

농업용 저수지 용수공급 모의 시스템의 개발

진상민 · 강문성* · 송인홍** · 송정현 · 박지훈 · 기우석***

서울대학교 생태조경·지역시스템공학부

*서울대학교 조경·지역시스템공학부, 서울대학교 농업생명과학연구원

서울대학교 농업생명과학연구원 · *주식회사 부린

Development of agricultural reservoir water supply simulation system

Jun, Sang Min · Kang, Moon Seong* · Song, Inhong** · Song, Jung-Hun · Park, Jihoon · Kee, Woosuk***

Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University

**Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University, Research Institute for Agricultural and Life Sciences, Seoul National University*

***Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University*

****Burin Inc.*

ABSTRACT : The objective of this study was to develop agricultural reservoir water supply simulation system to assess water cycle of agricultural water district. Developed system was named as ARWS (Agricultural Reservoir Water supply simulation System). ARWS consists of platform and independent modules. In ARWS, reservoir inflow was calculated using Tank model, and agricultural water supply was calculated considering current farming period and mid-summer drainage. ARWS was applied to simulate water level of Gopung and Tapjung reservoir in 2011 - 2012. The results were compared to simulation results of HOMWRS and observed data. Average R^2 , EI, RMSE of ARWS were 0.76, 0.46, 1.78 (m), average R^2 , EI, RMSE of HOMWRS were 0.88, -0.14, 2.37 (m) respectively. Considering statistical variances, water level simulation results of ARWS were more similar to observed data than HOMWRS. ARWS can be useful to estimate reservoir water supply and assess hydrological processes of agricultural water district.

Key words : Agricultural Reservoir, Agricultural Water District, ARWS, Water Supply

1. 서 론

우리나라에는 현재 약 18,000여개의 농업용 저수지가 전국에 산재해 있으며, 농업용수 공급의 대부분을 담당하고 있다. 대부분의 농업용 저수지는 농업용수 공급을 목적으로 건설되었으나, 최근 정부는 기후변화에 따른 가뭄 및 홍수 발생에 대응하고, 노후화된 저수지를 보수하기 위해 농업용 저수지 뚝 높이기 사업을 실시하였다. 이에 따라 농업용 저수지의 역할은 농업용수 공급과 더불어 하천유지용수 공급, 홍수 방어 등으로 확장되었다.

농촌에서 수자원과 관련하여 문제가 되고 있는 가뭄과 홍수, 비점오염원에 의한 하천 수질 악화 및 조류 발생 등에 대한 대책을 마련하기 위해서는 농촌 지역의 물 순환에 대한 정확한 해석이 선행되어야 한다. 농촌 지역의 물 순환 해석을 위해서는 농업용 저수지 운영 모의가 반드시 이루어져야 하며, 농업용 저수지 역할의 확장에 따른 용수공급 패턴의 변화 또한 고려되어야 한다.

우리나라에서는 많은 연구자들이 농촌 지역의 물 순환 해석을 위하여 다양한 수문, 수리, 수질 모형이 적용하여 왔다. SWAT (The Soil and Water Assessment Tool) 모형은 미국 농무성 농업연구소에서 개발된 모형으로 복합토지이용상태 및 토양 특성을 갖는 미계측 유역에서의 장기간에 걸친 오염총량을 추정하고, 최적관리기법에 따른 관리대안을 제시하는 연속적 분포형 매개변수 모형이

Corresponding author : Kang, Moon Seong

Tel. : 02-880-4582

E-mail : mskang@snu.ac.kr

다 (Kang and Park, 2003). SWAT 모형에서는 NRCS (SCS) 단위도 방법을 이용하여 강우에 따른 일별 유출량을 모의하며, 국내외에서 유역의 물 순환과 수질 모의에 널리 이용되고 있다. Lee et al. (2008)은 안성천 유역 공동수위관측소의 상류 유역을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 유역내 농업용 저수지의 운영이 유역 출구인 하천 지점에서의 유출에 미치는 영향을 분석하였으며, 농업용 저수지가 있는 유역에서는 저수지에 의한 저류 및 방류 영향을 고려하여 SWAT 모형을 적용하여야 한다고 제안하였다. Kim et al. (2013)은 유역단위 통합수문해석 모형 SWAT-MODFLOW를 경기도 안성시에 위치한 죽산천 유역에 적용하여 지하수 이용 및 농업용 저수지 운영이 하천유출에 미치는 개별적 영향 및 복합적 영향을 분석하였다.

건설기술연구원에서 개발한 도시유역의 물 순환 해석 모형인 CAT (Catchment hydrologic cycle Assessment Tool)은 균일한 수문학적 특성을 가진 범위를 소유역으로 나누어 각각의 소유역에서 지형적 요인에 따른 유출을 반영할 수 있으며, 공간 단위별로 각각 모의할 수 있도록 링크-노드 형식으로 개발되었다. CAT은 증발산, 유역 유출, 침투, 하도추적, 지하수 유거 등의 해석모듈을 가지고 있으며 이 때 물의 순환과정은 투수역과 불투수역으로 구분하여 모의가 가능하다 (Kim et al., 2012). CAT의 담수 논 유출 해석 모듈과 저류시설 모듈을 포함하고 있으며, Jang et al. (2012)은 이를 이용하여 이동저수지 상류유역을 대상으로 관개용수 공급에 따른 저수지 수위를 모의하여 실측 수위와 비교하여 그 적용성을 살펴본 바 있다.

수리시설물 모의조작 시스템 (Hydrological Operation Model for Water Resources System, HOMWRS)은 실무에서 가장 널리 쓰이는 농업용 저수지 모의조작 모형으로, 농업용저수지에서의 농업용수 공급계획을 수립하기 위한 유역 유입량, 관개 필요수량, 물수지 분석 및 단위용수량 산정이 일련의 통합된 시스템 내에서 구현되도록 한 프로그램이다 (Lee, 2011). Lee (2008)는 HOMWRS를 동화댐의 하천유지용수량 산정을 위한 관개 필요수량 산정에 적용하였으며, Woo et al. (2010)은 농업용저수지의 소수력 발전량 추정에 적용하였다. Song et al. (2012)은 CREAMS-PADDY 모형과 HOMWRS를 연계하여 담수논을 대상으로 영농방법에 따른 배출부하량 영향을 평가하였다.

지금까지 농촌 유역의 물 순환 해석을 위해 적용된 대부분의 모형은 농업용 저수지의 특징인 영농시기에 따른 농업용수 공급, 하천유지용수 공급 및 홍수기 제한수위 운영 등을 정확하게 반영하는 데는 한계가 있다. 또

한 농촌 유역의 물 순환 해석이 직면하는 문제는 복잡성이 가중되고 있으며, 지역마다 그 특성에 따라 발생하는 문제도 각기 다른 양상을 띠는 경우가 많다. 하지만 기 개발된 유역 물 순환 해석 모형들은 농촌 유역의 물 순환 해석을 목적으로 개발되지 않았기 때문에 농촌용수의 복잡성과 광범위성을 다루기는 적합하지 않은 실정이다. 따라서 보다 효율적으로 농촌유역의 물 순환을 해석하기 위해서는 농촌용수의 다양한 모의 요소를 각각 하나의 독립적인 모듈로 구성하고, 다수의 모듈을 조합하여 해석할 수 있는 맞춤형 시스템 구축이 필요하다.

본 연구의 목적은 플랫폼 및 독립 모듈을 이용하여 사용자의 편의성을 높이고, 영농환경과 농업용 저수지 활용 목적 변화에 따른 현장 상황을 반영하여 국내 농업 유역의 물 순환 해석에 용이한 농업용 저수지 용수공급 모의 시스템 (Agricultural Reservoir Water supply simulation System, ARWS)을 개발하는데 있다. 또한 개발된 시스템을 고품 및 탐정저수지에 적용하여 저수지 수위 변화를 모의하고, 실측 수위 자료 및 HOMWRS 모형에 의한 수위 모의 결과와 비교하여 ARWS의 적용성을 평가하고자 한다.

II. 농업용 저수지 용수공급 모의 시스템의 개발

1. 모형의 기본 이론

농업용수 공급과 관계된 저수지 상류유역, 저수지, 저수지 관개지구를 농촌용수구역이라고 정의할 수 있으며, 농촌용수구역의 물순환은 Figure 1과 같이 이루어진다. 저수지 상류유역의 모의 요소로는 유역유출량, 유역 증발산량 등이 있고, 저수지에서의 모의 요소는 농업용수 공급량, 물넘이 월류량, 하천유지용수 방류량, 저수지 증발량 및 수면 강수량 등이 있다. 또한, 저수지 하류 관개지구에서의 모의 요소로는 증발산량, 유효우량, 필요수량, 송수 손실량, 논 포장 배수량 등이 있다 (Table 1).

가. 저수지 물수지

저수지의 물수지 분석에는 일반적으로 아래 식 (1)과 같은 연속방정식을 사용한다.

$$S_t = S_{t-1} + I_t + P_t - (R_t + O_t + E_t) \quad (1)$$

여기서, S_t 는 t일의 저류량, S_{t-1} 는 t-1일의 저류량,

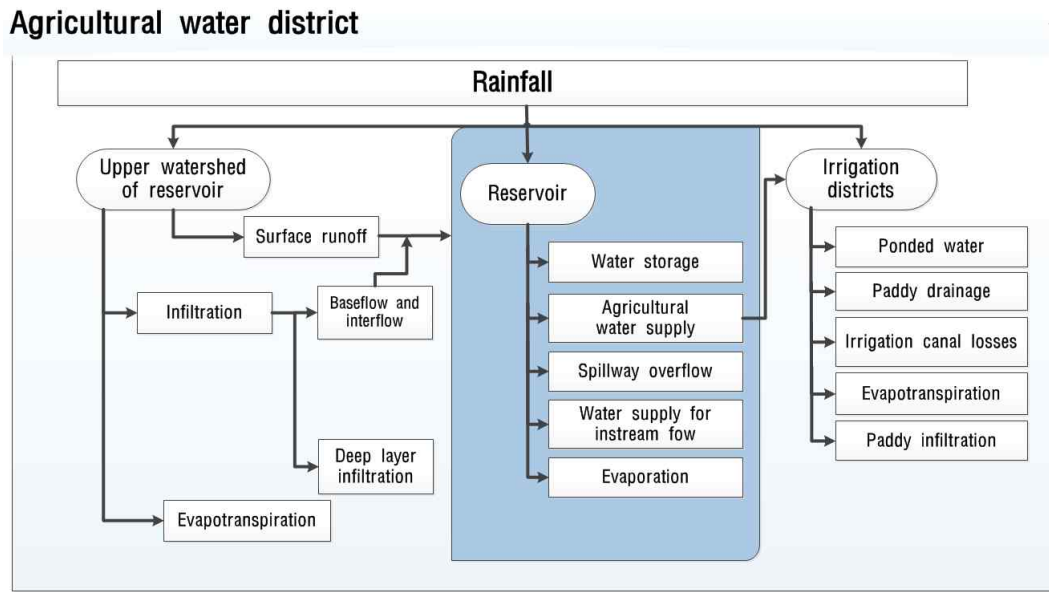


Figure 1. Schematic diagram of hydrological processes in agricultural water district

Table 1. Hydrologic modeling components of Agricultural water district

District	Component
Upper watershed of reservoir	Watershed runoff
	Evapotranspiration
	Spillway overflow
Agricultural reservoir	Agricultural water supply
	Water supply for instream flow
	Rainfall and evaporation on water surface
Irrigation districts	Evapotranspiration
	Effective rainfall
	Crop water requirement
	Irrigation canal losses
	Paddy drainage

I_t 는 유입량, P_t 는 수면강수량, R_t 는 방류량, O_t 는 물넘이 월류량, E_t 는 수면증발량을 나타낸다. 저수지의 유입 요소는 상류 유역의 강우 유출량, 지하수 유입량 및 저수지 수면강수량이 있으며, 저수지에서의 유출 요소는 방류량, 물넘이 월류량, 저수지 수면증발량, 지중침투량 및 제방침투량이 있다. 방류량은 농업용수 공급량, 하천 유지용수 공급량 등으로 구성된다. 유입량 요소 중 지하수 유입량은 그 변화가 월 단위 이상이기 때문에 순 단위, 일 단위에서는 일반적으로 고려하지 않으며, 지중침투량과 제방침투량 또한 차단벽 등을 통해 차단시킬 수 있거나 매우 소량이기 때문에 고려하지 않는 것이 일반적이다 (RRI, 2005).

나. 저수지 유입량

저수지 유입량은 Tank 모형을 이용해 산정하였다. Tank 모형은 일본의 Sugawara (1961)에 의해 개발된 개념적 집중형 모형으로, 유역을 일련의 3-4단 저류탱크 형태로 개념화시켜 강우-유출 과정을 모형화한 것으로, 일반적으로 상부탱크에서 강우와 증발산 및 지표유출을 모의하고, 하부탱크에서 지하수유출 과정을 모의하며, 상부와 하부 및 중간탱크 사이의 물 이동을 통해 침투 및 중간유출 과정을 개념적으로 모의하는 방법을 취하고 있다.

An (2013)은 기존의 Tank 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식을 보완하고자 유역경사별로 구분되는 새로운 회

귀석을 개발하였다. 이를 위해 국내 다목적 댐 15개소, 하천 수위관측소 15개소를 등 총 30개 유역의 유역특성 자료 및 유량자료를 구축하였고, 유전자 알고리즘을 적용하여 매개변수 최적화를 실시하였다. 최적화된 매개변수는 유역면적 (Area), 토지이용상태 (Paddy, Upland, Forest), 유로연장 (Length), 유역평균경사 (Slope) 등의 유역특성인자와 상관분석을 실시하였으며, 각 매개변수에 대하여 유역특성인자들로 표시되는 일반화된 회귀식을 개발하였다. 또한 유역경사를 25.0%이하, 25.0% - 31.4%, 31.4% 이상으로 구분하여 각 구간에 대한 매개변수 추정 회귀식을 개발하였으며, 유역경사에 따라 구분하여 개발한 회귀식이 기존의 회귀식에 비해 더 높은 적용성을 보이는 것으로 분석하였다. ARWS에서는 기존에 주로 사용되던 Kim et al. (1988)에 의해 개발된 Tank 모형 매개변수 추정식과, An (2013)에 의해 개발된 추정식을 선택하여 사용할 수 있도록 구성하였다.

다. 농업용수 공급량

농업용수 공급량은 수리시설물에서 농업용수 수요에 의해 실제 공급되는 용수량으로 유효우량을 제외한 농경지에서 작물재배를 위해 이용되는 관개량과 용수로에서 하천으로 배수되는 수량, 그리고 수로에서 손실되는 수량을 포함한다 (Song et al., 2013).

농 필요수량은 증발산량과 침투량을 합하고 논에서 이용되는 유효우량을 감하여 구할 수 있으며, 여기에 시설관리손실을 반영하여 관개용수량을 산정하게 된다. 필요수량은 생육기별로 묘대정지기, 묘대기, 묘대이양혼합기, 이양기, 본답기로 구분하여 산정한다.

이양기 용수량은 우리나라 평균인 140 mm를 적용하였으며, 작부시기는 RRI (2005), Ju et al. (2006)등이 제시한 기간을 적용하였다. 논물가두기는 묘대정지기부터 시작하도록 하였고, 중간낙수기를 적용할 수 있도록 하였다.

라. 하천유지용수 공급량

하천유지용수는 농촌지역의 생활용수, 공업용수, 농업용수, 수산용수 등과 함께 농촌용수의 범주에 포함되며, 농촌지역의 하천생태계 보전을 위한 최소한의 하천기능유지는 물론 환경개선 의미를 포함하고 있어 환경과 하천유지용수를 동시에 만족시키는 용수를 뜻한다 (Kim et al., 2011).

농업용 저수지의 하천유지용수 방류기준에 대한 많은 연구가 이루어지고 있지만 아직까지 명확한 방류기준이 정해지지 않고 있다. 또한 농업용 저수지의 가장 큰 역할인 농업용수 공급에 차질이 없기 위해서는 현장 상황

에 따라 하천유지용수 방류량이 달라져야할 것이다. 따라서 본 연구에서는 일별 하천유지용수 방류량의 입력이 가능하도록 하여 현장 상황에 따른 하천유지용수 방류모의가 가능하도록 하였다.

마. 무효 방류량

무효 방류량은 제한수위 초과 수량과 물넘이 월류량으로 구분할 수 있다. 저수지의 홍수조절능력을 이용하기 위해서는 홍수기에 사전 방류를 통해 제한수위를 유지하는 것이 필요하다. 농업용 저수지는 대부분 상시만수위를 유지하고 있지만 대규모 저수지, 특히 수문이 설치된 저수지의 경우 제한수위를 설정해 홍수기에 적용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 수문이 설치된 저수지의 경우 현장에서 반영하고 있는 홍수기 제한수위를 설정할 수 있도록 해 사전방류가 가능하도록 하였다.

저수지 수위가 물넘이 수위 이상이 되면 물넘이를 통해 자연방류가 이루어진다. 따라서 저수지의 저수량이 물넘이 제정고 이상일 경우 그 이상되는 저수량은 모두 월류하여 방류되도록 구성하였다. 이는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$O_t = S_t - S_f \quad (\text{단, } S_t > S_f) \quad (2)$$

여기서, O_t 는 물넘이 월류량, S_t 는 해당 기간의 저수량, S_f 는 물넘이 만수위의 저수량을 나타낸다.

바. 수면 강수량 및 증발량

저수지의 수면에 내리는 수면 강수량은 저수지의 수면적에 강수량을 곱하여 계산할 수 있으며, 저수지 수면으로부터의 증발 손실량은 인근 기상관측소의 증발계 증발량에 Veihmeyer (1964)의 Pan 계수를 곱하여 추정할 수 있다 (식 (3), 식 (4)).

$$P_t = C \times R_t \times A_f \quad (3)$$

$$E_t = C \times A_f \times E_v \times P_c \quad (4)$$

여기서, P_t 는 수면 강수량, E_t 는 수면 증발량을 나타내며, C 는 단위환산계수, R_t 는 강수량, A_f 는 저수지 수면적, E_v 는 기상관측소 증발계 증발량, P_c 는 증발계의 Pan 계수를 나타낸다.

2. 모형의 구성

농업용 저수지 용수공급 모의 시스템을 개발하고 이

를 ARWS (Agricultural Reservoir Water supply simulation System)으로 명명하였다. ARWS의 개발과정은 Figure 2와 같다. 상류유역의 유출량은 위에서 기술한 바와 같이 An (2013)의 연구에서 개발된 Tank 모형 매개변수 추정 회귀식을 적용하여 수정 3단 Tank 모형을 이용해 산정하였으며, 농업용수 공급량은 Song et al. (2013)의 연구에서 적용한 방식으로 산정하였으며, 하천유지용수 공급량, 무효 방류량, 수면 강수량 및 수면 증발량 등의 저수지 물수지 요소들을 각각 계산하였다.

고 있다. 이클립스 플랫폼은 SWT, JFace, 플랫폼 런타임 (Platform Runtime), 워크스페이스(Workspace/Resources), 워크벤치(Workbench) 등의 컴포넌트로 구성된다. 소켓을 통하여 이클립스 플랫폼과 결합한 컴포넌트를 플러그인 (plug-in)이라 하며, 이클립스의 모든 기능은 플러그인에서 수행된다. 이클립스는 이러한 플러그인 프레임워크를 활용하여 다양한 언어의 개발도구로 확장할 수 있다 (Sung et al., 2011).

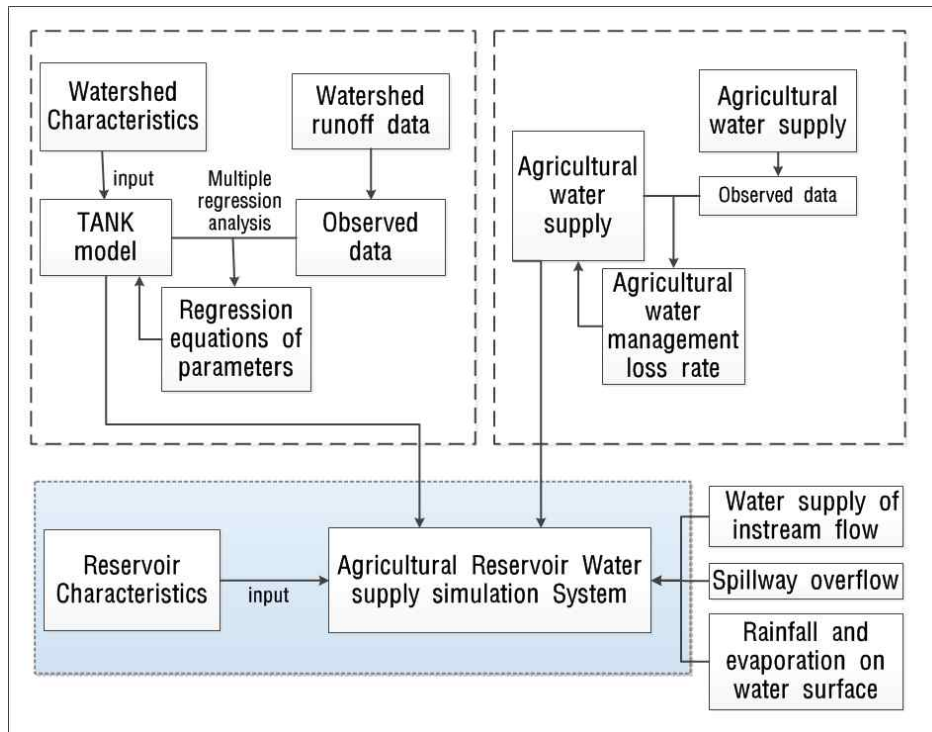


Figure 2. Schematic diagram of ARWS

가. 개발환경

ARWS의 개발언어는 자바 언어를 사용하였다. 자바 언어는 객체지향 언어로서 효율적인 개발환경, 재사용성, 안정한 실행, 플랫폼 독립성 등 많은 장점을 가지고 있으며, 이로 인해 가장 많이 이용되는 언어중 하나로서 많은 라이브러리와 소프트웨어가 개발되고 있다 (Kim et al., 2013)

개발환경은 이클립스 (Eclipse) 통합개발환경 (IDE, Integrated Development Environment)을 이용하였다. 이클립스는 자바를 비롯한 다양한 언어를 쉽게 지원하는 통합개발 환경으로, Figure 3은 이클립스 플랫폼을 나타내

나. 플랫폼 구성

세부 모듈들을 자유롭게 불러내고 활용이 가능한 모듈 기반의 플랫폼을 개발하였다. 플랫폼 위에 각종 모듈들을 활용하여 연구대상 유역을 구현할 수 있으며, 플랫폼에 모듈이 plug-in 되어 각 모듈간의 데이터 흐름과 전체적인 모듈 상호간의 관계도 한눈에 파악 할 수 있도록 하였다. 또한 등록된 모듈 외에도 추가적인 모듈을 개발하여 등록하거나, 기존 모듈들의 교체 또는 새로운 논리로 작성된 모듈을 추가하여 서로의 결과값을 비교할 수 있도록 구성하였다. 또한, 조립된 시스템은 하나의 project 로 등록하여 저장할 수 있도록 구성하였다. 따라

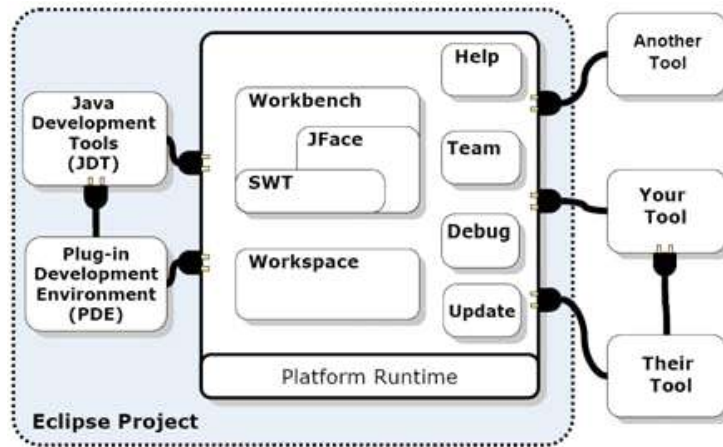


Figure 3. Eclipse platform architecture (Sung et al. 2011)

서 다양한 현장에 따라 유연하게 변경하여 저장할 수 있다. Figure 4는 개발된 플랫폼 위에 구성된 모듈의 예시를 보여주고 있다.

다. 독립 모듈 구성

모듈은 기능에 따라 크게 저수지 유입량 모듈, 농업용

수 공급량 모듈, 저수지 물수지 분석모듈로 구분된다. 또한, 모듈은 유형에 따라 Figure 5와 같이 입력자료 생성 모듈, 계산 모듈, 데이터 출력 모듈로 구분된다. 계산 모듈은 입력 자료들을 받아서 계산하고 출력파일들을 생성하고 계산하는 모듈을 말하며 입력 데이터와 출력 데이터가 존재한다. 입력자료 생성 모듈의 경우는 입력 자료

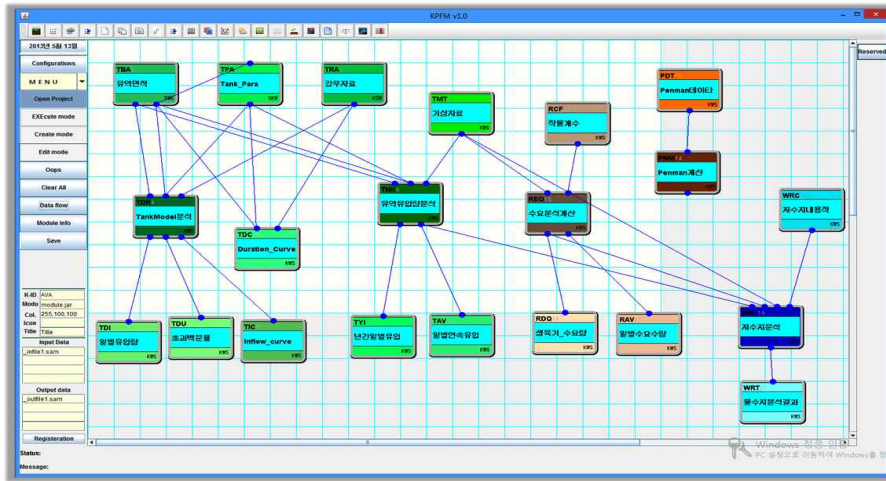


Figure 4. Systematization of modules on platform



(a) Input data generation module



(b) Calculation module



(c) Data output module

Figure 5. Types of module

는 없으며 출력파일만 존재하는 모듈을 의미한다. 데이터 출력 모듈은 계산 모듈에서 생성된 출력파일을 받아 들여 출력물을 보여주거나 데이터를 표, 그래프 등의 방법으로 출력하는 모듈을 나타낸다. Table 2는 본 연구에

이용하였고, 지형자료와 저수지제원 자료는 GIS 및 각종 보고서를 활용해 구축하였다. 대상지구의 영농자료는 한국농어촌공사에서 조사한 자료를 활용하였다.

기상자료로 고평저수지의 경우 서산관측소 자료를, 탐

Table 2. Developed modules of Agricultural Reservoir Water supply simulation System

No.	Function	Type	Module title	No.	Function	Type	Module Title
1	Reservoir inflow modules	input	‘유역면적’	9	Agricultural water supply modules	input	‘Penman데이터’
2		input	‘Tank_Para’	10		calcul-ration	‘P-M 계산’
3		input	‘강우자료’	11		calcul-ration	‘수요분석계산’
4		calcul-ration	‘Tank모형분석’	12		input	‘작물계수’
5		output	‘Inflow_curve’	13		output	‘일별수요수량’
6		output	‘일별유입량’	14		output	‘생육기_수요량’
7		output	‘기상자료’	15	Reservoir water balance modules	calcul-ration	‘저수지분석’
8		calcul-ration	‘유역유입량분석’	16		input	‘저수지내용적’
-	-	-	17	output		‘물수지분석결과’	

서 개발한 모듈들을 보여주고 있다.

III. 농업용 저수지 용수공급 모의 시스템의 적용

1. 대상유역 선정

농업용 저수지의 경우 저수지 수위 모니터링 시스템이 제대로 구축된 곳이 많이 않아 신뢰성 있는 수위자료를 취득하기가 어렵다. 본 연구에서는 기 구축된 농업용 저수지 수위 관측자료를 수집하였으며, 자료의 신뢰성이 높은 것으로 판단되는 고평 및 탐정저수지를 대상지역으로 선정하여 모형의 적용성을 평가하였다. 고평저수지는 지방2급 역천의 상류지점인 충남 서산시 운산면 고평리에 위치하며, 탐정저수지는 논산천 상류지점인 충남 논산시 부적면 탐정리에 위치한다.

2. 시스템의 적용

가. 입력자료

모형의 적용을 위해 각 대상지역의 기상자료, 지형자료, 영농자료, 저수지 제원자료 등을 구축하였다. 기상자료는 각 저수지의 인근에 위치한 기상관측소의 자료를

정저수지의 경우 금산관측소 자료를 이용하였다. 각 관측소의 일별 강수량, 평균기온, 상대습도, 평균풍속, 일조시간, 증발량 등의 자료를 수집하여 유출량, 증발산량, 유효수량, 필요수량, 저수지 수면 강수량, 수면 증발량 등의 모의에 이용하였다.

고평저수지 상류유역은 면적 2,590 ha, 유역경사는 1.8%, 유로연장은 9.2 km이고, 산림이 86.8%를 차지하고 있다. 고평저수지는 총저수량은 8,383 천m³으로서 농업용저수지로는 규모가 큰 편이고, 댐형식은 중심 Core형 필댐으로 높이는 33.2 m이고 댐 길이는 227 m이다. 방류시설인 물넘이는 Siphon구조 (2.5×7련)로 되어있어 다른 일반적인 농업용저수지 물넘이와는 다른 방류특성을 가지며 관리수위는 사수위 EL.62.0 m, 만수위는 EL.85.0 m, 홍수위 EL.85.3 m로 관리되고 있다. 용수공급을 위한 저수위는 3월말 현재 만수위인 표고 +85.00 m가 되도록 확보하며, 홍수기 하류지역의 홍수피해를 줄이기 위하여 홍수기인 약 6월 21일에서 9월 20일 사이에 저수위는 표고 +83.70 m (만수위 저수량의 90%)를 유지하도록 규정하고 있다.

탐정저수지 상류유역은 면적 21,880 ha, 유역경사는 12.9%, 유로연장은 36.9 km,이고 산림이 73.6%를 차지하고 있다. 댐형식은 중심코어형의 필댐으로, 총저수량 31,927 천m³의 규모로서 총 5,137 ha의 농경지에 농업용수를 공급하고 있다. 탐정저수지는 사수위 EL.16.00 m, 만수위 EL.28.30m로 관리되고 있으며 자연윌류식 비상

물넘이 113 m와 수문식 물넘이 (8.0m×4.3m×10련)의 이중구조로 되어 있다. 저수지의 수위확보에 있어 저수지 관리자는 댐 용도의 사업효과를 최대화할 수 있도록 3월 말 현재 저수지수위를 계획만수위 표고인 EL.28.3 m가 확보될 수 있도록 관리하고 홍수기인 6월 21일에서 9월 20일 사이의 저수위는 EL.27.3 m (저수율 81.4 %)를 유지하도록 규정하고 있다. 대상지구의 지형특성 및 저수지제원은 Table 3과 같다.

농업용수 공급량 산정을 위한 작부시기는 RRI (2005)에서 발표한 자료를 이용하여 묘대기는 4/17 - 5/20, 이앙기는 5/15 - 5/24, 본답기는 5/25 - 9/11을 적용하였으며 중간낙수기는 6/25 - 7/15, 제한수위 관리기는 6/21 - 9/20을 적용하였다 (Table 4). HOMWRS의 경우 중간낙수기 및 제한수위의 적용이 불가능하여 적용하지 않았다. 작물계수는 Yoo et al. (2006)이 제시한 값을 이용하였다.

나. 저수지 운영 모의 결과

저수지 유입량, 농업용수 공급량, 무효방류량, 저수지 수면 증발량 및 강수량 등을 고려하여 저수지 물수지 분석을 실시하여 저수지 수위를 모의하였다. 모의된 수위

는 그래프와 결정계수 (R^2 , Coefficient of determination), 효율지수(EI, Nash-Sutcliffe Efficiency Index), 평균제곱근 오차 (RMSE, Root Mean Square Error) 등의 통계변량을 이용하여 실측 수위 및 HOMWRS에 의해 모의된 수위와 비교 · 분석하였다.

Figure 6와 Figure 7은 고풍저수지의 2011년, 2012년 저수지 물수지 분석에 의한 수위 모의 결과를 나타내고 있다. 2011년의 경우 ARWS와 HOMWRS 모두 실측 수위와 비슷한 경향의 모의 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있으며, 5월 중순에서 6월 중순까지의 수위 하강부와 6월 하순에서 8월 하순까지의 제한수위 적용 시기에는 ARWS가 실측 수위와 더욱 유사하게 저수지 수위를 모의하는 것으로 나타났다. 2012년의 경우 6월 초순에서 하순까지 중간낙수기가 고려되지 않은 HOMWRS에 의한 농업용수 공급량이 과다 산정되어 수위가 ARWS에 의해 모의된 수위와 실측 수위에 비해 크게 하락하는 것으로 나타났고, 7월 초순에서 중순까지는 HOMWRS에 의해 모의된 수위가 실측 수위와 더 가까운 것으로 나타났다. 8월 이후에는 홍수기 제한수위를 적용할 수 있는 ARWS가 실측 수위와 비교적 비슷하게 수위를 모의하였으며,

Table 3. Characteristics of study reservoirs and upper watersheds of reservoirs

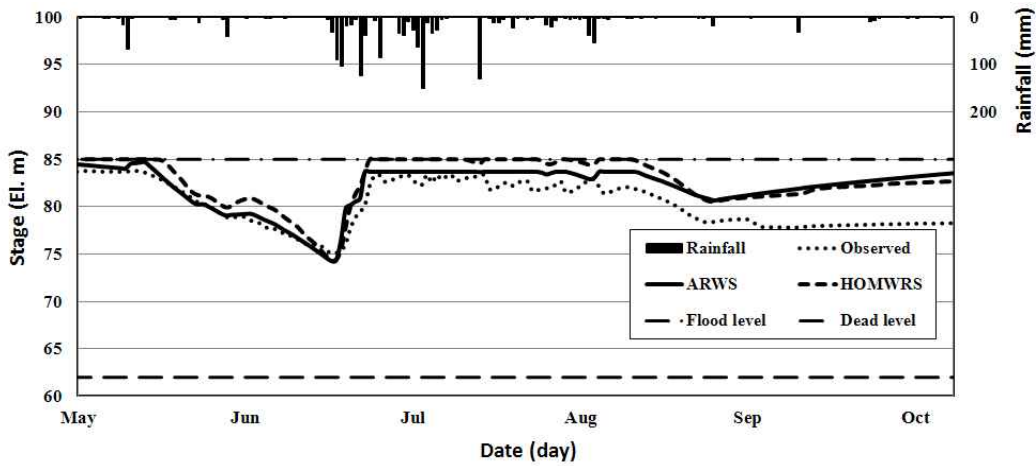
Characteristics		Gopung	Tapjung
Upper watershed of reservoir	Area (ha)	2,590	21,880
	Paddy (%)	5.4	10.4
	Upland (%)	2.6	7.9
	Forest (%)	86.8	73.6
	Slope (%)	1.8	12.9
	Length (km)	9.2	36.9
Reservoir characteristics	Irrigation area (ha)	1,294	5,137
	Total storage (10,000 m^3)	838.8	3,161
	Normal water level	85.0	28.3
	Flood water level	85.3	30.4
	Dead water level	62.0	16.0
	Restricted water level	83.7	27.3
	Spillway	Siphon	Overflow, Gate

Table 4. Comparison of input variables

Period	HOMWRS	ARWS
Period of nursery	4/17 - 5/20	4/17 - 5/20
Period of transplant	5/15 - 5/24	5/15 - 5/24
Period of rice planting water	5/25 - 9/11	5/25 - 9/11
Period of mid-summer drainage	-	6/25 - 7/15
Period of restricted water level	-	6/21 - 9/20

*HOMWRS: Hydrological Operation Model for Water Resources System

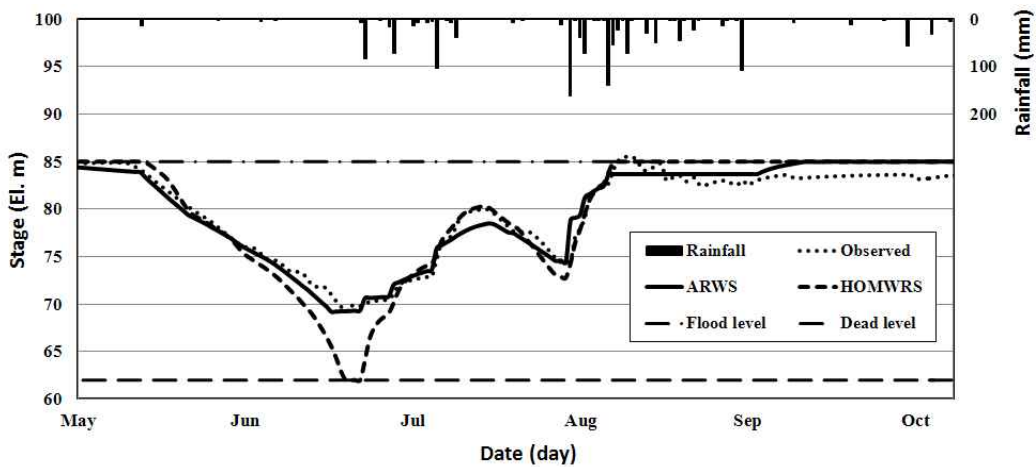
*ARWS: Agricultural Reservoir Water supply simulation System



*HOMWRS: Hydrological Operation Model for Water Resources System

*ARWS: Agricultural Reservoir Water supply simulation System

Figure 6. Simulated and observed water level of Gopung reservoir (2011)



*HOMWRS: Hydrological Operation Model for Water Resources System

*ARWS: Agricultural Reservoir Water supply simulation System

Figure 7. Simulated and observed water level of Gopung reservoir (2012)

9월 하순 이후에도 실측 수위는 제한수위를 유지하는 것으로 나타났다.

ARWS와 HOMWRS에 의한 수위 모의 결과와 실측

수위의 통계적 변량을 Table 5에 표시하였다. 2011년의 경우 결정계수는 HOMWRS가 0.79, ARWS가 0.56으로 HOMWRS가 더 높게 나타나 HOMWRS가 실측값의 경

Table 5 Comparison of statistical variances (Gopung)

System	2011			2012		
	R ²	EI	RMSE(m)	R ²	EI	RMSE(m)
HOMWRS	0.79	-1.09	2.68	0.96	0.81	2.05
ARWS	0.56	-0.03	2.47	0.96	0.95	1.08

*R²: Coefficient of determination, EI: Nash-Sutcliffe Efficiency Index, RMSE: Root Mean Square Error

*HOMWRS: Hydrological Operation Model for Water Resources System

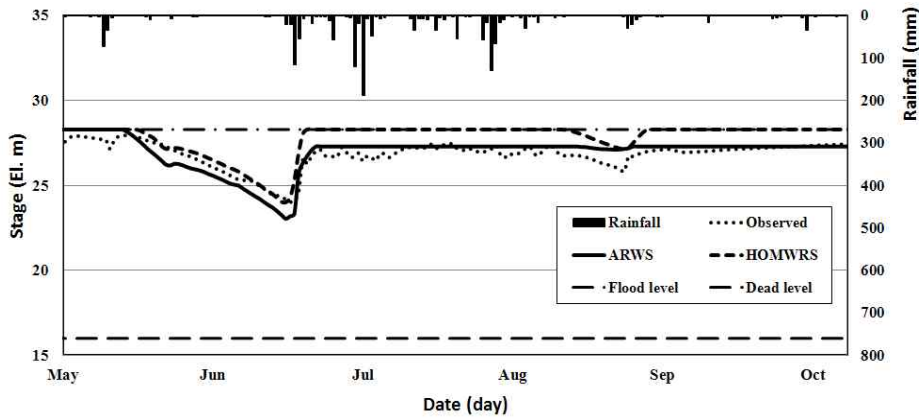
*ARWS: Agricultural Reservoir Water supply simulation System

향성을 비교적 잘 모의하는 것으로 나타났으며, 효율지수의 경우 HOMWRS에서 -1.09, ARWS에서 -0.03으로 두 시스템 모두 음의 값을 기록하였다. RMSE의 경우 HOMWRS에서 2.68 m, ARWS에서 2.47 m로 실측 수위와 모의 수위의 편차는 ARWS에서 더 작은 값을 가지는 것으로 나타났다. 2012년의 경우 결정계수와 효율지수가 HOMWRS에서 0.96과 0.81, ARWS에서 0.96과 0.95로 나타나 ARWS가 실측 수위를 비교적 잘 모의하는 것으로 나타났다. RMSE는 HOMWRS에서 2.05 m, ARWS에서 1.08 m로 실측 수위와 모의 수위와의 편차 또한 ARWS에서 작게 모의되는 것으로 나타났다. 통계적 변량들을 분석한 결과, 고평저수지에서는 중간낙수시기, 제한수위 적용 시기 등을 고려한 ARWS가 HOMWRS에 비해 실측 수위를 잘 모의하였다고 사료된다.

Figure 8과 Figure 9은 탐정저수지의 2011년, 2012년

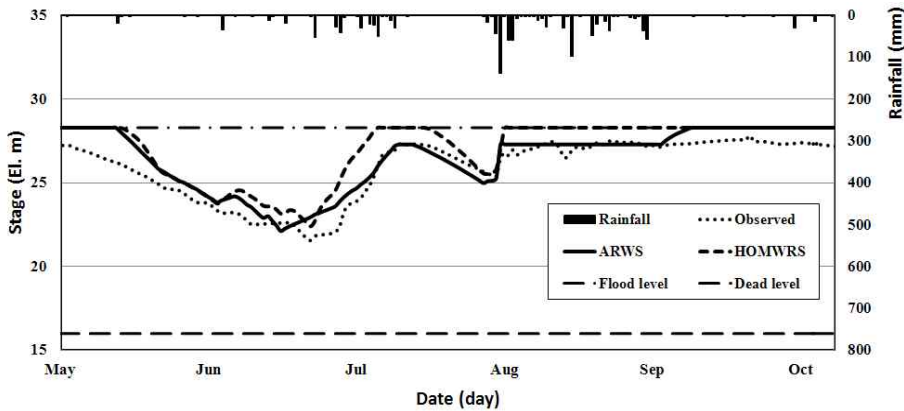
탐정저수지 물수지 분석에 의한 수위 모의 결과를 나타내고 있다. 2011년의 경우 5월 초순에서 6월 중순까지는 HOMWRS가 실측 수위와 비슷하게 수위를 모의하는 것으로 나타났으며, 6월 하순부터는 제한수위의 적용이 가능한 ARWS가 실측 수위와 비슷하게 수위를 모의하는 것으로 나타났다. 2012년의 경우 전체적으로 ARWS가 HOMWRS에 비해 실측 수위와 더 가깝게 수위를 모의하는 것으로 나타났으며, 본 연구에서 적용한 작부시기보다 더 이른 시기에 실제 용수 공급이 시작되어 영농기 초반에 실측 수위와 모의 수위가 차이를 보이는 것으로 나타났다.

탐정저수지의 ARWS와 HOMWRS에 의한 수위 모의 결과와 실측 수위의 통계적 변량을 Table 6에 표시하였다. 2011년의 경우 결정계수는 HOMWRS가 0.77, ARWS가 0.81로 ARWS가 더 높게 나타나 실측값의 경향성을



*HOMWRS: Hydrological Operation Model for Water Resources System
*ARWS: Agricultural Reservoir Water supply simulation System

Figure 8. Simulated and observed water level of Tapjung reservoir (2011)



*HOMWRS: Hydrological Operation Model for Water Resources System
*ARWS: Agricultural Reservoir Water supply simulation System

Figure 9. Simulated and observed water level of Tapjung reservoir (2012)

잘 모의하는 것으로 나타났으며, 효율지수의 경우 HOMWRS에서 -0.85, ARWS에서 0.60으로 ARWS가 실측 수위를 비교적 잘 모의하는 것으로 나타났다. RMSE의 경우 HOMWRS에서 1.08 m, ARWS에서 0.50 m로 실측 수위와 모의 수위의 편차는 ARWS에서 더 작은 값을 가지는 것으로 나타났다. 2012년의 경우 결정계수와 효율 지수가 HOMWRS에서 0.90과 0.51, ARWS에서 0.89과 0.79로 나타나 ARWS가 실측 수위를 비교적 잘 모의하는 것으로 나타났으며, RMSE는 HOMWRS에서 1.28 m, ARWS에서 0.84 m로 실측 수위와 모의 수위와의 편차 또한 ARWS에서 작게 모의되는 것으로 나타났다. 통계적 변량들을 분석한 결과, 탐정저수지에서 또한 고평저수지와 마찬가지로 ARWS가 HOMWRS에 비해 실측 수위를 잘 모의하였다고 사료된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 농업용 저수지 용수공급 모의 시스템 (ARWS)을 개발하였다. ARWS는 모듈기반의 플랫폼으로 구성되어 사용자가 자유롭게 연구대상 유역을 구현할 수 있으며, 등록된 모듈 외에도 추가적인 모듈을 개발하여 등록할 수 있다. ARWS 시스템의 개발언어는 자바 언어를 이용하였으며, 개발환경은 이클립스 (Eclipse) 통합개발환경 (IDE, Integrated Development Environment)를 이용하였다.

모듈은 기능에 따라 크게 저수지 유입량 모듈, 농업용수 공급량 모듈, 저수지 물수지 분석모듈로 구분되며 총 21개로 이루어졌다. 또한, 유형에 따라 입력자료 생성 모듈, 계산 모듈, 데이터 출력 모듈로 구분된다. 계산 모듈은 입력 자료들을 받아서 계산하고 출력파일들을 생성하고 계산하는 모듈을 말하며 입력 데이터와 출력 데이터가 존재한다. 입력자료 생성 모듈의 경우는 입력 자료는 없으며 출력파일만 존재하는 모듈을 의미한다. 데이터 출력 모듈은 계산 모듈에서 생성된 출력파일을 받아들여 출력물을 보여주거나 데이터를 표, 그래프 등의 방법으로

로 출력하는 모듈을 나타낸다.

ARWS를 고평저수지와 탐정저수지에 적용하여 농업용 저수지 운영을 모의하였으며, 저수지 수위 모의 결과를 실측 수위 및 HOMWRS에 의한 모의 결과와 비교 분석하였다. 수위 그래프 및 결정계수, 효율지수, 평균제곱근오차 등의 통계적 변량을 이용하여 비교한 결과, ARWS는 HOMWRS에 비해 비교적 실측 수위와 유사하게 저수지 수위를 모의하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 개발한 ARWS는 향후 농촌유역의 물순환 해석에 적용이 용이할 것으로 기대된다. 또한, 모의요소들이 각각의 독립된 모듈로 개발되어 모듈 구성에 따라 사용자에게 다양한 환경을 제공하고 신규 모듈을 추가를 통한 확장이 가능해 다양한 현장에서 이용이 가능할 것으로 기대된다. 하지만 향후 ARWS의 현장 활용성을 높이기 위해서는 수질 모듈의 추가, 홍수 유출 모의 모듈 추가, 하천유지용수 방류 기준의 적용 등의 개선이 뒤따라야 하며, 이를 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

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

Reference

1. An, G. H., Yum, K. T., Ban, Y. J., and Byun, C. Y., 2009, Current status and future directions of reservoir mathematical and water quality models in domestic and foreign countries: focusing on 3-D models, Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 42 (8), pp. 83-92.
2. An, J. H., 2013, Development of regression equations for the parameter estimation of tank model based on basin slope, M.S. diss., Seoul, Seoul National University.

Table 6. Comparison of statistical variances (Tapjung)

System	2011			2012		
	R ²	EI	RMSE(m)	R ²	EI	RMSE(m)
HOMWRS	0.77	-0.85	1.08	0.90	0.51	1.28
ARWS	0.81	0.60	0.50	0.89	0.79	0.84

*R²: Coefficient of determination, EI: Nash-Sutcliffe Efficiency Index, RMSE: Root Mean Square Error

*HOMWRS: Hydrological Operation Model for Water Resources System

*ARWS: Agricultural Reservoir Water supply simulation System

3. Jang, C. H., Kim, H. J., and Kim, J. T., 2012, Prediction of reservoir water level using CAT, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, Vol. 54 (1): pp. 27-38.
 4. Ju, W. J., Kim, J. T., Park, K. W., and Lee, Y. J., 2006, Development of system for estimating water demand considering variation of farming conditions in paddy field, KCID Journal, Vol. 13 (1), pp. 82-90.
 5. Kang, M. S. and Park, S.W., 2003, Development and application of total maximum daily loads simulation system using nonpoint source pollution model, Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 36 (1), pp. 117-128.
 6. Kim, H. J., C. H. Jang, and S. J. Noh, 2012, Development and application of the catchment hydrologic cycle assessment tool considering urbanization (I) - Model development -. Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 45 (2), pp. 203-215 (in Korean).
 7. Kim, N. W., Lee, J. W., Chung, I. M., and Lee, M. H., 2013, Combined effects of groundwater abstraction and irrigation reservoir on streamflow, Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 46 (7), pp. 719-733.
 8. Kim, S. M., Kim, S. J., Kim, Y. W., Park, T. Y., Kim, S. M., Park, K. W., and Jang, M. W., 2011, Potential release of environmental flow through irrigation Reservoir, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, Vol. 53 (6), pp. 101-109.
 9. Kim, S. T., Kim, J. M., Park, J. S., and Yoo, W. H., 2013, Translating from BML to BIRS for utilization of specifications in Java source code, Journal of the Korean Institute of Information Scientistes and Engineers, Vol: 40 (5), pp. 248-255.
 10. Lee, S. Y., 2008, Estimation of environmentally friendly flow of Donghwa dam. M.S. diss., Seoul, Konkuk National University.
 11. Lee, T. H., 2011, Introduction of HOMWRS - Agricultural reservoir water balance analysis program -, Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 44 (7), pp. 88-91.
 12. Lee, Y. J., Park, M. J., Park, K. W., and Kim, S. J., 2008, Analysis of hydrologic behavior including agricultural reservoir operation using SWAT model, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, Vol. 11 (1): pp. 20-30.
 13. Rural research institute, 2005, Research of appropriate agricultural water supplies considering changes of farming conditions.
 14. Seong, W. K., Kang, H. S., and Bae, J. M., 2011, Development of an Eclipse-based IDE for educational compilers, Journal of the Korean Association of Computer Education, Vol. 14 (5), pp. 9-18.
 15. Song, J. H., Kang, M. S., Song, I. H., and Jang, J. R., 2012, Comparing farming methods in pollutant runoff loads from paddy fields using the CREAMS-PADDY model, Korean Journal of Environmental Agriculture, Vol. 31 (4), pp. 318-327.
 16. Song, J. H., Kang, M. S., Song, I. H., Hwang, S. H., Park, J. H., and Ahn, J. H., 2013, Surface drainage simulation model for irrigation districts composed of paddy and protected cultivation, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, Vol. 55 (3), pp. 63-73.
 17. Sugawara, M., 1961, On the analysis of runoff structure about several Japanese rivers, Jap. Jour. Geophys 2(4): 1-76.
 18. Woo, J. Y., and Kim, J. S., 2010, Estimation of annual capacity of small hydro power using agricultural reservoirs, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, Vol. 52 (6), pp. 1-7.
 19. Yoo, S. H., Choi, J. Y., and Jang, M. W., 2006, Estimation of paddy rice crop coefficients for FAO Penman-Monteith and Modified Penman Method, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, Vol. 48 (1), pp. 13-23.
-
- 접 수 일: (2014년 2월 17일)
 수 정 일: (1차: 2014년 2월 26일, 2차: 6월 12일
 3차: 6월 12일)
 게재확정일: (2014년 6월 12일)
 ■ 3인 익명 심사필