



CAT을 이용한 저수지 수위 예측

Prediction of Reservoir Water Level using CAT

장철희* · 김현준**† · 김진택***

Jang, Cheol Hee · Kim, Hyeon Jun · Kim, Jin Taek

ABSTRACT

This study is to analyse the hydrological behavior of agricultural reservoir using CAT (Catchment hydrologic cycle Assessment Tool). The CAT is a water cycle analysis model in order to quantitatively assess the characteristics of the short/long-term changes in watershed. It supports the effective design of water cycle improvement facilities by supplementing the strengths and weaknesses of existing conceptual parameter-based lumped hydrologic models and physical parameter-based distributed hydrologic models. The CAT especially supports the analysis of runoff processes in paddy fields and reservoirs. To evaluate the impact of agricultural reservoir operation and irrigation water supply on long-term rainfall-runoff process, the CAT was applied to Idong experimental catchment, operated for research on the rural catchment characteristics and accumulated long term data by hydrological observation equipments since 2000. From the results of the main control points, Idong, Yongdeok and Misan reservoirs, the daily water levels of those points are consistent well with observed water levels, and the Nash-Sutcliffe model efficiencies were 0.32~0.89 (2001~2007) and correlation coefficients were 0.73~0.98.

Keywords: Hydrologic cycle; Rainfall-runoff model; CAT; Reservoir water level; Idong

1. 서 론

하천 및 유역의 장기유출은 지형특성, 식생 및 토지이용, 토양특성 그리고 강우 및 증발산 등과 같은 다양한 자연적, 물리적 요소 및 저류시설물 등과 같은 인위적 요소에 의해 지배된다. 장기유출 해석은 저수지와 댐의 용량 결정, 가뭄대책 수립, 하천유지유량 결정 등의 이수계획과 용수공급을 위한 댐 및 저수지의 물관리, 수리권의 허가 및 조정, 용수 분쟁 조정 등의 하천 물관리 실무와 하천·호소의 수질예측 등에도 필수적이다. 저류시설물의 수용 및 방류 능력은 국부적으로는 저수지 하류에, 광역적으로는 유역 전체에 상당한 영향을 미칠 수 있으며 이러한 관점에서 볼 때 강우-유출 모형을 이용하여 장기유출 해석 시 유역 내에 포함된 저수지나 댐과 같은 인위적 시설물을 고려하여 모형을 구성하는 것이 타당하다.

최근 Shin and Kang (2006)은 SWAT 모형 (Arnold et al., 1993)을 이용하여 댐, 저류지, 하도저류 등 저류시설물 요소에 대한 메커니즘 및 요소 분석을 통해 모형을 개선하고 이들 저류시설물에 의한 하류 장기유출 변동 영향 분석을 용담댐, 태화강, 수영강 유역 등 다양한 유역에 적용한바 있다. 또한, Kim et al. (2005)은 SWAT 모형을 국내 실정에 맞도록 수정하여 SWAT-K로 수정하였으며 이 수정된 모형을 이용해 저수지를 포함한 농업유역이나 미계측 유역에 적용하였다. Kite (2000, 2001)는 터키 서부 Gediz 유역에 위치한 댐, 저수지와 관계계획을 고려하여 소유역 분석을 실시하였고, 이후 물 배분, 토지이용 및 기후변화, 댐 건설에 따른 환경과 수자원 영향을 평가하기 위하여 SLURP 모형을 Mekong강에 적용하였다. 국내에서는 Kwon et al. (2007)이 위성영상자료와 저수지 자료를 이용하여 농업가뭄을 평가하는데 SLURP 모형을 이용하였고, Park et al. (2007)은 안성천 유역의 농업용 저수지 운영에 따른 수문학적 변동에 대하여 분석한 바 있다. Ahn et al. (2009)은 금강권역을 중심으로 MODSIM을 이용하여 농업용 수리시설의 용수공급을 평가하였으며, Lee et al. (2008, 2010)은 용담댐 상류 유역에 대하여 관개수로를 통한 유입량, 하류하천에서의 배수량 등의 자료를 이용하여 농업지역에서의 회귀율을 분석하였다. Kang et al. (1998)은 낙동강유역에 SSARR 모형 (USACE, 1991)을 적용하

* 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 수자원연구실 수석연구원

** 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 수자원연구실 연구위원

*** 한국농어촌공사 농어촌연구원 책임연구원

† Corresponding author Tel.: +82-31-910-0266

Fax: +82-31-910-0757

E-mail: hjkim@kict.re.kr

2011년 10월 24일 투고

2011년 11월 28일 심사완료

2011년 12월 12일 게재확정

고 유역 내 용수이용을 수요측면에서 산정된 용수수요량을 이용하여 물수지 분석을 실시하였고, 이후 Ryoo et al. (2007)은 금강유역을 대상으로 SSARR 모형을 적용하여 적정 용수이용량을 분석하여 물수지 분석 시 용수수요량과 같은 계획차원에서 산정된 용수량을 운영측면에서 이용할 경우 발생하는 문제점을 규명한 바 있다.

현재 우리나라에서는 담수 논 농사지역의 장기 유출 및 물 사용에 대한 정확한 예측이 미흡한 실정이며, 농업지역에서 발생하는 관개와 회귀에 따른 수자원의 정확한 평가가 필요한 상황이다. 최근 유역규모의 담수 논에 대한 많은 연구들이 소규모 관개지구에 대해 수문성분의 변동성과 영향을 모의할 수 있도록 장기 강우-유출 모형의 각 해당 모듈을 수정·보완하여 사용하고 있다. 따라서, 우리나라 담수 논에 대한 영향을 유역단위로 확대해석이 가능하며 농업용수가 유역 내 수문성분에 미치는 영향의 정량적 평가를 위한 국내 장기 강우-유출 모형의 개발은 시급한 당면과제라 할 수 있다.

기존의 개념적 매개변수 기반의 집중형 수문모형은 자료구축이 간편하다는 장점이 있으나 경험적 매개변수를 사용하기 때문에 매개변수의 최적화가 필요하며 미세측 유역에 대한 매개변수의 추정치가 다소 어려운 점이 있다. 한편, 물리적 매개변수 기반의 분포형 수문모형은 물리적인 매개변수를 적용함으로써 도시 개발 등과 같은 인위적인 유역의 토지이용 및 토양특성의 변화가 물순환계에 미치는 영향을 공간적으로 해석할 수 있는 장점이 있는 반면 물리적 모형 구축에 필요한 시간과 자료의 양이 방대하여 과도한 노력이 필요한 것이 사실이다.

CAT (Catchment hydrologic cycle Assessment Tool)은 기존의 개념적 매개변수 기반의 집중형 수문모형과 물리적 매개변수 기반의 분포형 수문모형의 장점을 최대한 집약하여 개발된 모형으로, 유역의 장·단기적 유출 특성을 정량적으로 평가하고 저류시설 및 침투시설과 같은 물순환 개선시설의 평가 및 효과적인 설계를 지원하기 위한 물순환 해석 모형이다. 특히, 담수 논에서의 유출 과정을 모의할 수 있고 저류시설의 물수지 분석이 가능하며 설마천, 소양강댐 등의 자연유역과 판교, 세종시 등의 여러 신도시 개발지역에 대한 적용성이 검증된 바 있다 (Kim et al., 2011).

본 연구에서는 장기 강우-유출 모형인 CAT 모형을 이용하여 농업용 저수지의 영향을 반영할 수 있도록 시스템을 구성함으로써 농업유역의 장기유출에 대한 모의결과의 신뢰도를 증진시키고자 하였다. 즉, 관개용 저류시설과 용수공급이 복합적으로 운영되고 있는 복잡한 농업유역에서 관개용수 공급에 따른 저수지 수위를 모의하여 관측치와 비교함으로써 저수지 운영에 따른 수위의 변화를 개발된 모형이 적절하게 모의하는지를 평가하고자 한다. 분석을 위하여 경기도 평택의 이동저수지 상류유역을 대

상유역으로 선정하였다. 이동저수지 유역 내에는 강우계, 저수지 수위계, 하천 수위계, 수로 수위계 등의 수문관측 시설을 설치하여 2000년부터 수문자료를 장기적으로 축적하고 있다. 또한, 장기적인 관개용수 공급량 자료를 축적함으로써 농업용 저수지 운영에 따른 장기 유출특성을 분석하는데 적절한 지역이라 판단된다.

II. 재료 및 방법

1. CAT의 기본구조

CAT에서의 물의 순환과정은 투수역과 불투수역으로 구분되며, 각 공간 단위별로 침투, 증발, 지하수 흐름 등의 모의가 가능하도록 하였다. 토양층 및 대수층을 각각 한 개의 층으로 모형화하였고, 대수층으로부터의 지하수 취수를 고려하도록 하였다.

CAT의 물순환 해석모듈로는 증발산, 침투, 유역 유출, 지하수 유거, 하도추적 등이 있다. 증발산은 잠재 증발산량을 외부에서 계산하여 입력하거나, Penman-Monteith 방법 (Smith et al., 1998)을 선택할 수 있으며, 침투는 Rainfall Excess (MLIT, 2001; Maidment, 1992), Green&Ampt (Green and Ampt, 1911; Mein and Larson, 1973; Chu, 1978), Horton 방법 (Horton, 1933) 등이 제공된다. 또한, 인접 유역간의 지하수 이동을 고려할 수 있으며, 하도추적을 위해 Muskingum, Muskingum-Cunge, Kinematic wave 방법 등의 해석법 등이 제공된다.

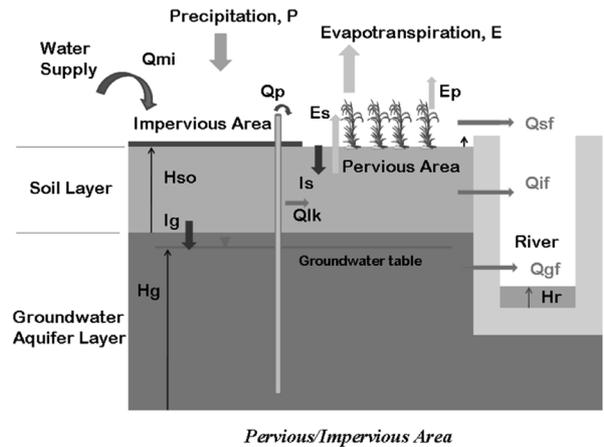


Fig. 1 Hydrological processes in CAT

2. 논에서의 유출 해석

CAT에서는 논에서의 유출과정을 반영할 수 있는 방법을 제시하였다. 우리나라의 경우 논에서의 유출은 물꼬를 통하여 배수되며, 물꼬는 논에서의 담수심을 조절하는 역할을 하는데, 시기

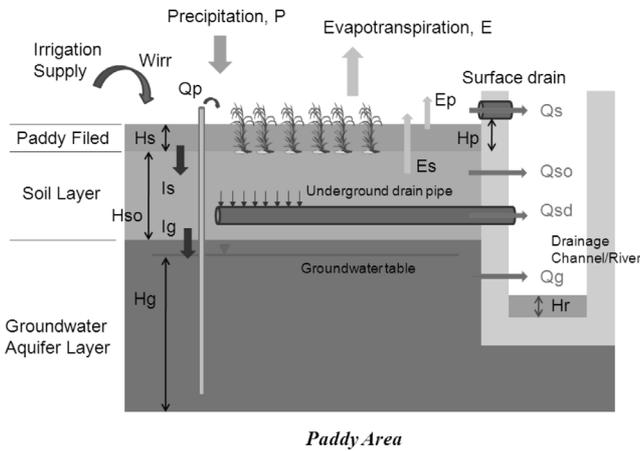


Fig. 2 Hydrological processes in paddy area

별로 조정이 가능하다. CAT은 논에서의 유출과정을 모의하기 위하여 유역의 침투역과 동일하게 토양층과 지하수층으로 구분한다. 논에서의 암거배수를 반영하기 위하여 인공적인 배수시설을 토양층에 포함하고, 지표면 유출은 논에서 물꼬관리를 통하여 이루어지는 점을 고려하여 일별 물꼬높이를 반영하도록 하였다.

논에서의 물꼬높이에 따른 지표면 배수량은 식 (1)을 이용하여 계산된다.

$$\begin{aligned} Q_s &= \alpha_0 \sqrt{(H_s - H_p)} & (H_s > H_p) \\ Q_s &= 0 & (H_s \leq H_p) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, Q_s 는 지표면 배수량 (m^3/sec), α_0 는 물꼬 배수계수 ($mm^{0.5}/hr$), H_s 는 논 의 담수심 (m), H_p 는 논 의 물꼬높이 (m)를 나타낸다. 식 (1)에서 보면 논 의 담수심이 물꼬높이보다 클 경우 지표면 배수량이 계산되며 담수심이 물꼬높이보다 작으면 지표면 배수는 발생하지 않는다. 또한, 논에서의 암거배수와 관련된 식은 식 (2)와 같다 (Jia, Y., 1997).

$$Q_{sd} = \min(K(\theta), \alpha_p \sqrt{H_s + H_{so}}) \quad (2)$$

여기서, Q_{sd} 는 암거 배수량 (m^3/sec), $K(\theta)$ 는 토양함수율에 따른 투수계수 (mm/hr), α_p 는 암거배수의 유출계수 ($mm^{0.5}/hr$), H_s 는 논 의 담수심 (m), H_{so} 는 논 의 토양층 두께 (m)이다. 또한, 우리나라 일부 지역에서는 물꼬배수와 병행하여 파이프를 통한 배수를 사용하고 있다. 파이프 배수의 개념은 Fig. 3과 식 (3)과 같다.

$$Q_{sorf} = \sqrt{2gH_s} \cdot A_{sorf} \cdot C_A \cdot C_{sorf} \quad (3)$$

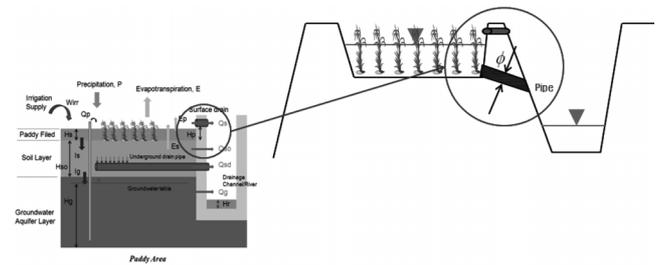


Fig. 3 Pipe drainage in paddy area

여기서, Q_{sorf} 는 파이프를 통한 배수량 (m^3/sec), g 는 중력가속도 (m/sec), H_s 는 논 의 담수심 (m), A_{sorf} 는 파이프를 흐르는 물의 배수면적 (m^2), C_A 는 파이프 개수, C_{sorf} 는 파이프 유출 계수이다.

3. 저수지 물수지 해석

CAT에서의 저류시설은 저수지 수면의 증발량과 취수량을 고려하며, 방류구를 통한 방류량을 반영한다. 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dS_s}{dt} = Q_s - Q_{dis} - Q_{sovf} + R - E \quad (4)$$

여기서, S_s 는 저류시설 저류량 (m^3), Q_s 는 저류시설 유입량 (m^3/s), Q_{dis} 는 저류시설 유출량 (m^3/s), Q_{sovf} 는 저류시설로부터의 월류량 (m^3/s), R 는 저류지 수면으로의 강우량 (mm), E 는 수면으로부터의 증발량 (mm)이다.

4. 모형 적용

본 연구에서는 CAT의 담수 논 유출 해석 모듈과 저류시설 모듈을 이용하여 관개용 저류시설과 관개용수 공급이 복합적으로

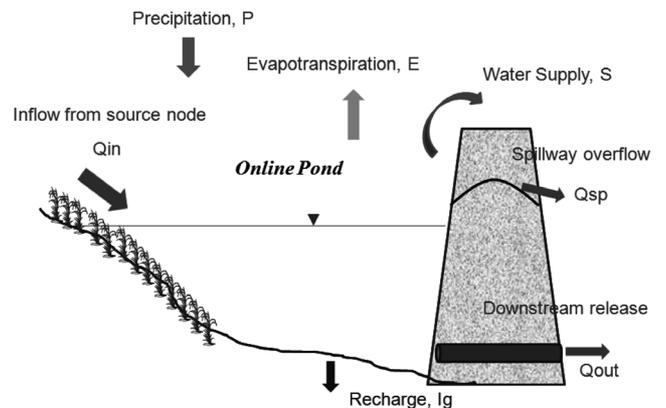


Fig. 4 Water balance in a reservoir

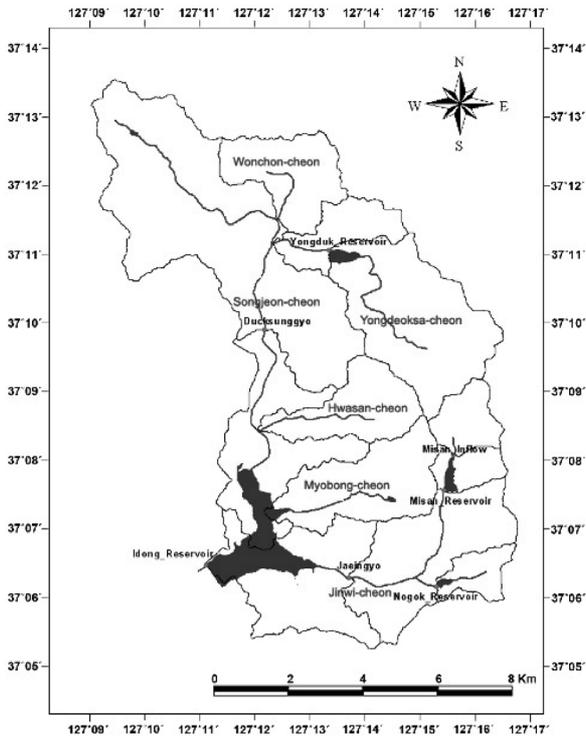
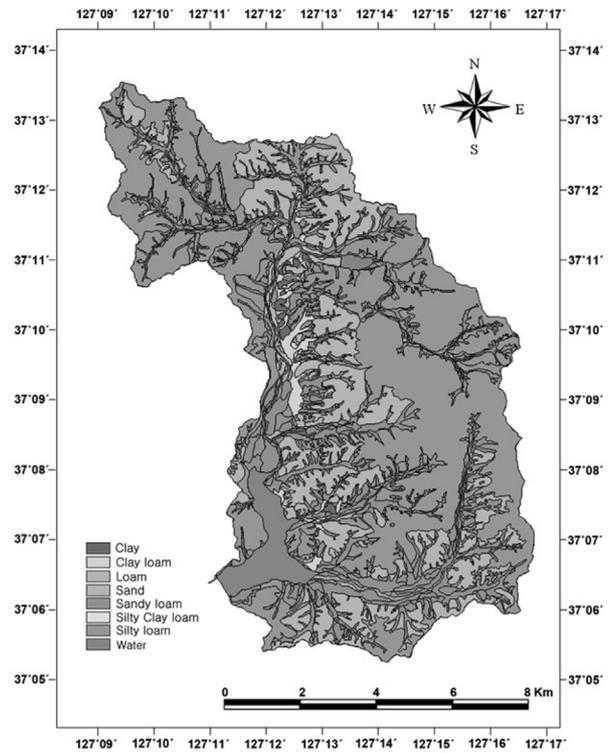


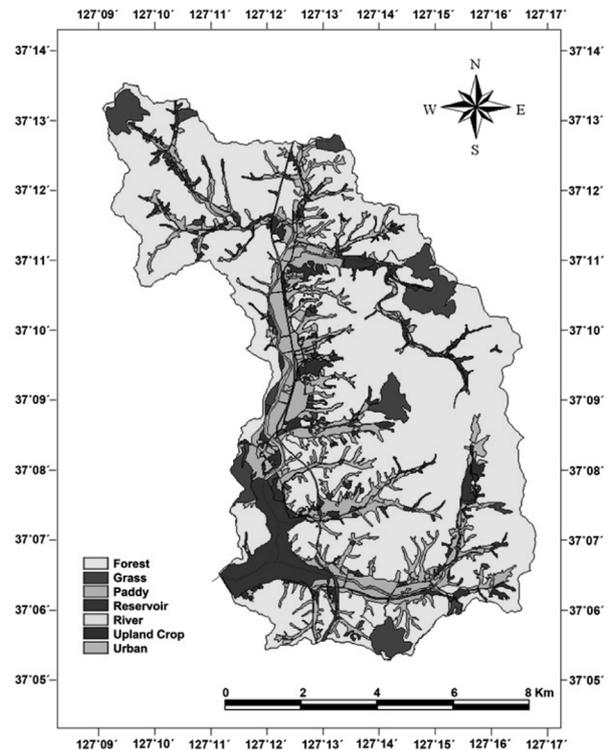
Fig. 5 Study area



(a) Soil type

운영되고 있는 복잡한 농업유역인 이동저수지 상류유역을 대상으로 관개용수 공급에 따른 저수지 수위를 모의하여 관측치와 비교함으로써 저수지 운영에 따른 장기 유출 특성을 적절하게 모의하는지를 평가하고자 하였다.

이동저수지 유역은 행정구역으로는 경기도 용인시 이동면, 남사면 일원이며 서쪽은 경기도 오산시, 남쪽은 평택시, 안성시 그리고, 북쪽은 용인시와 인접하고 있다. 이동저수지 유역 내 주요 시설로서 유역면적 94.4 km²의 이동저수지와 상류에 용덕저수지 (12.41 km²), 미산저수지 (4.39 km²), 노곡저수지 (2.00 km²)의 3개 저수지가 위치하며 2개의 유입하천 (진위천, 송전천)에 의해 이동저수지로 유입되며 이동저수지의 방류수는 진위천을 통하여 평택호로 유입된다. 이동저수지 유역의 토양을 살펴보면 사질양토 (Sandy loam) 26 %, 식토 (Clay) 1 %, 식양질토 (Clay loam) 2 %, 양토 (Loam) 21 %, 사토 (Sand) 1 %, 미사질식양토 (Silty Clay loam) 0.5 %, 미사질양토 (Silty loam) 44 % 등으로 이루어져 있으며 송전천의 상류부와 용덕사천, 진위천 상류부 대부분의 토양이 미사질양토 (Silty loam)로 나타나며, 하도 구간을 따라 사질양토 (Sandy loam)가 주로 분포한다. 토지이용 현황은 산림지역이 62 %, 초지 6 %, 논 12 %, 밭 5 %, 하천 및 호소가 5 %, 주거지역이 5 %의 분포로 나타나 대부분이 산림 지역으로 나타났으며, 하천 양안을 따라 경작지가 분포하는 전형적인 농촌 산지유역의 양상을 나타낸다.



(b) Landuse

Fig. 6 Characteristics of Idong catchment

III. 결과 및 고찰

1. 입력자료 구축

가. 소유역 구분

이동저수지 유역의 소유역은 관개지구의 위치 및 관개면적을 고려하여 각 저수지 하류부의 관개용수 공급 시스템을 반영하도록 하였고, 각 지방하천 출구점 및 3개의 하천수위 관측지점 (덕성교, 재인교, 미산저수지 유입수로 등)을 기준으로 총 12개의 소유역으로 구분하였다. 또한, 각 소유역의 논 지역을 추출하여 별도의 블록으로 모형을 적용하였다. 이동유역의 소유역 구분 및 용수공급 시스템 구축 현황은 Fig. 7 및 Table 1과 같다. 이동저수지 유역 내의 저수지 현황은 Table 2와 같다.

나. 지표면 특성

지표면 특성 입력 자료는 경사, 식생률, 불투수면적률 및 지면저류량 (Depression Storage) 등과 같이 대부분 토지피복특성에 따른 변수이다. 본 적용에서는 환경부에서 제공되는 중분류 토지이용현황도를 각 소유역경계로 추출하여 평균 불투수면적율을 산정하였으며 각 소유역의 평균경사는 수치고도모형 (DEM)에서 경사도를 추출한 후 소유역별 평균값을 사용하였다. 또한,

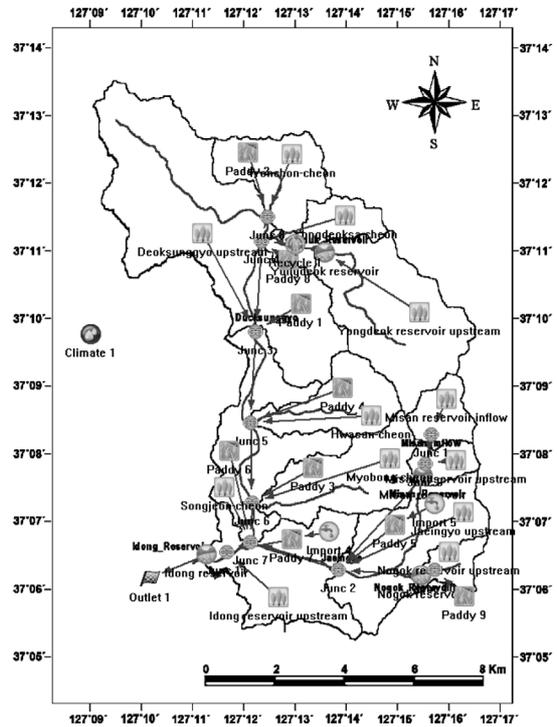


Fig. 7 Sub-catchment division and system construction for the Idong catchment

Table 1 Sub-catchment division of Idong catchment

Stream	Classification	Area (km ²)	Paddy area (km ²)	Total	Water supply
	Sub-catchment				
Jinwi	Idong Res. upstream	8.5	0.7	9.2	Misan Res.
	Jaeingyo upstream	8.3	1.5	9.8	Misan Res.
	Misan Res. upstream	1.8	-	1.8	-
	Misan Res. inflow	2.6	-	2.6	-
	Nogok Res. upstream	1.6	0.3	1.9	-
Songjeon	The confluence with Jinwi-cheon	8.0	1.2	9.2	Yongdeok Res.
	The confluence with Myobong-cheon	6.6	1.1	7.7	-
	The confluence with Hwasan-cheon	4.7	0.7	5.4	-
	Deoksunggyo upstream	23.2	0.9	24.1	Yongdeok Res.
	The confluence with Wonchon-cheon	5.2	0.6	5.8	-
	The confluence with Yongdeoksa-cheon	3.0	0.5	3.5	Yongdeok Res.
	Yongdeok Res. upstream	12.5	-	12.5	-
Total		86.0	7.5	93.5	-

Table 2 Details of reservoirs in Idong irrigation districts (Korea Rural Community Corporation)

Stream name	Reservoir name	Catchment area (1,000 m ²)	Effective storage (1,000 m ³)	Benefit area (1,000 m ²)	Embankment length (m)	Embankment height (m)
Jinwi-cheon	Nogok	2,000	167	400	146	10
	Misan	4,420	1,698	2,220	251	25
	Idong	93,000	20,906	24,470	660	17.5
Songjeon-cheon	Yongdeok	12,500	1,003	2,610	299	13.4

식생률은 증발산과 관련된 입력 자료로 기존의 연구 (Jia, Y., 1997)에서 월별로 제시한 경험값을 평균하여 적용하였다.

다. 토양

CAT은 토양에서의 침투 및 증발산 등을 토양의 물리적 특성에 기반하여 해석하며, 이를 위해서는 토양에 대한 물리적 입력 자료를 구축하여야 한다. 사용된 토양의 물리적 특성치는 토양 깊이, 포화투수계수, 사면방향 투수계수, 포화함수율, 잔류함수율, Mualem 지수 등이 있으며, 토양의 깊이 및 입력자료에 대한 정보는 농촌진흥청의 1:25,000 정밀토양도 속성 (<http://asis.rda.go.kr/>)을 기준으로 각 토양통별 구분을 위해 미국 USDA에서 분류하고 있는 12개의 토성으로 구분하여 적용하였다. 본 연구에서 토성별 입력자료는 Rawls and Brakensiek (Chow, 1988)가 제시한 값을 이용하였으며, 각 소유역별로 토양특성 면적비를 산정한 후 평균값을 사용하였다.

라. 하천

이동저수지 유역의 하도제원과 관련된 자료는 진위천수계 하천정비기본계획보고서 (Gyeonggi-Do, 2006)의 자료를 이용하였다. 하상재료의 투수계수는 기존의 연구결과 (Kim et al., 2009)를 활용하였으며, 하도추적 입력자료는 하천정비기본계획보고서의 자료를 이용할 수 있으나 본 연구에서는 일단위의 모의인 관계로 별도의 하도추적은 수행하지 않았다.

마. 대수층

대수층 관련 입력자료는 지하수위, 저류계수, 대수층의 상·하부 표고값 등이 있다. 본 연구에서는 용남지구 농촌지하수관리 보고서 (Yongin City, 2009), 안성지역 지하수기초조사 보고서

(MLTM, 2007) 및 한국농촌공사에서 운영 중인 농어촌지하수넷 (www.groundwater.or.kr)의 자료를 참고하여 입력자료를 구축하였다. 수집한 자료는 특정 관측지점에 대한 자료이므로 소유역별 평균값으로 사용하는데 한계가 있다. 따라서, 대수층 관련 변수는 보정의 대상이 된다.

바. 기상·수문

1) 기상

이동저수지 유역 내에는 기상관측소가 전무한 관계로 인근에 위치하여 1964년부터 현재까지 관측되고 있는 기상청 수원측후소의 7개년 간 (2001년~2007년)의 기상자료를 이용하였고, 강우량은 이동유역 내에 위치한 3개의 우량관측지점 (용덕저수지, 미산저수지, 이동저수지 등)의 2001년부터 2007년까지 일별 자료를 이용하였다.

2) 저수위

이동저수지 상류유역의 주요 수리시설로는 이동저수지, 용덕저수지, 미산저수지, 노곡저수지 4개소가 있다. 유역면적은 용덕저수지 12.5 km², 미산저수지 4.4 km², 노곡저수지 2.0 km²이고, 관계면적은 용덕저수지가 2.6 km², 미산저수지가 2.2 km², 노곡저수지 0.4 km²이다. 이동저수지는 저수용량 20,906 천m³으로 대규모 저수지에 속하며 미산, 용덕 저수지는 중소규모저수지에 해당된다.

저수지 모의를 위해서 이동저수지 유역 내의 용덕, 미산, 이동, 노곡 등 4개소의 저수위 자료를 이용하였다. 각 저수지의 2001년부터 2007년까지의 저수위 자료를 보면 Fig. 8과 같다. 노곡저수지의 경우는 2005년부터 저수위 관측이 시작되었다. 각 저수지의 저수위 변화를 살펴보면 1월에 대부분의 저수지가 만수

Table 3 Channel characteristics of Idong catchment

Stream	Classification	Area (km ²)	Length (km)	Riverbed Elevation (EL.m)	Riverbed slope	River width (m)	Manning's roughness
	Sub-catchment						
Jinwi	Idong Res. upstream	9.2	3.9	47	0.002	45	0.034
	Jaengyo upstream	9.8	4.4	77	0.008	31	0.034
	Misan Res. upstream	1.8	1.1	120	0.009	-	0.038
	Misan Res. inflow	2.6	0.9	130	0.008	8	0.038
	Nogok Res. upstream	1.9	1.4	90	0.009	5	0.038
Songjeon	The confluence with Jinwi-cheon	9.2	4.0	49	0.003	70	0.035
	The confluence with Myobong-cheon	7.7	4.4	66	0.013	26	0.035
	The confluence with Hwasan-cheon	5.4	4.5	57	0.018	16	0.038
	Deoksunggyo upstream	24.1	9.6	86	0.007	54	0.037
	The confluence with Wonchon-cheon	5.8	2.8	86	0.014	30	0.038
	The confluence with Yongdeoksa-cheon	3.5	1.4	82	0.008	39	0.038
	Yongdeok Res. upstream	12.5	7.9	118	0.009	26	0.038

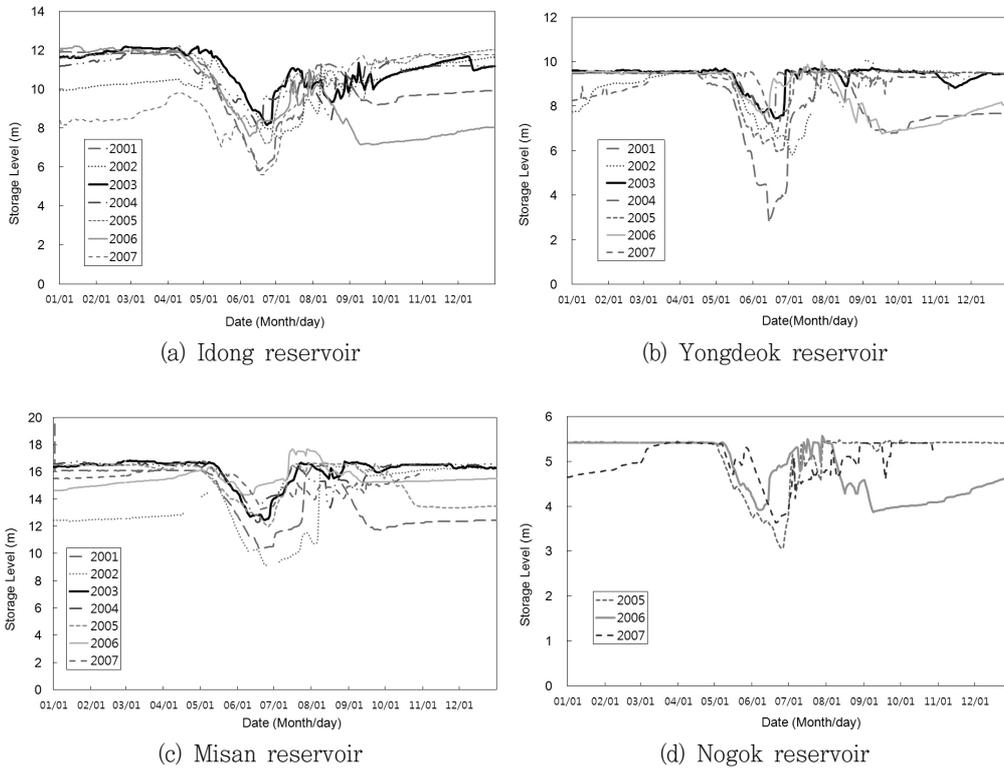


Fig. 8 Observed water level for each reservoir

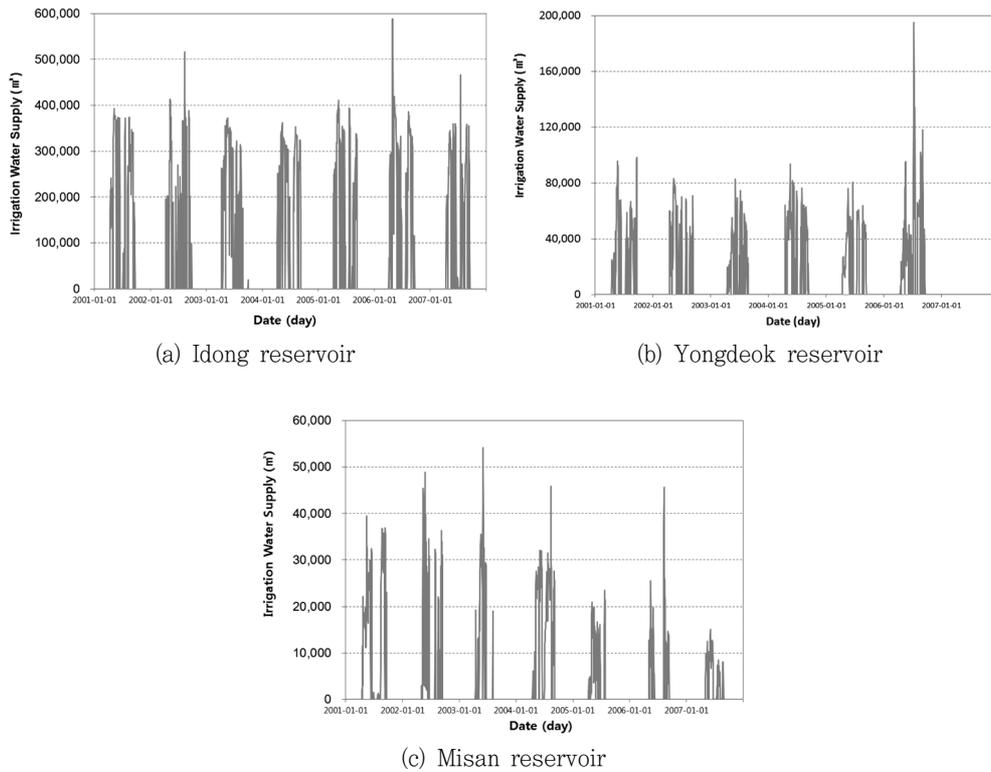


Fig. 9 Observed irrigation water supply for each reservoir

위에 가까우며, 5월 이후 관개용수의 공급으로 6월의 저수율이 이동저수지의 경우 61 %까지 하락하였다가 이후 여름 호우에 의하여 저수율이 만수위에 근접하는 양상을 보였다. 본 연구에서

는 관개용수 공급량 자료가 없는 노곡저수지를 제외한 용덕, 미산, 이동 저수지의 수위 자료를 이용하여 저수지 운영에 따른 저수위의 변화 양상을 모의하고자 하였다.

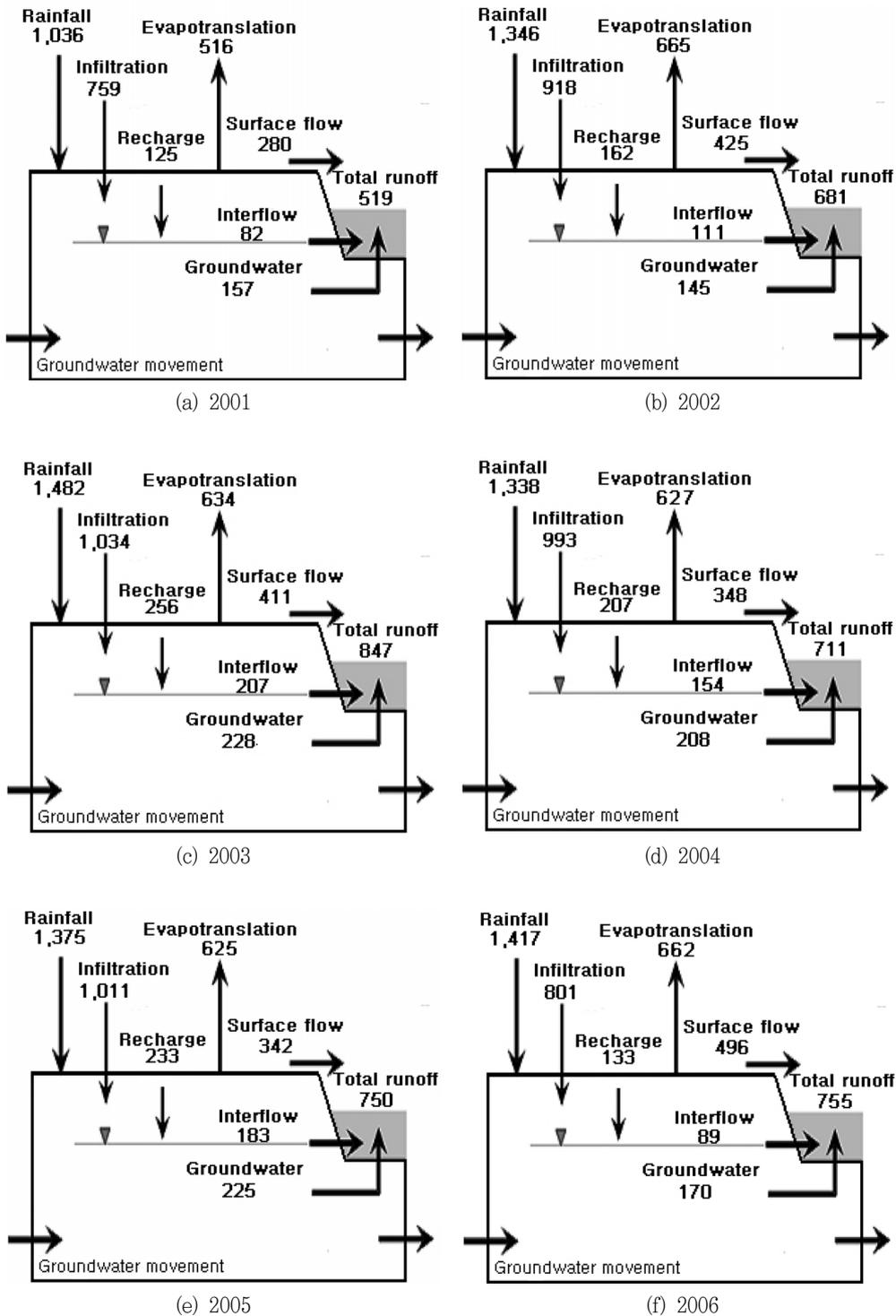


Fig. 10 Annual water budget for the simulation results

Table 4 Summary of simulated hydrological components (2001~2007) (Unit: mm/yr)

Year	Area (km ²)	Rainfall	Evapotranspiration	Surface flow	Interflow	Groundwater outflow	Total Runoff
2001	93.5	1,035	516	280	82	157	519
2002	93.5	1,346	665	425	111	145	681
2003	93.5	1,481	634	411	207	228	847
2004	93.5	1,338	627	348	154	208	711
2005	93.5	1,375	625	342	183	225	750
2006	93.5	1,417	662	496	89	170	755
2007	93.5	1,327	652	278	187	210	676
Average	93.5	1,331	626	368	145	192	705

3) 관개용수 공급량

이동저수지 유역 내의 3개 (용덕, 미산, 이동) 저수지의 관개용수 공급량을 관개면적별로 관개지구로 공급되도록 하는 유역 시스템을 구축하였다. 각 저수지의 관개용수 공급량 자료는 Fig. 9와 같다. 그림에서 보는바와 같이 관개용수의 공급 시기는 4월 중순에서 9월 중순으로 나타났다.

2. 모의 결과

모의는 2001년 1월 1일부터 2007년 12월 31일까지 7년을 모의하였다. 모의 시간 간격은 1일로 하였고, 잠재증발산량 산정은 FAO Penman-Monteith 방법을 이용하였으며 소유역의 월별 작물계수는 Jung (2010)에 의한 값을 사용하였다. 또한, 논에서의 월별 작물계수는 Yoo et al. (2005)의 연구결과를 활용하였다. 금번 적용은 일 단위의 모의인 관계로 하도추적은 수행하지 않았다. 침투방법은 Rainfall Excess 방법을 사용하였으며, 매개변수의 보정은 대수층 특성, 토양 깊이, 연직방향과 사면방향의 포화투수계수 등을 대상으로 수행하였다.

가. 물수지 분석

이동저수지 유역에 대한 2001년부터 2007년까지의 모의 결과를 이동저수지 출구점에 대하여 세부 수문 요소별로 살펴보면 Table 4와 같다. 아래의 결과는 유역 내의 3개 저수지의 관개용수 공급량을 포함하여 모의한 결과이다. 표에서 보는바와 같이 이동유역의 평균 강우량 1,332 mm에 대하여 증발산, 직접유출, 기저유출의 비율이 각각 49 %, 29 %, 25 %로 나타났고, 총 유출률은 54 %를 보였다. 연간 물수지에서 나타나는 직접유출량 보다는 기저유출의 비율이 높은 전형적인 농촌 산지유역의 유출양상을 보이고 있다.

나. 저수위 분석

저수위 분석을 위해 2001년부터 2007년까지의 실측 저수위 자료를 이용하였다. 용덕저수지의 경우 유역면적이 12.5 km²,

Table 5 Statistical criteria for the results of storage level simulation (Idong Res.)

	RB ¹⁾	RMSE ²⁾ (m)	MAE ³⁾ (m)	ME ⁴⁾	R ⁵⁾	R ^{2 6)}
2001	-0.006	0.62	0.48	0.85	0.94	0.88
2002	0.094	1.22	0.98	0.52	0.73	0.53
2003	-0.024	1.09	0.82	0.32	0.75	0.57
2004	0.021	0.67	0.54	0.46	0.86	0.74
2005	-0.026	0.96	0.66	0.39	0.86	0.74
2006	-0.009	0.80	0.66	0.81	0.91	0.82
2007	0.040	0.57	0.47	0.89	0.98	0.95

- 1) RB : Relative Bias
- 2) RMSE : Root Mean Square Error
- 3) MAE : Mean Absolute Error
- 4) ME : Nash-Sutcliffe Model Efficiency
- 5) R : Correlation Coefficient
- 6) R² : Coefficient of Determination (R-squared)

유효저수량이 1,003 천m³으로 유역면적과 유효저수량의 차이가 상당히 커서 유역으로부터 유입량 및 관개수량에 따라 민감하게 변하는 저수위의 양상을 보였다. 반면 미산저수지의 경우는 유역면적이 4.4 km²인데 비하여 유효저수량이 1,698 천m³으로 상류로부터의 영향을 크게 받지 않아 저수지의 운영이 좀 더 효율적일 것으로 판단된다.

이동, 용덕 및 미산저수지의 2006년 8월 이후의 결과를 보면 대부분 낮은 저수위를 나타낸다. 이는 지속된 가뭄으로 인해 용덕저수지가 45.7 %, 미산저수지 77.8 %, 이동저수지 41.9 %의 저수위를 보이는데 기인한다. 미산저수지의 경우 전 기간에 걸쳐 관측저수위의 양상을 적절히 모의하였으나 2005년 관개용수 공급 종료일부터 2006년 용수공급 개시일 까지 비관개기 동안 관측저수위가 하강된 것으로 나타났는데 이는 미산저수지의 여수토 보강공사로 인해 저수지 용수를 배출한 것이 원인이다. 용덕저수지의 경우는 2001년을 제외하고 대부분의 기간에서 모의된 저수위가 상당히 낮은 것으로 나타났으며 또한, 관개용수공급 시기와 만수위를 회복하는 시기의 불일치로 미루어 관측저수위의 검토가 요구된다. Table 5는 이동저수지 출구점에서의

관측저수위와 모의저수위의 통계치 분석 결과이다 (Maidment, 1992).

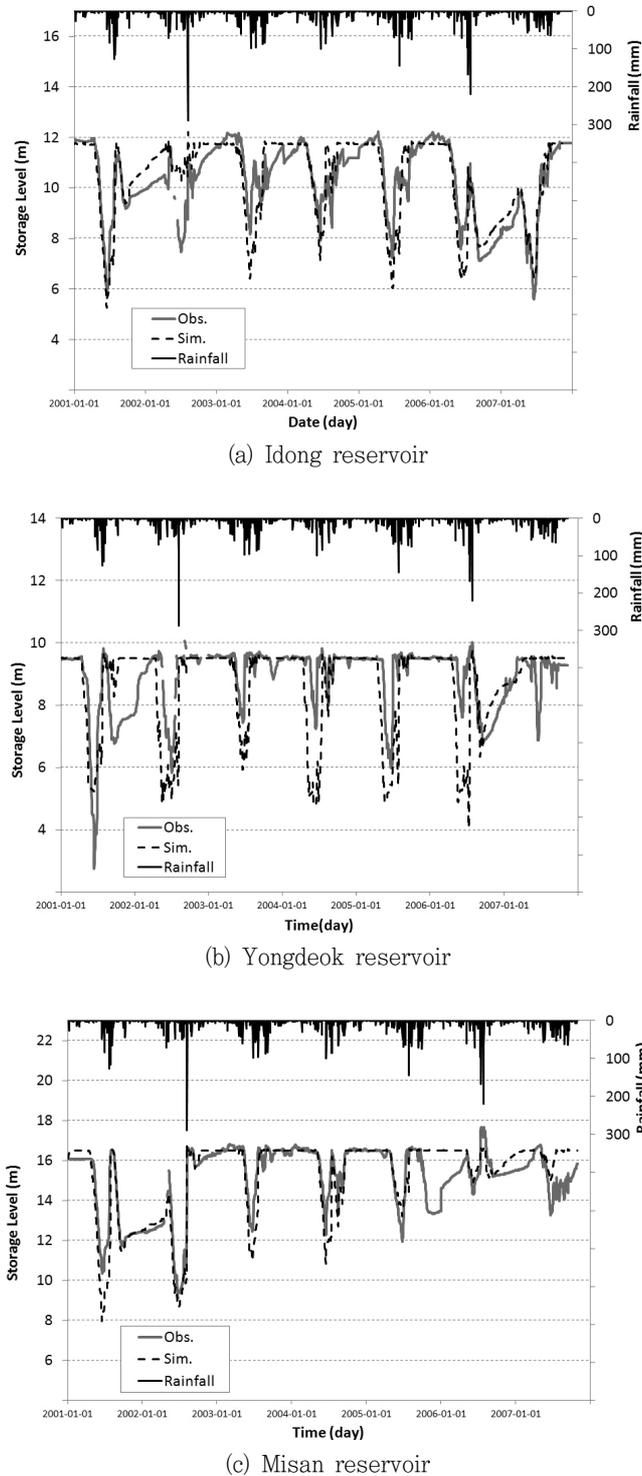


Fig. 11 Observed and simulated water levels for each reservoir

IV. 결 론

본 연구에서는 장기 강우-유출 모형인 CAT 모형을 이용하여 농업용 저수지의 영향을 반영할 수 있도록 시스템을 구성함으로써 소규모 관개용 저수지와 용수공급이 복합적으로 운영되고 있는 전형적인 농촌유역인 이동저수지 상류유역을 대상으로 장기 강우-유출 모의를 수행하였다. 논 유출 해석 및 저수지로부터 관개지구로의 용수공급을 반영한 저수지의 수위를 예측하여 장기 간의 실측 저수위 (2001~2007)와 비교하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. CAT은 기존의 개념적 매개변수 기반의 집중형 수문모형과 물리적 매개변수 기반의 분포형 수문모형의 장점을 최대한 집약하여 개발된 모형으로, 유역의 장·단기적 유출 특성을 정량적으로 평가하고 저류시설 및 침투시설과 같은 물순환 개선시설의 평가 및 효과적인 설계를 지원하기 위한 물순환 해석 모형이다. 특히, 담수 논에서의 유출 과정을 모의할 수 있고 저류시설의 물수지 분석이 가능하다.

2. 이동저수지 유역에 대한 2001년부터 2007년까지의 모의 결과를 이동저수지 출구점에 대하여 세부 수문 요소별로 살펴보면 평균 강우량 1,332 mm에 대하여 증발산, 직접유출, 기저유출의 비율이 각각 49 %, 29 %, 25 %로 나타났고, 총 유출률은 54 %를 보였다. 연간 물수지에서 나타나는 기저유출의 비율이 높은 전형적인 농촌 산지유역의 유출양상을 보이고 있다.

3. 저수위 분석을 위해 2001년부터 2007년까지의 실측 저수위 자료를 이용하였다. 용덕저수지의 경우 유역면적이 12.5 km², 유효저수량이 1,003 천m³으로 유역면적과 유효저수량의 차이가 상당히 커서 유역으로부터 유입량 및 관개수량에 따라 민감하게 변하는 저수위의 양상을 보였다. 반면 미산저수지의 경우는 유역면적이 4.4 km²인데 비하여 유효저수량이 1,698 천m³으로 상류로부터의 영향을 크게 받지 않아 저수지의 운영이 좀 더 효율적일 것으로 판단된다. 또한, 이동저수지 출구점에서 관측저수위와 모의저수위의 통계치를 분석한 결과 Nash-Sutcliffe 모형효율계수는 0.32~0.89로 나타났고, 상관계수 (Correlation coefficient)는 0.73~0.98, 결정계수 (R²)는 0.53~0.95를 나타냈다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의지속적확보기술개발사업단의 연구비지원 (과제번호 : 2-6-3)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Ahn, S. R. G. A. Park, Y. H. Shin and S. J. Kim, 2009.

- Assessment of the Potential Water Supply Rate of Agricultural Irrigation Facilities Using MODSIM : For Geum River Basin. *Journal of Korea Water Resources Association*, 42(10): 825-843 (in Korean).
2. Chow, V. T., D. R. Maidment, and L. W. Mays, 1988. Applied hydrology. McGraw-Hill, Inc., New York, 127-174.
 3. Chu, S. T. 1978. "Infiltration during an Unsteady Rain." *Water Resources Research*, 14(3): 461-466.
 4. Green, W. H. and G. A. Ampt, 1911. "Studies on Soil Physics. Part I . The Flow of Air and Water through Soils." *Journal of Agricultural Sciences*, 4(1): 1-24.
 5. Gyeonggi-Do, 2006. Basic plan for river Manitenance: Jinwi river, 4.13-4.26. Suwon, Gyeonggi (in Korean).
 6. Horton, R. E. 1933. "The role of infiltration in the hydrologic cycle." *American Geophysical Union, Transaction*, 14: 446-460.
 7. Jia, Y., 1997. Interated analysis of water and heat balances in Tokyo metropolis with a distributed model. Ph.D. dissertation, University of Tokyo, Japan.
 8. Jung, I. K., 2010. Development and Application of Soil Moisture and Cell Flow Routing Algorithm of Distributed Rainfall-Runoff Model, Ph. D. dissertation, Konkuk University (in Korean).
 9. Kang, J. H. K. S. Lee, N. I. Kim and M. H. Hwang, 1998. Low Flow Analysis of the Nakdong River Basin by SSARR-8 Model. *Journal of Korea Water Resources Association* 31(1): 71-84 (in Korean).
 10. Kim, D. J., K. W. Park and J. H. Jo, 2008. Analysis of Characteristics for Irrigation Reservoir using SWAT Model. In Proceedings of the *Korea Water Resources Association Conference*, 810-817 (in Korean).
 11. Kim, H. J., S. J. Noh and C. H. Jang, 2009. Development of watershed assessment techniques for healthy water cycle, 130-137. Goyang, Gyeonggi : Korea Institute of Construction Technology (in Korean).
 12. Kim, H. J., S. J. Noh and C. H. Jang, 2011. Development and application of the water cycle analysis model for the urban catchment, 71-174. Goyang, Gyeonggi : Korea Institute of Construction Technology (in Korean).
 13. Kim, N. W., S. C. Shin and Y. S. Won, 2005. Development of SWAT-AGRIMAN model. In Proceedings of the *Korea Water Resources Association Conference*, 65-69 (in Korean).
 14. Kite, G. W., 2000. Using a basin-scale hydrological model to estimate crop transpiration and soil evaporation. *Journal of Hydrology* 229: 59-69.
 15. Kite, G. W., 2001. Modeling the mekong : hydrological simulation for environmental impact studies. *Journal of Hydrology* 253: 1-13.
 16. Lee, H. S., Y. S. Kim, J. R. Yang and D. K. Koh, 2008. Water Balance Analysis at Yongdam Testing Basin. In Proceedings of the *Korea Water Resources Association Conference*, 1884-1888 (in Korean).
 17. Lee, S. J., J. C. Kim and J. W. Noh, 2010. Long Term Runoff Simulation for Water Balance at Daecheong Basin. *Journal of the Environmental Sciences* 19(10): 1211-1217 (in Korean).
 18. Maidment, D. R., 1992. *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, Inc., New York, 127-174.
 19. Mein, R. G. and C. L. Larson, 1973. "Modeling Infiltration during a Steady Rain." *Water Resources Research*, 9(2): 384-394.
 20. Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT), 2001. *SHER User's Manual*, Japan, 3-13.
 21. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM), 2007. Report of Basic groundwater survey projects, 5.3-5.38. Gwacheon, Gyeonggi (in Korean).
 22. Park, M. J., G. A. Park and S. J. Kim, 2007. Analysis of Hydrologic Behavior of SLURP Model Including Agricultural Reservoir Operation, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 27(5B): 515-523 (in Korean).
 23. Ryoo, K. S., M. H. Hwang and Y. S. Yoo, 2007. Optimal Estimation of Water Use for Runoff Simulation in the Large-Scale Basin. In Proceedings of the *Korea Water Resources Association Conference*, 1747-1751 (in Korean).
 24. Shin, H. S. and D. K. Kang, 2006. The Study of the Influence on Long Term Streamflow Caused by Artificial Storage Facilities Based on SWAT Modeling Process. *Journal of Korea Water Resources Association* 39(3): 227-240 (in Korean).
 25. Smith, M., R. G. Allen, L. S. Periera, and D. Raes, 1998. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements, Irrigation and Drainage Paper No. 56*, Food and Agriculture Organization of the United

- Nations, Rome, Italy, 17-64.
26. USACE(US Army Corps of Engineers), 1991. *SSARR User manual*, North Pacific Div., Portland, 1-344.
27. Yong City, 2009. Report of rural groundwater management: Yongnam area, 27-51. Gwacheon, Gyeonggi: Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (in Korean).
28. Yoo, S. H, J. Y. Choi and M. W. Jang, 2005. Estimation of Paddy Crop Coefficients for Penman-Monteith Method, In Proceedings of the *Korean Society of Agricultural Engineers Conference*, 20-25 (in Korean).