 강우량 [mm]
(0.2)S: 지표면 유출 발생 전 초기 토양층으로 침투할 수 있는 물의 양 [mm]
S: 토양층에서의 잠재적인 최대 저장량 [mm]
CN: 강우 유출 잠재력

토양층으로의 침투량은 강우로부터 지표면 유출을 제외한 나머지 양 또는 관개수량에 의해 결정되며 관개가 지정될 경우 우선 관개수 또는 강우에 의한 토양층으로의 침투 후 나머지 물이 지표면 유출로 간주된다. 작물의 증발산량 ($ET_{crop}$)은 FAO Penman-Monteith 공식에 의한 기준 작물 증발산 (Reference crop evapotranspiration; $ET_o$)과 작물계수 ($K_c$)의 곱으로 계산하며, 토양으로부터의 증발 ($E_{pot}$)과 작물에 의한 증산 ($T_{pot}$)의 합으로 얻어질 수 있다. BUDGET 모형에서는 토양이 습윤하다는 것을 가정하고 증발산량 ($ET_{crop}$)을 계산하기 때문에 $E_{pot}$와 $T_{pot}$은 잠재적인 최대 양이다. $E_{pot}$는 Ritchie-type 공식 (Belmans et al., 1983)에 의해 계산되며, 따라서 $T_{pot}$는 $ET_{crop}$과 $E_{pot}$의 차에 의해 계산된다. 작물 생산량의 감소는 생산반응계수 ($K_y$)에 의해 지배된다 (Doorenbos and Kassam, 1979).

**BUDGET 모형 적용** BUDGET 모형에서 기준증발산

량은 대형증발량 (USA Class A pan) 자료를 이용하여 계산할 수 있으며, 수원 농업기상대로부터 자료를 취득하였다. 잠재증발산량은 대형증발량 자료에 상대습도와 풍속에 따라 달라지는 pan coefficient 값을 곱하여 결정되는데 이 값은 Jensen et al. (1980)을 바탕으로 하였다. 작물의 증발산량 ($ET_{crop}$) 계산은 기준증발산량 ($ET_o$)에 작물계수를 곱하여 계산되며 벼의 작물계수는 1.2로 적용하였다.

벼 담수기 물수지는 일정 담수위를 유지하기 위한 관개 또는 강우에 의한 물 유입과 유거, 배수, 삼투, 누수 등에 의한 물 유출로 나타낼 수 있다. 벼의 담수위는 생육시기에 따라 달라지나 본 모델링에서는 표토층 (Ap)이 포화를 유지하는 조건을 설정하여 최소관개조건으로 구동하였다. 초기 담수위는 10 mm, 최대 담수위는 100 mm로 정하여 강우시에 담수위가 0–100 mm로 변동할 수 있는 조건을 부여하였으며, 담수층으로부터의 누수는 없다고 가정하였다. 관개기간은 강서통과 화동통 지점 각각 모내기 일자 (지점1: 5/26, 지점2: 5/19)부터 낙수일 (9/8)까지로 설정하고, 그 사이를 모의 기간으로 설정하였다. 토양환경조건에 대한 모의는 2010년을 기준으로 하였으며, 각 지점에서 관개요구량 및 물수지의 일별 모의를 수행하였다. 토양특성에 따라 쟁기바닥층의 수리전도도가 다르므로 이에 따른 관개요구량 및 물수지를 비교·분석하였다. 이때 쟁기바닥층의 수리전도도는 벼 수확 후 3인치 코아를 불교란으로 채취하여 변수위법 (NIAST, 2000)으로 실험실에서 측정한 자료를 활용하였다. 기후조건에 대한 모의는 다른 패턴의 강우 분포를 보여주는 2006년과 2007년 일별 강우자료를 적용하여 물수지와 관개요구량에 대한 영향을 비교·분석하였다.

## Results and Discussion

### 벼 포장에서 물소모량 및 BUDGET 모형의 적용성

연구지점의 감수심은 4~12 mm $day^{-1}$ 정도의 범위를 나타냈다 (Fig. 3). 감수심 측정은 2010년 7월말부터 9월 중순경까지 잦은 국지성 강우 때문에 감수심 측정 대상기간 동안 개방형 무저원통을 활용하여 측정가능한 일자가 적었다 (Fig. 4). 6월에는 모내기일자가 일주일 늦은 지점 1이 지점 2보다 감수심이 약간 낮게 나타났다. 이후 7월에는 지점1이 지점2보다 높게 나타나다 8월에서 유사해지는 경향을 나타내었다. 6월의 감수심 차이는 모내기일자에 따른 벼 생육 차이로 판단할 수 있었으며 7월의 경우는 삼투량에 의한 차이로 판단할 수 있었다. 삼투량은 쟁기바닥층의 투수속도와 지하수위 등의 토양환경에 의해 좌우된다. 모내기전 써레질로 분산된 토양입자는 공극을 메워 토양의 투수속도를 저하시킬 수 있다. 또한 지속된 담수와 강우로 지하수위는 높아진 지하수위는 삼투량에 영향을 줄 수 있다. Fig. 5는 연구지점에서 지하수위의 경시적 변화를 보여주고 있다. 지점2

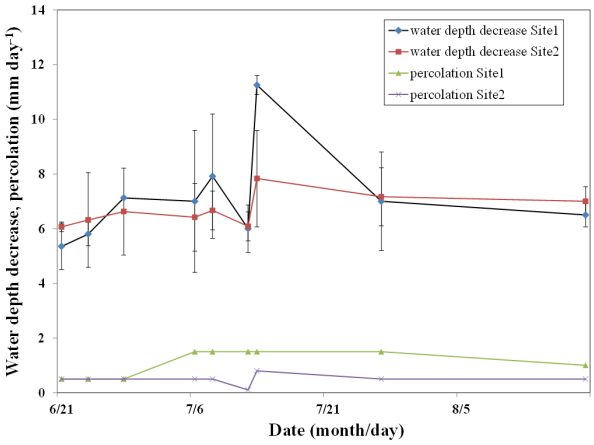



**Fig. 3. Daily water depth decrease and percolation in studied sites. The vertical bars mean the standard deviation of measured values.**

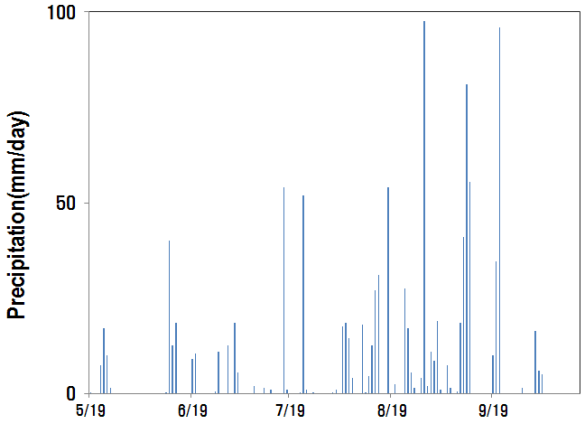



**Fig. 4. Daily precipitation in Suwon weather station during rice cropping period.**

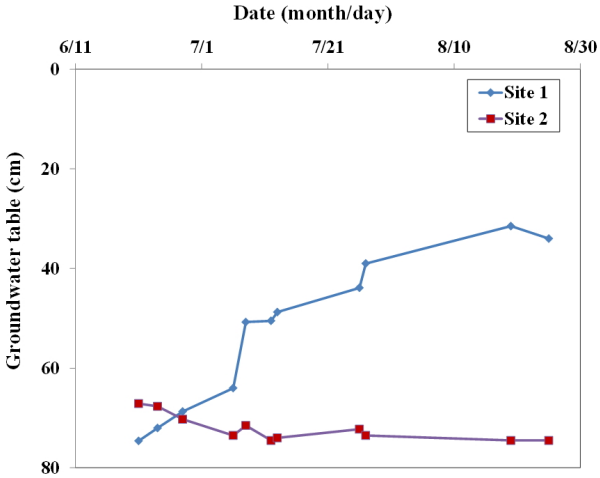



**Fig. 5. Change in groundwater table during rice cropping in studied sites.**

의 경우 지하수위가 약 70cm로 변화가 없으나 지점1의 경우 8월에 지하수위가 쟁기바닥층 아래까지 상승하는 것을 볼

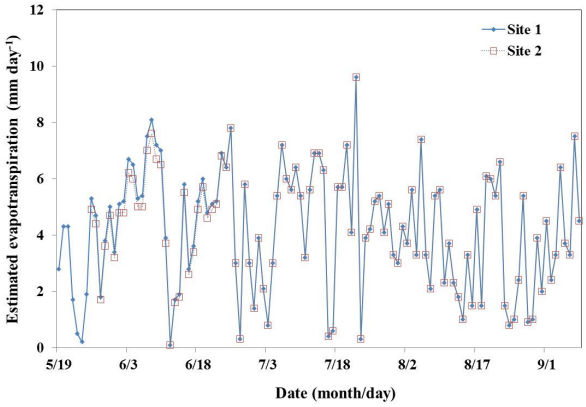



**Fig. 6. Daily evapotranspiration predicted by BUDGET model in studied sites.**

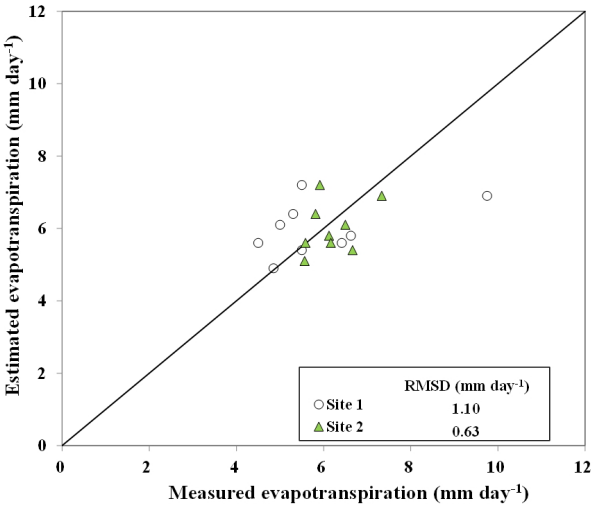



**Fig. 7. Comparison of evapotranspiration between measured and estimated values. The measured values were obtained by [water depth decrease − percolation], and the estimated values were obtained from BUDGET model.**

수 있다. 이렇게 상승된 지하수위는 물의 아래로 삼투를 저하시킬 수 있다 (Kyuma, 2004). 표토 및 쟁기바닥층에서 지점1의 경우 양토의 토성을 나타내는 사양질이었으며 지점2의 경우 지점1보다 점토함량이 높은 식질에 해당하였다. 삼투량은 감수심 측정값의 20%이하로 나타나 감수심의 약 80%는 증발산량에 의한 것으로 판단할 수 있었다. 삼투량 값은 써레질 후 1 mm day$^{-1}$ 이하로 낮다가 분얼기 이후 점토함량이 낮은 지점1에서 지점2보다 높게 나타났다 (Fig. 3). 반면 낙수 후 수확기에서 쟁기바닥층 투수속도는 지점1은 3 mm day$^{-1}$로 나타나 벼 생육기에서 삼투량보다 약 2배 높게 나타났다. 지점2의 경우 0.5 mm day$^{-1}$로 유사한 값을 나타내었다. 이는 점토함량이 높은 식질 토양보다 상대적으로 점토함량이 낮은 사양질 토양에서 벼 재배시 경시적 삼투속도의 변화가 더 크게 나타날 수 있음을 보여준다 할 수 있다. 이는 써레질 후 분산된 토양입자는 공극을 메워 벼 생육초기 물의 아래로 이동을 막을 수 있으며 벼 뿌리의 발달, 낙수 등으로 토양이 다시 구조화되면 삼투속도가 증가할 수 있기 때문으로 판단된다. Oh and Yoo (1972)는 우리나라 평균 감수심을 10.3 mm day$^{-1}$로 보고한 바 있으며, 또한 Oh and Yoo (1972)는 배수등급별 토성속의 평균 감수심을 제시한 바 있는데, 식질에서는 배수등급에 상관없이 5.8 mm day$^{-1}$로 보고한 반면 배수등급 약간양호, 불량에서 식양질은 9.6, 5.3 mm day$^{-1}$로 사양질은 9.6, 5.9 mm day$^{-1}$로 사질은 39.7, 15.7 mm day$^{-1}$로 각각 보고하였다. 여기서 배수등급 불량은 약간양호보다 감수심이 작게 나타났는데 이는 지하수위에 의한 영향을 반영한다 할 수 있다. 즉, 지하수위가 얕으면 깊을 때보다 삼투가 작게 일어나 감수심도 작아지게 된다 (Kyuma, 2004).

BUDGET 모형으로부터 얻어진 벼의 증발산량 ($ET_{crop}$)은 7월 중순에 최대값을 보이고 차츰 감소하는 경향을 나타내었다 (Fig. 6). 모내기 일자가 빠른 지점2가 초기에 증발산량이 지점1보다 높게 예측되었으며 7월 이후로는 증발산량이 지점간 차이가 거의 없었다. 감수심에서 삼투량을 뺀 값으로부터 도출한 증발산량 측정치와 BUDGET 모형 추정치를 비교한 결과 평균제곱편차 (RMSD)가 측정치의 20%이하로 측정오차 수준으로 나타났다 (Fig. 7). 특히 지점2에서 낮은 값을 보였는데 삼투량이 상대적으로 큰 지점1에 비해 오차요인이 작기 때문으로 판단할 수 있었다. 따라서 BUDGET모형의 경우 물소모가 주로 증발산량에 의해 좌우되는 토양에서 적용성이 높다고 하겠다. 삼투속도 변이가 큰 토양의 경우, 이를 반영하여 시기별로 나누어 모의함으로써 적용성을 높일 수 있을 것으로 사료된다.

### 토양환경 조건에 따른 관개요구량 및 물수지 변화

연구지점토양인 강서통과 화동통 두 토양에서 쟁기바닥층 수리전도도를 3 mm day$^{-1}$, 0.5 mm day$^{-1}$를 각각 적용하여 토양특성에 따른 관개요구량 및 물수지의 변화를 살펴보았다. 그 결과는 Table 2와 같이 나타났다. 사양질 토양인 강서통에서 투수속도가 3 mm day$^{-1}$일 때 관개기간 동안 요구되는 총 관개수량이 176 mm로 나타났다. 반면 식질인 화동통 토양의 경우 총 관개수량은 74 mm, 평균 담수위는 45 mm로 나타났다. 투수속도 3 mm day$^{-1}$의 강서통 토양과 비교해 볼 때 화동통 토양의 총 관개수량은 강서통 토양의 절반 이하이며 더 높은 평균 담수위를 나타냈다. 이것은 화동통 토양단면 층위 중 최저 투수속도를 나타내는 쟁기바닥층의 투수속도가 0.5 mm day$^{-1}$로 강서통 토양의 투수속도 3 mm day$^{-1}$보다도 낮은 값이기 때문으로 파악된다. 삼투량과 유거량 또한 53 mm, 205 mm로 삼투량은 작고 유거량은 높게 나타났다.

이러한 결과로부터 쟁기바닥층의 발달로 줄어든 삼투량

**Table 2. Water balance in flooded rice field predicted by the BUDGET model under the different soil conditions.**

| Water balance | Soil type | |
|---|---|---|
| | Site 1 (Gangseo) | Site 2 (Hwadong) |
| Plow pan permeability | 3 mm day$^{-1}$ | 0.5 mm day$^{-1}$ |
| Irrigation requirement† | 176 mm | 74 mm |
| Flooding depth | 29 mm | 45 mm |
| Percolation | 255 mm | 53 mm |
| Surface runoff | 98 mm | 205 mm |

†The water need for maintaining water-saturated condition in surface soil

때문에 관개요구량을 줄일 수 있다는 것을 알 수 있었다. 우리나라는 연평균 강우량이 1,100~1,400 mm로 벼 재배에 충분한 양인 것 같지만 강우량의 분포가 시기적으로 고르지 못할 뿐 아니라 용수원 확보 또한 고르지 못하다 (NAAS, 2010). 따라서 삼투량 감소에 따른 관개요구량의 감소는 물 이용 효율 측면에서 이점이라 할 수 있다. 하지만 벼 생육의 측면에서 고려해 볼 때 낮은 투수속도로 인한 혐기 환경의 조성은 벼 다수확에 부정적인 영향을 끼칠 수 있다. 빠른 투수는 토양 중에 산소를 공급하여 뿌리의 생장과 활력을 돕고 토양 중에 발생하는 각종 유해물질을 제거할 수 있지만 과다한 투수는 토양 중 양분을 유실하며 수온이 낮은 지대에서는 냉해를 조장하기도 한다. 따라서 적정한 투수속도와 감수심은 벼 생육에 중요한 역할을 한다 할 수 있다. Oh and Yoo (1972)에 의하면 우리나라 논 토양의 평균 삼투속도는 2.76 mm day$^{-1}$이며 0.6~43.2 mm day$^{-1}$의 범위를 나타내고 있으며 약 80%가 0.6~3.5 mm day$^{-1}$의 범위에 분포한다고 보고하였다. 배수 양호한 사력질 토양에서 43.2 mm day$^{-1}$의 가장 큰 삼투속도를 나타내었다. 또한 Oh and Yoo (1972)는 우리나라 토양의 벼 다수확을 위한 적정 삼투속도의 범위를 1.5~2.5 mm day$^{-1}$로 제시하고 있다. 이로 볼 때 강서통 토양이 적정 삼투속도에 가까운 쟁기바닥층을 가진 토양으로 벼 다수확과 동시에 그 투수속도에서의 최소관개수량으로부터 물 절약을 할 수 있는 긍정적인 토양환경으로 판단할 수 있었다.

**강우패턴에 따른 관개 요구량 및 물수지 변화** 벼 재배의 경우 생육시기에 따라 물 요구량이 다르기 때문에 강우 패턴의 변화는 벼 생육을 위한 물 관리에 매우 중요한 인자이다. 벼는 이앙 후 활착기까지 7~10일간과 유수분화기로부터 출수개화기까지의 기간 동안 심수 관개를 필요로 하므로 관개요구량이 크며, 분얼 최성기를 지나 분얼 종지기에 가까운 약 7~10일 동안 논에 틈이 가지 않을 정도의 관개는 뿌리의 신장을 조장하고 무효 분얼을 억제하며 비료의 분해를 촉진시킨다. 현미가 최대 건물 중에 달한 때부터

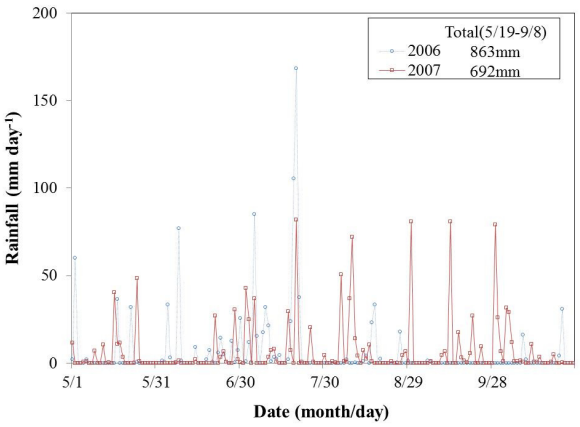



**Fig. 8. Daily precipitation of 2006 and 2007 in the Suwon weather station.**

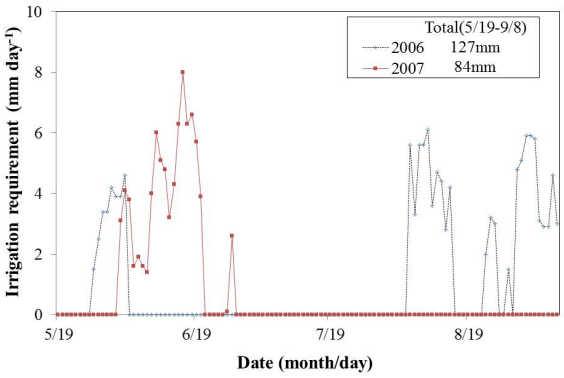



**Fig. 9. Daily irrigation requirement† in 2006 and 2007 predicted by the BUDGET model.**
**†The water need for maintaining water-saturated condition in surface soil.**

물을 떼고 낙수를 하는데, 이때 집중되는 강우는 도복 등의 피해를 유발할 수 있어 벼 생육을 불리하게 만들 수 있다. 강우조건으로 고려된 2006년과 2007년의 강우패턴은 다른 양상을 보이고 있다 (Fig. 8). 2006년은 7월 중순경에 일일 150 mm를 넘는 최대 강우량을 보이며 6, 7월에 집중된 강우를 나타낸 반면 2007년은 7, 8, 9월에 걸쳐 고른 강우 분포를 나타내었다. 또한 Fig. 4의 2010년 강우 분포와의 비교로부터도 2006년과 2007년은 다른 양상을 나타내고 있어 년도별 그리고 시기별 강우강도와 분포가 변하고 있음을 알 수 있었다. 이러한 강우조건 하에 BUDGET 모형으로부터의 관개요구량 및 물수지의 변화에 대한 결과는 Fig. 9와 Table 3과 같이 나타났다. 관개기간 동안 일일 관개요구량은 강우가 없는 갈수기를 중심으로 나타났으며 (Jeon et al., 2002), 시기적으로는 2006년의 경우 5월 중순부터 하순까지, 그리고 7월 하순부터 9월 상순까지 관개요구량이 크게 나타났고 2007년의 경우 5월 하순에서 6월 중순까지 관개요구량이 크게 나타났다 (Fig. 9). Table 3의 2006년과

**Table 3. Water balance in flooded loamy rice field with plow pan permeability 3 mm day$^{-1}$ predicted by the BUDGET model under the different rainfall patterns (in mm).**

| | | Year | |
|---|---|---|---|
| | | 2006 | 2007 |
| Water inflow | Rain | 863 (0.9)‡ | 692 (0.9) |
| | Irrigation requirement† | 127 (0.1) | 84 (0.1) |
| Water outflow | Evapotranspiration | 390 (0.4) | 379 (0.4) |
| | Percolation | 277 (0.3) | 311 (0.4) |
| | Flooding depth | 30 (0.0) | 42 (0.0) |
| | Surface runoff | 293 (0.3) | 45 (0.2) |

‡Parenthesis means the ratio of each component to total inflow or outflow; †The water need for maintaining water-saturated condition in surface soil

2007년에 대한 관개요구량과 강우량의 물 유입과 증발산량, 지하투수량, 평균 담수량, 유거량의 물 유출의 물수지 비율은 매우 비슷하게 나타났다. 하지만 관개기간 동안 총 강우량은 2006년이 높았고 관개요구량 또한 2006년이 더 높게 나타났다. 이는 2007년이 2006년보다 상대적으로 강우강도가 낮은 비가 벼 관개기간 동안 고루 분포했기 때문으로 해석되었으며, 이를 통해 최소관개로부터의 물 절약 효과를 확인할 수 있었다. 더불어 2006년의 관개요구량을 볼 때 상대적으로 7월 하순부터 9월 상순까지 지속적인 관개가 필요하므로 물의 저수에도 주의를 기울일 필요가 있다고 사료되었다.

현재 세계적으로 물 관리의 과학화, 물 관리 체계의 구조개혁, 물부족 대비 농산물 안정 생산 등 물 관리를 위한 방안이 주요 관심 사항으로 대두되고 있다. 이런 점에서 모형을 이용한 벼 재배시 관개요구량 및 시기 예측 연구는 물 소모량을 줄일 수 있는 방안 연구에 대한 토대를 마련해 줄 수 있을 것이며 가뭄 등 기상재해에 대응한 기술 개발 및 장·단기적인 농업용수의 확보와 관개 계획에도 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

## Conclusion

본 연구에서는 벼 담수기 동안 BUDGET 모형을 이용하여 쟁기바닥층의 투수속도 등 토양환경조건 및 강우조건에 대한 관개요구량과 물수지에 대한 변화를 비교·분석하였다. 벼 증발산량의 실측치와 BUDGET 모형을 통한 추정치의 평균제곱근편차가 평균값의 20%이하로 측정오차 수준의 정확도를 보여 이 모형이 벼재배포장에 적용가능하다 판단할 수 있었다. BUGET 모형을 이용한 관개요구량 및 물수지 분석에서 사양질 강서통의 경우 3 mm day$^{-1}$ 일 때 총관개요구량이 176 mm로 나타났고 식질 화동통의 경우 강서통의 1/2로 나타났는데, 이는 쟁기바닥층의 투수속도가 0.5 mm day$^{-1}$로 강서통 투수속도 3 mm day$^{-1}$보다 매우 적기 때문으로 파악되었다. 강우 분포가 다른 2006년과 2007년을 대상으로 BUDGET 모형을 이용하여 사양질 강서통 토양에 대해 관개요구량 및 물수지를 분석하였다. 관개기간 동안 총강우량은 2007년보다 2006년이 높았는데, 관개요구량 또한 2006년이 더 높게 나타났다. 이는 2007년 강우가 2006년보다 상대적으로 강우강도가 낮은 비가 벼 관개기간 동안 고루 분포했기 때문으로 판단할 수 있었다.

이러한 BUDGET 모형을 활용한 다양한 토양 및 기상조건에 따른 벼 관개량 및 관개시기 등의 예측은 재해대응기술 및 장·단기적인 농업용수의 확보에 기여할 수 있을 것으로 생각한다.

## References

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.

Chae, J.C. and S.W. Kim. 2001. Effect of soil texture on rice growth and paddy soil percolation under lysimeter condition. J. Kor. Soc. Crop Sci. 46:236-240.

Doorenbos, J. and A.H. Kassam. 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. FAO, Rome, Italy. 193p.

Jensen, M.E., R.D. Burman, and R.G. Allen. 1980. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements; Irrigation and Drainage Div. ASCE. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70, 332 pp.

Jeon, W.T., C.Y. Park, K.D. Park, Y.S. Cho, J.S. Lee, and D.C. Lee. 2002. Changes of soil characteristics, rice growth and lodging traits by different fertilization and drainage system in paddy soil. J. Kor. Soc. Soil Sci. Fert. 35: 153-161.

Kenjabaev, S., I. Forkutsa, M. Bach, and H. G. Frede. 2013. Performance evaluation of the BUDGET model in simulating cotton and wheat yield and soil moisture in Fergana valley. In International Conference and Young Researchers' Forum: 'Natural resource use in Central Asia: institutional challenges and the contribution of capacity building', Giessen, Germany.

Kim, D. W., J. C. Chae, and S. W. Kim. 2001. Effect of rice cultural practices on water percolation, irrigation requirement, and nitrogen leaching under lysimeter condition. J. Kor. Crop. Sci. 46: 6~11.

Kyuma, K. 2004. Paddy soil science. Kyoto University Press and Trans Pacific Press. Kyoto. Japan

MOLIT. 2011. Water resource long-term plan (2011~2020), Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Gwacheon-si, Republic of Korea.

NAAS. 2010. Agricultural water management manual against

drought. National Academy of Agricultural Science, Suwon, Republic of Korea.

Nasyrov, M.G. 2008. Application of crop water productivity models for better utilization of water resources in Uzbekistan. Proceedings of the 1st technical meeting of Muslim water researchers cooperation, December 2008, Malaysia.

NIAST. 2000. The method of soil and plant analysis. National Institute of Agricultural Science & Technology, Suwon, Republic of Korea.

Oh, J.S. and K.S. Yoo. 1972. The investigation of water depth decrease in paddy fields. Experiment report. Korea Plants Environmental Research (KPER), Suwon-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea.

Raes, D. 1982. A summary simulation model of the water budget of a cropped soil. Dissertationes de Agricultura n° 122. K.U.Leuven University, Leuven, Belgium. 110p.

Raes, D. 2002. BUDGET, a soil water and salt balance model, version 5.0. K.U.Leuven, Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences, Institute for Land and Water Management, LEUVEN, Belgium.

Raes, D., H. Lemmens, P. Van Aelst, M. Vanden Bulcke, and M. Smith. 1988. IRSIS- Irrigation scheduling information system. Volume 1. Manual. K.U.Leuven, Dep. Land Management, Reference Manual 3. 199p.

Rallison, R.E. 1980. Origin and evolution of the SCS runoff equation. Symp. On Watershed Management, ASCE, New York, N.Y.: 912-924.

RDA. 2013. Technology for high grain quality. Guideline for agricultural technology 157. Rural Development Administration, Jeonju-si, Jeollabuk-do, Repulic of Korea.

Steenhuis, T.S., M. Winchell, J. Rossing, J.A. Zollweg, and M.F. Walter. 1995. SCS runoff equation revisited for variable-source runoff areas. J. Irrigation Drainage Eng. 121: 234-238.

USDA. 1964. Estimation of direct runoff from storm rainfall. National Engineering Handbook, Washington DC, USA. Section 4 Hydrology, Chapter 4: 1-24.