



복합영농 관개지구의 배수량 모의 모형의 개발

Surface Drainage Simulation Model for Irrigation Districts Composed of Paddy and Protected Cultivation

송정현* · 강문성**,* · 송인홍*** · 황순호* · 박지훈* · 안지현*

Song, Jung-Hun · Kang, Moon-Seong · Song, Inhong · Hwang, Soon-Ho · Park, Jihoon · Ahn, Ji-Hyun

ABSTRACT

The objectives of this study were to develop a hydrologic simulation model to estimate surface drainage for irrigation districts consisting of paddy and protected cultivation, and to evaluate the applicability of the developed model. The model consists of three sub-models; agricultural supply, paddy block drainage, and protected cultivation runoff. The model simulates daily total drainage as the sum of paddy field drainage, irrigation canal drainage, and protected cultivation runoff at the outlets of the irrigation districts. The agricultural supply sub-model was formulated considering crop water requirement for growing seasons and agricultural water management loss. Agricultural supply was calculated for use as input data for the paddy block sub-model. The paddy block drainage sub-model simulates paddy field drainage based on water balance, and irrigation canal drainage as a fraction of agricultural supply. Protected cultivation runoff is calculated based on NRCS (Natural Resources Conservation Service) curve number method. The Idong reservoir irrigation district was selected for surface drainage monitoring and model verification. The parameters of model were calibrated using a trial and error technique, and validated with the measured data from the study site. The model can be a useful tool to estimate surface drainage for irrigated districts consisting of paddy and protected cultivation.

Keywords: Irrigated districts; paddy; protected cultivation; drainage; agricultural supply

1. 서 론

관개지구는 논벼의 담수재배를 위해 수리시설물로부터 관개용수를 공급받는 지역으로 수리시설물, 논, 그리고 용배수로로 구성된다. 관개지구의 배수량은 유역의 물 수급 전망, 하천 유황의 예측, 농업비점오염 부하량 추정 등 유역 수자원 관리에 있어서 중요한 요소이다. 관개지구의 수문순환은 기상, 작물, 토양 등의 물리적 요소와 농업용수 공급량, 물꼬 높이 등의 인위적 요소에 영향을 받는다.

우리나라는 관개지구의 농업용수 공급량을 주로 DIROM (Daily Irrigation Reservoir Operation Model) (Kim, 1998)을 적용하여 추정한다. 하지만 이 방법은 최적의 유지관리 및 물 관리를 가정하고 있기 때문에 실제 공급량과 차이가 발생하는 것으로

보고되고 있다 (Im et al., 2000; Lee et al., 2006). 이를 보완하여 실제 관개지구의 영농방식을 현장 조사하여 기존의 필요수량 산정방식에서 영농 시기를 달리하여 공급량을 모의하는 연구가 Ju et al. (2006)에 의해 수행된 바 있다.

논 지표배수량은 포장단위에서 물수지 요소를 분석하여 추정하는 연구가 주로 이루어져 왔다. Kim et al. (2007)은 논벼의 재배방식별 물 관리 형태를 고려하여 홍수기 논외의 물수지를 분석하는 모형을 개발하였으며, 현장 측정자료를 이용하여 모형의 적용성을 평가하였다. 하지만 농업용수 공급량 중 관개되지 않고 하천으로 흘러들어가는 용수로 배수량 (irrigation canal drainage)을 고려하여 광역단위 논외의 배수량을 추정하는 연구는 미흡한 실정이다.

한편, 시설재배지의 면적은 1991년 52,622 ha에서 2011년 93,416 ha로 약 78 % 증가하였으며 (MAF, 1996; MIFAFF, 2012), 용수원과 수리시설이 완비된 논이 시설재배지로 전용되는 것으로 보고되고 있다 (Lee et al., 1998). 시설재배지는 불투수면으로 강우가 배수로 또는 하천으로 일시에 유입됨에 따라 하천수위 급상승에 기여한다 (Kim, 2009). 시설재배지의 유출량을 관측하거나 모의하는 연구는 미흡한 상태이며, Kim (2009)에 의해 NRCS(Natural Resources Conservation Service) 유출곡선법 (USDA NRCS, 2004)을 이용하여 유출량을 추정하는 연

* 서울대학교 농업생명과학대학 생태조경·지역시스템공학부

** 서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템공학부, 농업생명과학연구원 겸무연구원

*** 서울대학교 농업생명과학연구원 연구교수

† Corresponding author Tel.: +82-2-880-4582

Fax: +82-2-873-2087

E-mail: mskang@snu.ac.kr

2013년 3월 7일 투고

2013년 4월 26일 심사완료

2013년 5월 3일 게재확정

구가 이루어진 바 있다.

이상과 같이, 수리시설물, 용배수로, 논, 시설재배지로 구성되는 복합영농 관개지구의 배수량은 모의요소별로 연구가 이루어져 왔고, 요소들을 연계하여 총 배수량을 추정하는 연구는 미흡한 상태이다. 따라서, 보다 정확한 관개지구 배수량 산정을 위해서는 중간낙수기 및 영농시기를 고려하여 농업용수 공급량을 모의하는 모형을 구성하고, 광역 논 배수량 추정을 위하여 용수로 배수량과 논 포장 배수량을 모의하는 논 광역 배수량 모형을 구성하고, 시설재배지의 유출량을 모의하는 모형을 구성하여, 각 모형을 연계하여 총 배수량을 모의하는 모형의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 복합영농 관개지구를 대상으로 시험지구를 선정하여 농업용수 공급량, 광역 논 물수지 요소를 모니터링하고, 농업용수 공급량 부모형, 논 광역 배수량 부모형, 시설재배지 유출량 부모형으로 구성되는 관개지구 일별 배수량 모의 모형을 개발하여 적용성을 평가하고자 한다.

II. 이론고찰 및 모형의 개발

1. 복합영농 관개지구 배수량 모의 모형

수리시설물에서 공급된 농업용수 공급량은 송수과정에서 증발 및 침투로 손실되는 송수 손실 수량 (conveyance loss)이 발생한다 (Chung et al., 2006). 일부는 포장으로 공급되지 않고 용수로에서 하천으로 배수되는데, 이를 용수로 배수량 (irrigation canal drainage)이라 한다 (Song, 2013). 논 포장으로 공급된 용수량과 강우량은 담수심을 높이며, 물꼬높이 이상의 수량은 물꼬를 넘어 배수로로 흘러들어는데, 이를 논 포장 배수량 (paddy field drainage)이라 한다. 시설재배지의 강우시 유출은 시설사에 설치된 수로를 통하여 배수로 또는 하천으로 흘러들어가게 되며, 지하수로부터 취수한 관개량은 침투되어 지표 유출에 영향을 미치지 않는다. 따라서, 복합영농 관개지구에서 발생하는 총 배수량은 식 (1)로부터 구할 수 있다.

$$TDR_t = DR_t + ICD_t + GSR_t \quad (1)$$

여기서, TDR_t 는 관개지구의 총 배수량 (mm), DR_t 는 논 포장 배수량 (mm), ICD_t 는 용수로 배수량 (mm), GSR_t 는 시설재배지의 유출량 (mm)이다.

복합영농 관개지구 배수량 모의 모형은 농업용수 공급량 부모형, 논 광역 배수량 부모형, 시설재배지 유출량 부모형으로 구성되어 있다. 모형의 구성을 도식적으로 나타내면 Fig. 1과 같다. 농업용수 공급량 부모형에서 모의한 농업용수 공급량은 논 광역 배수량 부모형의 입력 자료로 이용하고, 논 광역 배수량 부모형

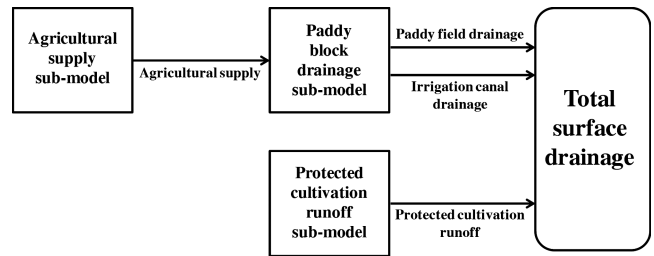


Fig. 1 Conceptual diagram of surface drainage simulation model for irrigation districts (Song, 2013)

에 모의한 논 포장 배수량 및 용수로 배수량과 시설재배지 유출량 부모형에서 모의한 시설재배지 유출량을 합하여 총 배수량을 일별로 추정하도록 구성되어 있다.

2. 농업용수 공급량 부모형

농업용수 공급량은 식 (2)와 같이 필요수량과 시설관리 손실률을 고려하여 모의하였다.

$$WU_t = \frac{REQ_t}{(1 - RFM)} \quad (2)$$

여기서, WU_t 는 농업용수 공급량 (mm), REQ_t 는 필요수량 (mm), RFM_t 는 시설관리 손실률이다. 시설관리 손실률은 농업용수 공급량에 대한 시설관리 손실량의 비이다 (Chung et al., 2006).

필요수량 산정방식은 Ju et al. (2006)이 제시한 방식을 적용하였다. 이 방식은 기존에 비해 담수가 일찍 시작되고 중간낙수 시기에 용수가 공급되지 않도록 구성되어 있다. 이양용수량은 우리나라 평균인 140 mm를 적용하였다 (Chung et al., 2006). 본 담기 용수량은 식 (3)와 같이 계산된다.

$$REQ_t = ET_t + DINF - Re_t \quad (3)$$

여기서, REQ_t 는 본담기용수량 (mm), ET_t 는 증발산량 (mm), $DINF_t$ 는 관개지구의 침투량 (mm), Re_t 는 유효수량 (mm)이다.

3. 논 광역 배수량 부모형

논 광역 배수량은 논 포장에서 물꼬 높이를 초과한 수량이 물꼬를 넘어 배수되는 논 포장 배수량과 수리시설물에서 공급된 용수량 중 관개되지 않고 하천으로 흘러들어가는 용수로 배수량으로 구성된다. 논 광역의 배수량은 식 (4)에 의해 계산된다.

$$PDR_t = DR_t + ICD_t \quad (4)$$

여기서, PDR 는 논 광역 배수량 (mm), DR 는 논 포장 배수량 (mm), ICD 는 용수로 배수량 (mm)이다.

가. 포장 배수량

포장 배수량은 담수심이 물꼬 높이 이상인 경우 담수심과 물꼬 높이의 차가 전량 배수되는 것으로 가정하여 모의한다.

담수심은 논에서의 물수지로부터 계산된다. 논에서의 물수지는 관개량, 강우량, 증발산량, 침투량, 포장 배수량 등으로 구성되며, 담수심은 식 (5)로부터 계산된다.

$$ST_t = ST_{t-1} + IR_t + RAIN_t - INF_t - ET_t - DR_t \quad (5)$$

여기서, ST 는 담수심 (mm), IR 은 관개량 (mm), $RAIN$ 은 강우량 (mm), INF 는 침투량 (mm), ET 는 증발산량 (mm), DR 는 논 포장 배수량 (mm)이다.

관개량은 용수로 배수량과 송수 손실 수량을 제외한 양으로 식 (6)으로 구할 수 있다.

$$IR_t = WU_t - CL_t - ICD_t \quad (6)$$

여기서, IR 은 관개량 (mm), WU 는 농업용수 공급량 (mm), CL 은 송수 손실 수량 (mm), ICD 은 용수로 배수량 (mm)이다.

송수 손실률은 ‘농업생산기반정비사업 계획설계기준 관개편’에서 토공 간선용수로의 경우 15~25 %, 토공 지선용수로의 경우 10~20 %, 토공 용수지거의 경우 10 %, 콘크리트 및 아스팔트 수로의 경우 5~7 %를 추천하고 있다.

증발산량은 Penman-Monteith 공식과 Yoo (2006)가 전국 9 개 지역에 대해 산정한 작물계수를 이용하여 구하였다. 침투량은 토양의 종류에 따라 다르며 sand는 3~6 mm, sandy loam은 2~3 mm, loam은 1~2 mm로 보고되고 있다 (Im, 2000). 물꼬높이는 인위적 물관리 요소로 중간낙수 시기에 물꼬의 높이를 낮춰 담수된 수량이 배수되도록 구성해야 한다.

나. 용수로 배수량

용수로 배수량은 인위적 물관리 요소로 실측하여 구하거나 용수로의 경사, 취수구의 높이 등의 인자를 이용하여 물리적 식으로부터 구할 수가 있다. 하지만 용수로 배수량을 물리적 식으로 모의하기에는 입력 자료 수집에 한계가 있고, 모형의 복잡성이 높아지는 문제가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 식 (7)과 같이 용수로 배수량을 농업용수 공급량 중의 비율로부터 추정한다.

$$ICD_t = WU_t \times RICD_t \quad (7)$$

Table 1 Ratio of irrigation canal drainage ($RICD$) as reported in Korea

District	Period	Rainfall ¹⁾ (mm)	$RICD$ (%)	Reference
Diversion Weir	1998	1,056	36	Kim et al. (2005)
	1999	824	47	
	2001	546	11	
	2002	863	30	
	2003	1,055	49	
Pumping station	2001~2002		37	Lee et al. (2008)
Reservoir	2001~2002		36	
Lateral	2001~2002		31	

1) Rainfall during the irrigation period

여기서, ICD 는 용수로 배수량 (mm), WU 는 농업용수 공급량 (mm), $RICD$ 는 용수로 배수량의 비율 (%)이다.

Table 1은 선행 연구의 용수로 배수량의 비율 측정 결과를 보여주고 있다. Kim et al. (2005)의 연구 결과에 따르면, 용수로 배수량은 공급량의 11~49 %를 차지하고 있으며, 가뭄 시 공급량 대비 용수로 배수량이 감소하는 것으로 보고하고 있다. 이는 가뭄 시 농민들이 농업용수를 최대한 사용하려는 경향이 있기 때문이다. Lee et al. (2008)에 따르면 양수장, 저수지, 용수 지선 구역의 용수로 배수량은 농업용수 공급량의 31~37 %를 차지하는 것으로 보고하고 있다. Table 1의 용수로 배수량의 비율 값의 평균은 35 %로 나타났다.

용수로 배수량의 비율은 계측 지역의 경우 실측 자료를 이용하고, 미계측 지역의 경우 Table 1을 참조하여 수리시설물 종류 및 기상 특성에 맞는 용수로 배수량의 비율을 선정하여, 농업용수 공급량으로부터 용수로 배수량을 추정하도록 구성하였다.

4. 시설재배지 유출량 부모형

본 연구에서는 시설재배지에서의 지표면 유출 모의를 위하여 NRCS 유출곡선법 (USDA NRCS, 2004)를 이용하였으며 식 (8)과 같다.

$$GSR_t = \frac{(RAIN_t - 0.2S)^2}{(RAIN_t + 0.8S)} \quad RAIN_t \geq 0.2S \quad (8)$$

여기서, GSR 는 시설재배지의 유출량 (mm), $RAIN$ 은 강우량 (mm), S 는 토양수분 저류계수 (mm)이다. 토양수분 저류계수는 식 (9)으로 정의된다.

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (9)$$

여기서, *CN*은 유출곡선지수로서 토양의 투수성, 토지이용, 선행토양함수조건의 함수이다. 시설재배지의 경우 *CN*은 도시 불투수지역의 *CN*과 같이 98로 고정된다 (Kim, 2009).

5. 모형의 보정방법

가. 시설관리 손실률의 추정 방법

농업용수 공급량을 모의하기 위해서는 수리시설물의 시설관리 손실률이 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 농업용수 공급량 모형에서 모의한 필요수량과 실제 농업용수 공급량을 회귀분석 (regression analysis)하여 시설관리 손실률을 추정하고, 회귀분석에 이용되지 않는 자료기간에 대해 시설관리 손실률 추정치를 적용하여 검정을 실시하였다. 회귀분석은 특정 변수 값의 변화와 다른 변수 값의 변화가 가지는 수학적 선형의 함수식을 파악함으로써 상호관계를 추론하는 통계 방법이다. 수리시설물 운영의 인위성을 고려하여 일별 자료를 순별로 합하여 회귀 분석을 실시하였다. 영농 자료는 대상 지구의 영농 현황 자료를 이용하였다. 저수지에서 공급을 중단하는 시기는 해마다 조금씩 달랐으며, 강우가 내리지 않으며 농업용수 공급이 5일 이상 중단되는 시기를 당해의 중간낙수 시기로 결정하였다.

나. 매개변수 민감도 분석 및 보정 방법

본 연구에서 개발한 모형의 광역 논 배수량 관련 주요 매개변수에 대하여 민감도 분석을 수행하였다. 선정된 매개변수는 Table 2와 같이 침투량 (*INF*), 용수로 배수량의 비율 (*RICD*), 송수 손

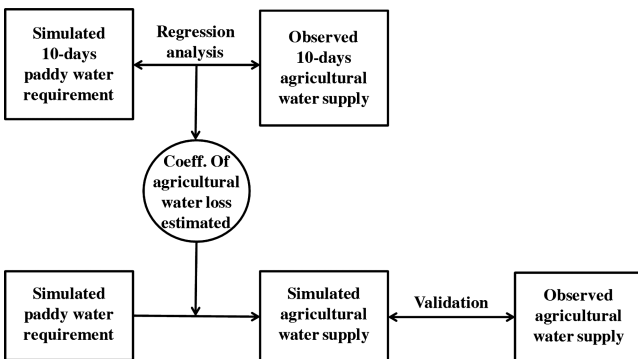


Fig. 2 Estimation procedure of agricultural water loss coefficient (Song, 2013)

Table 2 Ranges of sensitivity analysis to the developed model

Parameters	<i>INF</i> (mm)	<i>LH</i> (mm)	<i>RICD</i> (%)	<i>RCL</i> (%)
Min.	1	50	10	5
Max.	6	150	50	20

실률 (*RCL*), 물꼬 높이 (*LH*)이다. 각 매개변수의 최솟값과 최댓값은 선행연구 자료를 참고하여 결정하였으며, 최댓값과 최솟값을 기준으로 매개변수값을 무차원화하여 구분한 등급에 대하여 모형을 구동하여 민감도를 분석하였다 (Kang et al., 2003).

매개변수 보정방법에는 크게 시행착오법과 최적화 기법에 의한 자동보정법, 그리고 이 두 가지를 병행하는 방법이 있는데, 본 연구에서는 시행착오법을 이용하여 모형의 보정을 수행하였다. 모형의 보정에 대한 평가를 위해 평균제곱근오차 (Root Mean Square Error, RMSE), 모형의 효율지수 (Efficiency Index, EI) (Nash and Sutcliffe, 1970), 결정계수 (R^2) 등의 통계적인 변량을 사용하였다 (David and Gregory, 1999). 각 통계적 변량의 의미 및 계산 절차는 Kang et al. (2003)의 논문에 상세히 서술되어 있다.

III. 대상지구 및 자료구축

본 연구에서는 대상지구로 경기도 용인시와 평택시 일대의 이동저수지 용남관개지구를 선정하였다. 용남관개지구는 이동저수지를 주수원공으로 하여 농업용수를 공급받고 있다. 관개지구의 전체 면적은 2,063 ha이며, 논은 1,789.7 ha로 86.8 %를 차지하고 있으며, 시설재배지는 273.3 ha로 13.2 %를 차지한다. 용남관개지구는 경지정리가 시행되어 구획정리 및 용·배수도가 체계적으로 정비되어 있다.

대상지구는 Fig. 3과 같이 농어촌연구원에서 이동저수지의 농업용수 공급량을 측정하고 있으며, 서울대학교 지역시스템공학과에서 10.3 ha의 광역 논에 대해 기상·수문·수질 모니터링을 실시하고 있다. 광역 논 시험 지구는 용·배수도가 분리되어 있으며, 용수로는 폭 60 cm의 콘크리트 수로이고 배수로는 2011년까지 흙 수로였으나 2012년부터 폭 90 cm의 콘크리트 수로로 라이닝이 되어있다. 관개용수는 용수간선에서 분기되어 2개의 분수문으로부터 시험지구로 유입되어 용수로를 따라 포장으로 관개되거나 말단부에서 하천으로 배수된다. 시험지구의 포장 배수량은 포장에서 물꼬를 월류하여 1개의 배수로를 통해 하천으로 배수된다 (Song, 2013).

영농현황은 KARICO (2005)에서 조사한 자료를 이용하였으며 Table 3과 같다. 논에서 답수는 모내기 시기보다 약 한 달 빠른 4월 13일 정도부터 시작하는 것으로 보고되고 있으며, 중간낙수

Table 3 Phase of rice cultivation for the Idong area (KARICO, 2005)

Time step	Nursery	Transplant	Planting water	After Transplant	Midsummer drainage
Period	4/11 ~ 5/18	5/12 ~ 5/26	4/13 ~ 5/18	5/27 ~ 9/11	6/25 ~ 7/15

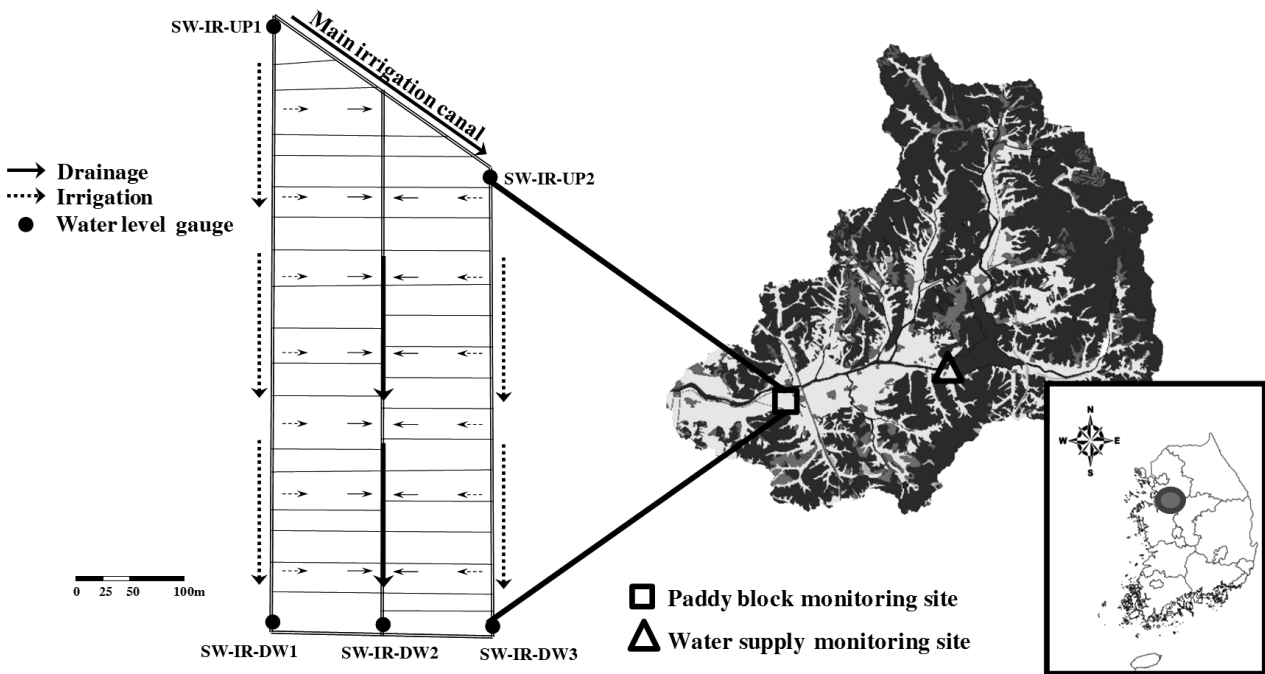


Fig. 3 Monitoring networks at the study site

는 6월 25일~7월 15일에 시행되는 것으로 보고되고 있다. 완전 낙수는 9월 중순 경에 이루어지는 것으로 보고되고 있다.

IV. 모형의 적용성 평가

1. 농업용수 공급량 추정

Fig. 4는 2001~2009년의 순별 모의 필요수량과 실측 농업용수 공급량의 상관관계를 보여주고 있으며, 연도별 모의 필요수량과 실측 농업용수 공급량을 Table 4와 같다. 실측 공급량이 가장 많았던 해는 2006년의 1,848.6 mm이며 공급량이 가장 작았던 해는 1,172.4 mm로 나타났다.

회귀분석 결과 2001~2009년에 대해 순별 모의 필요수량과 순별 실측 공급량은 0.777의 상관관계가 있는 것으로 나타났으며, 공급량의 약 38%가 용수로 배수량 및 송수 손실 수량으로 소모되는 것으로 나타났다. 따라서 이동저수지의 시설관리 손실률을 약 38%로 추정할 수 있다. 우리나라는 수리시설물 설계시 외국 자료에 근거하여 제시된 시설관리손실률인 약 15~20%를 적용하고 있으며 (MAF, 1998), 본 연구의 추정치는 이보다 높게 나타났다.

시설관리 손실률의 추정에 이용되지 않는 2011년에 대해 시설관리 손실률 추정치를 적용하여 농업용수 공급량을 모의하였고, 실측 저수지 공급량 자료와 비교하여 검정을 수행하였다. Fig. 5는 농업용수 공급량의 모의치와 실측치를 비교하여 보여주고

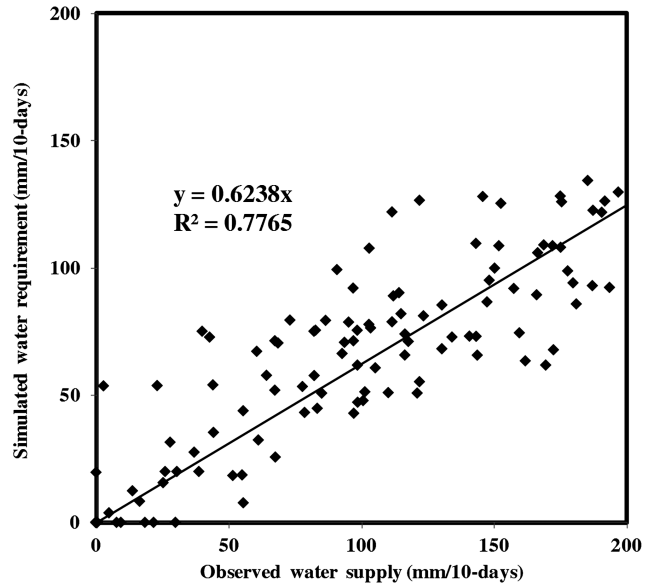


Fig. 4 Comparison of the observed water supply to simulated water requirement

있다. 2011년의 모의 총 농업용수 공급량은 1,142.6 mm로 나타났고, 실측 총 농업용수 공급량은 1,218.5 mm로 나타났다. 모의 공급량은 4월 114.4 mm, 5월 473.5 mm로 실측 자료의 4월 82.2 mm, 5월 425.4 mm와 유사하게 나타났으며, 영농초기에 농업용수가 많이 공급되는 특징을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 7월에는 중간낙수가 실시되어 용수 공급이 중단되는 시기가 포

Table 4 Annual simulated water requirement and observed water supply for the calibrated period

Date (year)	Rainfall (mm)	Simulated water requirement (mm)	Observed water supply (mm)
2001	875.5	1,042.7	1,715.1
2002	1,057.8	1,095.5	1,172.4
2003	1,333.6	850.2	1,525.7
2004	1,047.5	1,033.9	1,607.6
2005	1,260.4	991.2	1,476.4
2006	1,192.8	1,034.7	1,848.6
2007	1,078.6	950.1	1,311.8
2008	1,193.2	930.0	1,475.3
2009	1,295.6	1,090.2	1,745.8

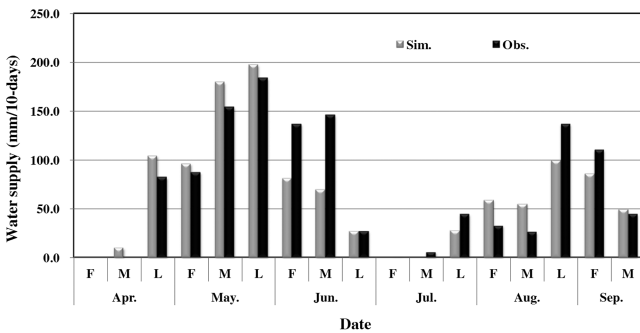


Fig. 5 Observed and simulated agricultural water supply from the Idong reservoir for the verification period

합되며, 실측치는 50.6 mm, 모의치는 27.7 mm가 공급되는 것으로 나타났다. 강우가 집중되는 시기인 7월 하순~8월 중순까지의 모의치와 실측치는 모두 다른 시기에 비해 적게 공급되는 것으로 나타났다. 8월 하순부터 9월 초순까지는 80 mm 이상이 공급되는 것으로 나타났다. 검정 기간에 대해 순별 모의치와 실측치는 R^2 는 0.745의 관계가 있는 것으로 나타났다.

2. 논 광역 배수량 추정

가. 모형의 민감도 분석

Fig. 6은 2011년도 기상자료를 이용하여 논 광역 배수량 관련 주요 매개변수의 민감도 분석을 수행한 결과를 보여주고 있다. 민감도 분석 결과, 배수량은 논에 침투량, 송수 손실률, 물꼬 높이, 용수로 배수량의 비율 순으로 큰 변화를 나타내었다. 논 침투량 매개변수는 토양조건이나 토층 구조, 경지의 고저차, 지질 등에 따라 큰 차이가 있으므로 계측에 의해 선정하는 것이 우선이다 (Im, 2000). 침투량 미계측 지역의 경우, 토양 조건이 비슷한 선행연구의 관측 자료를 참고하여 매개변수를 선정할 수 있을 것이라 사료된다. 용수로 배수량의 비율 매개변수는 -100

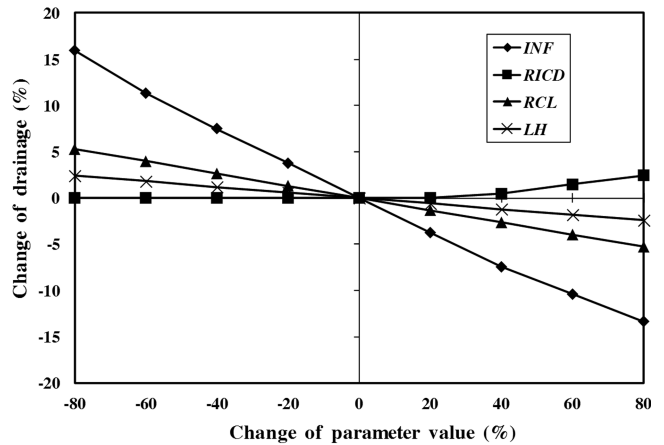


Fig. 6 Sensitivity analysis for input parameters

~20% 범위에서 매개변수가 증가함에 따라 배수량이 변하지 않았으며, 40~100% 범위에서 매개변수가 증가함에 따라 배수량이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 -100~20% 범위에서는 용수로 배수량 비율이 감소함에 따라 증가하는 관개량이 논에 저류, 침투, 증발산으로 소모되지 않고 전량 물꼬를 넘어 배수되기 때문이다. 물꼬 높이와 송수 손실률은 매개변수가 증가함에 따라 배수량이 감소하는 것으로 나타났다. 2011년의 경우 강우량이 많은 해로, 강우량이 적은 경우 물꼬에 의한 논에 저류율이 증가하여 물꼬 매개변수에 의해 배수량이 더 민감하게 변할 것이라 사료된다 (Kim et al., 2007; Song et al., 2012).

나. 모형의 보정

모형의 보정 및 검정을 위해 서울대학교 지역시스템공학과에서 모니터링하는 논 지구의 배수량 자료를 이용하였다. 농업용수 공급량은 실측치를 이용하였고, 용수로 배수량의 비율 (RICD)은 시험지구의 실측 자료인 2011년 27.1%, 2012년 11.9%를 이용하였다. 증간낙수 시기는 시험지구의 영농 자료를 이용하여 2011년은 6/24~7/1로, 2012년은 6/17~6/24를 적용하였다.

매개변수 보정은 2012년의 관측기간에 대해 수행하였으며, 침투량 INF, 송수 손실률 RCL, 물꼬 높이 LH를 조정하였다. Table 5는 대상지구의 배수량에 대한 매개변수의 보정결과이다. Fig. 7은 보정기간인 2012년에 대하여 강우량과 관개량에 따른 배수량의 실측치와 모의치의 변화를 보여주고 있다.

Table 6은 배수량 모의 결과와 통계적인 변량을 이용하여 모형을 평가한 결과를 나타내고 있다. 2012년의 5월 1일부터 9월 20일까지의 총 강우량은 1,354.8 mm, 총 농업용수 공급량은 2,008.0 mm였고, 자료기간에 대한 실측 총 배수량은 2,504.8 mm로 나타났다. 모형에 의한 총 배수량은 2,285.4 mm로 모의되었다. 모형의 보정에 사용된 자료기간에 대하여 관측치와 모의

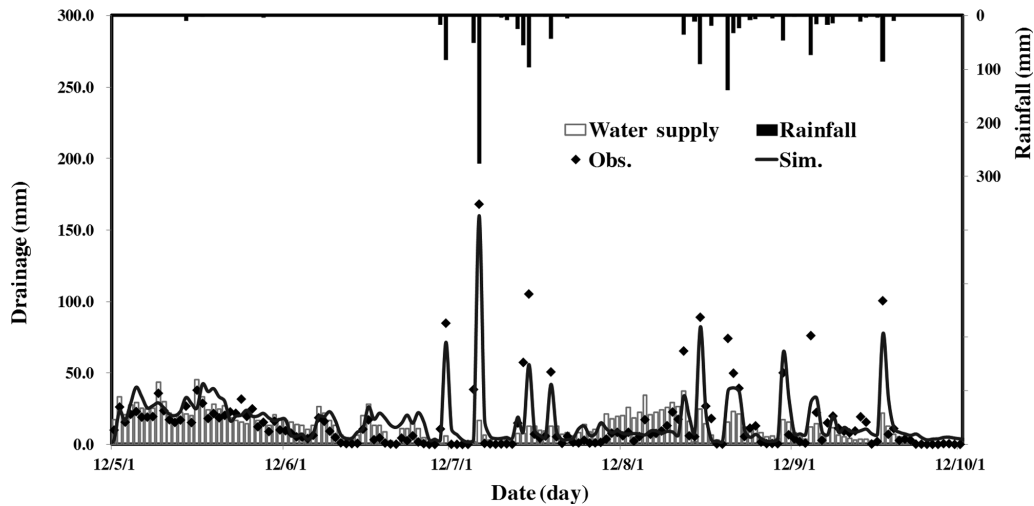


Fig. 7 Observed and simulated drainage from the study paddy block for the calibration period

Table 5 Calibrated model parameter values for drainage simulation

Parameters	Definition	Initial Value	Final Value
<i>INF</i>	Infiltration of paddy block (mm)	3.5	1.1
<i>LH</i>	Paddy levee height (mm)	100	60
<i>RCL</i>	Ratio of conveyance loss (%)	12.5	5
<i>RICD</i>	Ratio of irrigation canal drainage (%)	2011: 27.1, 2012: 11.9 (Observed)	

Table 6 Statistics of daily drainage calibration for the study paddy block

Date	Rainfall (mm)	Water supply (mm)	Drainage (mm)		<i>RMSE</i> (mm/day)	R^2	<i>EI</i>
			Obs.	Sim.			
2012	May.	16.5	734.8	776.5	11.11	0.75	0.74
	Jun.	100.8	333.7	436.4			
	Jul.	572.3	262.2	471.1			
	Aug.	426.2	527.9	502.2			
	Sep.	239.0	149.4	318.6			
Total	1,354.8	2,008.0	2,504.8	2,285.4			

치의 *RMSE*는 11.11 mm/day로 나타났다. *RMSE*는 관측치와 모의치의 오차를 정량적으로 나타내는 지표로, 오차의 편차가 심할수록 그 값이 커진다. 관측치와 모의치의 상관관계 (R^2)는 0.75로 나타났으며, 모형의 효율지수 (*EI*)는 0.74의 값을 보였다. *EI*는 0보다 작으면 모형의 추정 결과가 나쁘거나 실측 자료가 일관성이 없음을 의미하며, 0과 1 사이에서 1에 가까울수록 모의치와 관측치가 일치함을 의미한다. 모형의 보정 전과 비교하여 보정 후는 비강우시 관개에 의한 회귀수량 모의가 잘 이루어지는 것으로 나타났으며, 총 배수량의 모의치와 실측치의 차가 줄

어드는 것으로 나타났다. 또한, *RMSE*가 감소하였고, R^2 와 *EI*가 증가하여, 보정 전에 비해 모의치가 실측치를 전체적으로 잘 반영하는 것으로 나타났다.

다. 모형의 검정

모형의 검정은 모형의 보정에 이용되지 않은 2011년 자료에 대하여 수행하였다. Fig. 8은 검정기간인 2011년에 대하여 강우량과 관개량에 따른 배수량의 실측치와 모의치의 변화를 보여주고 있다. Table 7은 통계적인 변량을 이용하여 실측치와 모의치를 비교하여 평가한 결과를 나타내고 있다. 자료기간의 총 강우량은 1,591.4 mm, 총 농업용수 공급량은 2,324.1 mm였고, 자료기간에 대한 실측 총 배수량은 3,015.5 mm였다. 모형에 의한 모의 총 배수량은 2,922.2 mm로 나타났다. 모형의 보정에 사용된 자료기간에 대하여 *RMSE*는 11.62 mm/day, R^2 는 0.65, *EI*는 0.68의 값을 보였다. 모형의 검정 결과는 보정 결과와 비교하여 총 배수량의 모의치와 실측치가 더 유사하게 나타났다. 통계적인 변량은 *RMSE*가 0.51 mm/day 높게 나타났고, R^2 가 0.11, *EI*가 0.06만큼 낮게 나타나 보정 결과가 검정에 비해 더 나은 것으로 나타났다.

한편, 보정 및 검정기간에 대해 영농초기인 5, 6월은 강우량이 상대적으로 적음에도 배수량이 높게 나타나는데, 이는 5, 6월의 경우 농업용수 공급량이 집중되어 (2011년 1,212.9 mm, 2012년 1,896.5 mm) 관개회귀수량으로 배수되는 수량이 많기 때문으로 사료된다. 배수량 측정에 관한 선행연구를 살펴보면 Oh et al. (2002)은 하천수 관개 광역 논에 대해 1999년의 5, 6월에 강우량 293.5 mm, 공급량 1,833.3 mm가 유입될 때 1,904.2 mm가 배수되는 것으로, 2000년의 5, 6월에 강우량 233.4 mm, 공급량 1,760.0 mm가 유입되어 1,628.6 mm가 배수되는 것으

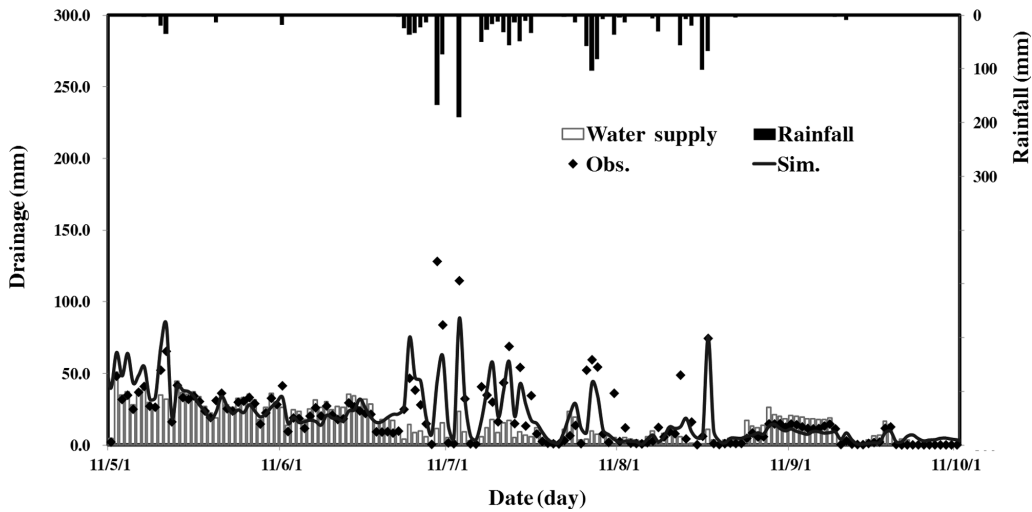


Fig. 8 Observed and simulated drainage from the study paddy block for the verification period

Table 7 Statistics of daily drainage verification for the study paddy block

Date	Rainfall (mm)	Water supply (mm)	Drainage (mm)		RMSE (mm/day)	R ²	EI	
			Obs.	Sim.				
2011	May.	74.2	967.0	1125.0	954.2	11.62	0.65	0.68
	Jun.	391.5	609.0	771.5	781.9			
	Jul.	794.3	277.6	703.1	747.7			
	Aug.	315.1	250.1	290.1	291.0			
	Sep.	16.3	220.4	125.8	147.4			
Total	1,591.4	2,324.1	3,015.5	2,922.2				

Table 8 Simulated runoff from protected cultivation area (2010~2011)

Year	Rainfall (mm)	Simulated protected cultivation runoff (mm)	Runoff ratio
2010	1,100.4	846.0	0.77
2011	1,809.6	1,507.4	0.83
Total	2,910.0	2,353.4	0.81

로 보고하는 등 영농초기의 배수량은 강우가 아닌 공급량이 원인으로 사료된다.

3. 시설재배지 유출량 추정

시설재배지 유출량 부모형을 이용하여 2010~2011년의 시설재배지에서의 배수량을 추정하였다. Table 8은 모의 기간에 대해 유출량과 강우량을 보여주고 있다. 모의 유출량은 2010년의 강우량 1,100.4 mm에 대해 77 %인 846.0 mm으로 나타났고, 2011년의 강우량 1,809.6 mm에 대해 83 %인 1,507.4 mm로 나타났다. 전체 모의 기간에 대해 총 강우량은 2,910.0 mm, 모의 총 유출량은 2,353.4 mm였고, 평균 유출률은 0.81으로 나타났다.

4. 복합영농 관개지구 배수량 추정

본 연구에서는 복합영농 관개지구 배수량 모의 모형을 이용하여 이동저수지 관개지구의 2011년도 영농기의 물수지를 분석하

였다. 상류 논외 배수량이 하류 논외의 관개량으로 반복 이용되는 경우는 고려하지 않았다. 모형의 매개변수인 침투량, 송수 손실을 그리고 물꼬 높이는 각각 1.1 mm/day, 5 %, 60 mm로 모형의 보정치를 이용하였으며, 용수로 배수량의 비율 값은 2011년의 실측치인 27.1 %를 이용하였다. 물수지 분석 결과를 순별로 정리하면 Table 9와 같고, Fig. 9는 주요 수문인자인 강우량, 공급량, 배수량을 일별로 보여주고 있다. 관개지구로 유입되는 수량은 강우량 1,591.4 mm, 농업용수 공급량 1,028.2 mm로 총 2,619.6 mm인 것으로 나타났다. 논, 시설재배지, 용수로에서 배출되는 총 배수량은 1,890.8 mm, 수로에서 손실되는 수량은 51.6 mm, 논외 침투로 손실되는 수량은 132.0 mm, 증발산량은 570.3 mm로 총 2,644.6 mm가 관개지구에서 빠져나가는 것으로 분석되었다. 농업용수 공급량은 유효우량에 의해 최대답수심 이상으로 관개되는 시기와 중간낙수기에 공급이 되지 않는 것으로 모의되었다. 논 침투량은 비교적 낮은 값으로 나타나는데, 이는 대상지구의 토양 종류가 Clay loam으로 점토 성분이 타 지역에 비해 상대적으로 많기 때문으로 사료된다. 침투량 측정 선행 연구에 의하면 Hwang et al. (2002)은 논 토양 종류가 Clay loam인 지역에 대해 5월 중순~8월 하순의 침투량은 78 mm로, Oh et al. (2002)는 토양 종류가 loam인 광역 논에 대해 5월~9월의 침투량이 147.4 mm로 보고하는 등 본 연구와 비슷하게 작은

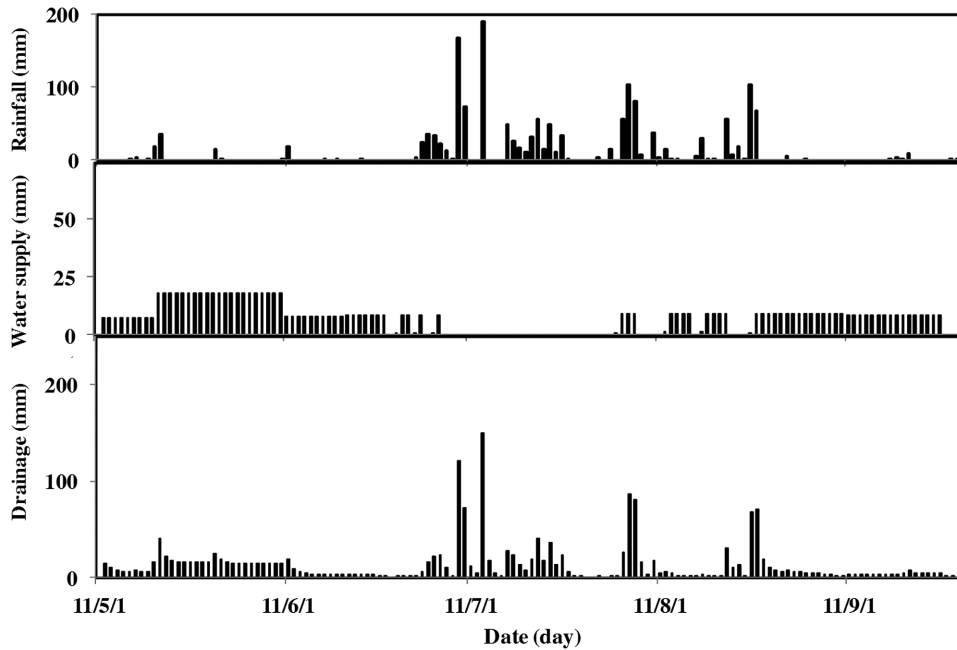


Fig. 9 Daily hydrologic data simulated of the study irrigated district

Table 9 Water balance of the study irrigated district

Date	Inflow			Outflow					
	Rain. (mm)	Water supply (mm)	sum	Drain.	Conv. loss	Infilt.	Evap.	sum	
2011	May.	74.2	473.5	547.7	491.5	23.7	34.1	23.4	572.7
	Jun.	391.5	177.6	569.1	355.2	8.9	25.3	179.7	569.1
	Jul.	794.3	27.7	822.0	660.9	1.4	27.5	132.2	822.0
	Aug.	315.1	213.7	528.8	317.3	10.8	25.3	175.5	528.8
	Sep.	16.3	135.7	152.0	65.9	6.8	19.8	59.5	152.0
Total	1,591.4	1,028.2	2,619.6	1,890.8	51.6	132.0	570.3	2,644.6	

Rain.: Rainfall, Drain.: Drainage, Conv.: Conveyance, Infilt.: Infiltration, Evap.: Evapotranspiration

수치를 보이고 있다. 배수량은 5월에 491.5 mm로 크게 나타나는데 이는 영농초기에 농업용수 공급량이 많이 유입되어 관개회귀수량으로 배수되었기 때문으로, 5월 이후 6월 말~7월 말에서 크게 나타나는 것은 강우가 많이 내려 유출되었기 때문이다. 총 유입량과 총 유출량의 차가 약 25.0 mm로 나타나는데, 이는 4월에 농업용수 공급에 의해 답수된 수량이 있었기 때문으로 사료된다.

V. 요약 및 결론

본 연구에서는 복합영농 관개지구의 배수량을 일별로 추정하는 모형을 개발하였다. 본 모형은 농업용수 공급량 부모형, 논

광역 배수량 부모형, 시설재배지 유출량 부모형으로 구성되어 있으며, 논 포장 배수량, 용수로 배수량, 시설재배지 유출량을 구분하여 일별로 추정한다. 또한, 이동저수지 관개지구의 모니터링 자료를 이용하여 모형의 적용성을 평가하였으며, 이로부터 이동저수지 관개지구의 물수지를 분석하여 응용성을 평가하였다.

본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 농업용수 공급량 부모형의 적용성을 평가하기 위하여 회귀 분석에 이용되지 않은 2011년에 대해 검정을 실시하였으며, 그 결과 모의 공급량은 1,142.6 mm, 실측 공급량은 1,218.5 mm으로 나타났으며 0.745의 상관관계가 있는 것으로 분석되었다.
2. 논 광역 배수량 부모형의 적용성을 평가하기 위하여 시험지구에 대하여 모형의 매개변수를 보정하고, 검정을 실시하였다. 보정 결과, 실측 배수량은 2,504.8 mm, 모의 배수량은 2,285.4 mm로 R^2 는 0.75, EA 는 0.74 $RMSE$ 는 11.11 mm/day이었다. 검정 결과, 실측 배수량은 3,015.5 mm, 모의 배수량은 2,922.2 mm로 R^2 는 0.65, EA 는 0.68 $RMSE$ 는 11.62 mm/day이었다.
3. 시설재배지 유출량 부모형을 2010년도와 2011년도에 대해 적용하였으며, 그 결과 2010년도는 강우량 1,100.4 mm에 대해 유출량 846.0 mm 유출률 0.77로 나타났고, 2011년도는 강우량 1,809.6 mm에 대해 유출량 1,507.4 mm, 유출률 0.83로 나타났다.
4. 이동저수지 관개지구의 2011년도 영농기에 대하여 물수지를 분석하였으며, 그 결과 강우량 1,591.4 mm 농업용수 공급량 1,028.2 mm로 총 2,619.6 mm가 관개지구로 유입되는 것으로

나타났고, 배수량 1,890.8 mm, 송수 손실 수량 51.6 mm, 논 침투량 132.0 mm, 증발산량 570.3 mm로 총 2,644.6 mm가 관개지구에서 빠져나가는 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 관개지구의 배수량에 대한 이해를 넓히며, 배수량 추정에 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

본 연구는 농림수산식품기술기획평가원의 “농촌용수 물순환 종합해석 모형 기술 개발”과제의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Chung, H. W., S. J. Kim, J. S. Kim, J. K. Noh, K. W. Park, J. G. Son, K. H. Lee, N. H. Lee, S. O. Chung, J. D. Choi, and J. Y. Choi, 2006. Irrigation and drainage engineering. Paju, Dongmyungsa (in Korean).
2. David, R. L., and M. J. Gregory, 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research* 35(1): 233-241.
3. Im, S. J., 2000. Modeling irrigation return flow from paddy fields on agricultural watersheds. Ph.D. diss., Seoul, Seoul National University (in Korean).
4. Im, S. J., M. G. Kang, S. W. Park, and C. E. Park, 2000. Surveying water supply from irrigation reservoirs in Han River basin. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 42(6): 37-44 (in Korean).
5. Im, S. J., S. W. Park, and H. J. Kim, 2000. Methodology for estimating agricultural water supply in the Han River basin. *Journal of Korea Water Resources Association* 33(6): 765-774 (in Korean).
6. Ju, W. J., J. T. Kim, K. W. Park, and Y. J. Lee, 2006. Development of system for estimating water demand considering variation on farming conditions in paddy field. *Korean National Committee on Irrigation and Drainage* 13(3): 82-90 (in-Korean).
7. Kang, M. S., S. W. Park, and J. A. Chun, 2003. Estimating pollutant loading using remote sensing and GIS-AGNPS model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 45(1): 102-114 (in Korean).
8. KARICO, 2005. A study on water supply methods considering variation of farming conditions in paddy field, 160-163. Uiwang, Gyeonggi: Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation (in Korean).
9. Kim, H. K., 2009. Modeling hydrologic and water quality effects of impervious surfaces in farm and urban watersheds. Ph.D. diss., Seoul, Seoul National University (in Korean).
10. Kim, H. Y., 1988. Simulating daily inflow and release rates for irrigation reservoirs. Ph.D. diss., Seoul, Seoul National University (in Korean).
11. Kim, J. S., S. Y. Oh, K. Y. Oh, and J. W. Cho, 2005. Delivery management water requirement for irrigation ditches associated with large-sized paddy plots in Korea. *Paddy Water Environment* 3: 57-62.
12. Kim, S. J., G. A. Park, and H. J. Kwon, 2007. Evaluation of paddy water dynamics during flood period in South Korea. *KSCE Journal of Civil Engineering* 11(5): 269-276.
13. Lee, N. H., 1988. Simulating daily operation of water management systems of irrigation districts. Ph.D. diss., Seoul, Seoul National University (in Korean).
14. Lee, N. H., H. C. Hwang, S. W. Nam, S. G. Hong, and W. J. Jeon, 1998. A study on the utilization of irrigations systems for greenhouse farming. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 40(6): 37-45 (in Korean).
15. Lee, Y. J., S. J. Kim, P. S. Kim, W. J. Joo and Y. S. Yang, 2006. Study on the effective calculation method of irrigation water in a paddy fields area. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 48(3): 11-20 (in Korean).
16. Lee, Y. J., P. S. Kim, S. J. Kim, Y. K. Jee and W. J. Joo, 2008. Estimation of water loss in irrigation canals through field measurement. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 50(1): 13-21 (in Korean).
17. MAF, 1998. Design of farming scale improvement project, Gwacheon, Gyeonggi: Ministry of Agricultural and Forestry (in Korean).
18. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MFAFF), 2012. Food, agriculture, forestry and fisheries statistical yearbook, Gwacheon, Korea (in Korean).
19. Ministry of Agriculture and Forestry (MAF), 1996. Statistical yearbook of agriculture forestry and fisheries, Gwacheon, Korea (in Korean).
20. Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970. River flow

- forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of hydrology* 10(3): 282-290.
21. Oh, S. Y., J. S. Kim, K. S. Kim, S. J. Kim, and C. G. Yoon, 2002. Unit loads of pollutants in a paddy fields area with larged-scaled plots during irrigation seasons. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 44(2): 136-147 (in Korean).
 22. Hwang, H. S., C. G. Yoon, J. H. Jeon, and B. H. Kim, 2002. Water and nutrient mass balances in paddy field with groundwater irrigation in low-rainfall year. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 44(4): 39-50 (in Korean).
 23. Song, J. H., 2013. A daily surface drainage simulation model for irrigation districts consisting of paddy and protected cultivation. M.S. diss., Seoul, Seoul National University (in Korean).
 24. Song, J. H., M. S. Kang, I. H. Song, and J. R. Jang, 2012. Comparing farming methods in pollutant runoff loads from paddy fields using the CREAMS-PADDY model. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 31(4): 318-327 (in Korean).
 25. USDA-NRCS, 2004. Prt 630: Hydrology. Chapter 10: Estimation of direct runoff from strom rainfall: hydraulics and hydrology: technical references. In NRCS National Engineering Handbook. Washington, D. C.: USDA National Resources Conservation Service.
 26. Yoo, S. H., 2006. Estimating of paddy rice consumptive use using geographic information system. M.S. diss., Seoul, Seoul National University (in Korean).