



시스템 다이내믹스를 이용한 하수재이용 유역의 일유출량 모의

Modeling Daily Streamflow in Wastewater Reused Watersheds Using System Dynamics

정한석* · 성충현**,† · 박승우***

Jeong, Han Seok · Seong, Chung Hyun · Park, Seung Woo

Abstract

This study presents a system dynamics modeling approach to simulate daily streamflow in a watershed including wastewater treatment plant which contributes to irrigation water supply. The conceptual system dynamics model considering the complex and dynamic hydrological processes in the watershed was developed. The model was calibrated and validated each for two years based on observed flow data. Model performances in terms of E_{NS} , RSR, PBIAS, and R^2 were 0.64, 0.60, -3.6 %, and 0.64 for calibration period, and 0.66, 0.58, -2.6 %, and 0.66 for validation period, respectively, showing an applicability on generating the daily streamflow. System dynamics modeling approach could help better understand the hydrological behavior of the watershed being reused wastewater for agriculture, by providing graphical dynamics of the hydrological processes as well as conventional rainfall-runoff model results.

Keywords: daily streamflow; hydrological model; system dynamics; wastewater reused watershed

1. 서 론

간접하수재이용과 같이 영농환경을 둘러싼 외부요인을 제한할 수 없는 경우에는 모니터링 기술과 함께 모델링 기술을 통한 연구가 필요하다. 하수처리장 방류수를 하천 및 호소 등에 희석하여 관개용수로 사용하는 하수재이용 유역의 수문순환을 이해하기 위해서 수문모델링 기법을 이용할 수 있다. 강수에 따른 유역의 응답반응으로서의 유출을 수학적으로 모형화한 수문모형 (hydrological model)은 특정 시공간에서 발생하는 수문현상을 재현하거나 예측하기 위한 효과적이고 중요한 수문모델링 도구가 될 수 있다 (Her, 2014).

수문모형은 침투유량과 같은 유역의 유출량을 모의하는 간단한 형태에서 오염물질의 물리적 화학적 생물학적 제반과정과 상호작용 등을 수학적으로 추정하기 위한 도구인 수질 모형과 결합하여 유역에서 발생하는 유사량, 화학적 성분, 미

생물 등과 같은 다양한 항목들을 모의할 수 있는 보다 복잡한 형태로 발전되고 있다 (Kim, 2004; Kim, 2009). 이와 같은 통합수문모형은 유역관리계획을 수립하거나 수질 등을 포함하는 수문순환 연구를 가능하게 하는 반면 (Her, 2014), 방대한 입력자료를 필요로 하며, 모형의 모의자체가 다소 어려워지는 경향이 있다 (Li and Simonovic 2002). 또한, 사용자 친화적인 모의환경을 가진 수문모형이 많이 등장하고 있지만 수문시스템 요소간 동태성을 도식적으로 파악할 수 있는 모형은 드물기 때문에 모형의 보정과정에 수문시스템의 합리적 거동보다는 목적함수만을 만족하기 위한 보정이 이루어지는 한계도 있다.

수문현상은 그 자체만으로도 복잡계의 형태를 가지며, 수문시스템을 구성하는 여러 요소들은 서로 상호작용을 통해서 영향을 주고받게 된다 (Khan et al., 2009). 이와 같이 시스템 요소간의 순환적 상호작용과 비선형적 변화과정을 물리적으로 해석하기 위해서 시스템 다이내믹스 (system dynamics)가 소개되었다 (Forrester, 1961). 시스템 다이내믹스는 비교적 단순하게 수문순환 기작을 객체지향적으로 구성할 수 있기 때문에 주변시스템과 결합이 용이하고, 구성된 시스템 요소간의 물리적 동태성을 도식적으로 파악할 수 있는 장점이 있다.

시스템 다이내믹스를 이용한 수문시스템의 해석은 일반적 인 수문모형과 같이 유역의 수문 및 수질을 모의하는 연구가 주를 이루어왔다 (Elshorbagy and Ormsbee, 2006; Venkatesan et al., 2011). Li and Simonovic (2002)은 시스템 다이내믹스를 이용하여 개념적 수문모형을 구성하고, 용설에 따른 홍수

* Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University

** Department of Biological Systems Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University

*** Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +1-540-553-4162 Fax: +1-540-231-3199

E-mail: chseong@vt.edu

Received: August 13, 2014

Revised: October 14, 2014

Accepted: October 20, 2014

예측을 실시하였으며, Khan et al. (2009)은 논에서의 물수지에 따른 지표수 및 지하수의 상호작용을 모의하기 위하여 시스템 다이내믹스를 이용한 물리적 기반의 개념적 물수지 모형을 구성한 바 있다. 해외의 비교적 다양한 연구사례에도 불구하고 수문모델링 기법으로서의 시스템 다이내믹스를 이용한 국내 연구는 매우 제한적으로 이루어졌으며, 특히 하수처리장 방류수와 관개회귀수량을 포함하는 하수재이용 유역에서의 적용성은 검토된 바 없다.

본 연구에서는 수문현상의 동태성을 표현할 수 있는 시스템 다이내믹스를 이용하여 일유출량 모의를 위한 개념적 수문모형 (conceptual hydrological model)을 구성하고, 하수재이용 유역인 오산천 유역을 대상으로 구축한 모형의 적용성을 평가하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 시스템 다이내믹스

시스템 다이내믹스는 Forrester 등의 산업공학자들에 의해 정립된 시스템 해석기법으로 복잡한 현상을 동태적이고 순환적인 인과관계의 시각으로 이해하고 설명하거나, 이러한 이해에 기초한 컴퓨터 모형을 구축하여 복잡한 인과관계로 구성된 현상의 동태적 변화과정을 실험해 보는 방법이다 (Forrester, 1961; Jung and Joo, 2005). 현대사회는 문제가 되는 대상 시스템의 복잡성으로 인해 단선적 사고를 통한 최적

해가 비현실적인 경우가 자주 발생한다 (Shin, 2011). 더군다나 이와 같은 현상은 더욱 심화되어 가고 있기 때문에 문제 해결을 위해서는 피드백구조를 이해하면서 문제의 원인을 시스템 내부에서 찾으려는 시스템 사고를 기반으로 한 시스템 다이내믹스 접근방법이 필요하다 (Jung and Joo, 2005). 시스템 다이내믹스는 컴퓨터상에서 특정 시점의 시스템의 상태를 나타내는 저장변수 (stock variable)와 시스템의 활동을 반영하는 유량변수 (flow variable)로 구성되는 저장-유량 지도 (stock-flow diagram)를 이용하여 수문순환을 모형화할 수 있다. 시스템 다이내믹스와 이를 이용한 모델링기법에 대한 보다 자세한 설명은 Jeong et al. (2013)에서와 같다.

본 연구에서는 시스템 다이내믹스를 구현하기 위해 Vensim DSS (Ventana Systems, 2013)를 이용하였다. Vensim은 VENTANA사에서 개발한 시스템 다이내믹스 시뮬레이션 프로그램으로서 복잡한 동적 시스템을 개념화, 설계, 시뮬레이션, 최적화, 그리고 분석할 수 있는 하나의 통합화된 프레임워크이다 (Kim et al., 2014).

2. 일유출량 모의 모형

시스템 다이내믹스를 이용한 일유출량 모의 모형은 결정론적 총괄형 모형으로 장기 유출 해석을 위하여 개발된 기존의 개념적 모형들과 유사한 구조를 가지고 있다 (Fig. 1). 강수량 중 손실량으로 기인하는 지면저류에서는 증발산과 침투가 발생하고, 침투로 기인하는 토양수분에서는 지표하 유출과

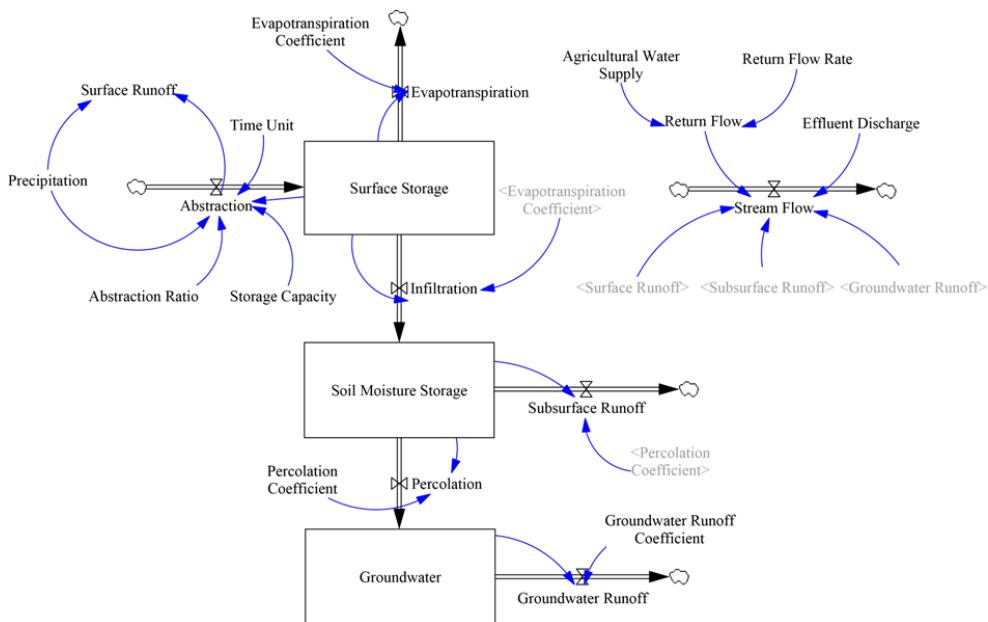


Fig. 1 Established conceptual hydrological model using a system dynamics

침투가 발생하며, 침투로부터 충전되는 지하수에서는 지하수 유출이 발생하는 것으로 모형화하였다.

가. 물수지

일유출량 모의 모형은 유출과정을 지면저류, 토양수, 그리고 지하수 등 3개의 저장변수를 이용하여 단순화하였다. 지면저류를 구성하는 요소는 지면저류량 ($V_{surface}(t)$), 손실량 ($Abs(t)$), 증발산량 ($E(t)$), 그리고 침투량 ($I(t)$) 등이 있으며, 다음과 같이 수식화하였다.

$$V_{surface}(t) = V_{surface}(t-1) + Abs(t) - E(t) - I(t) \quad (1)$$

토양수분은 토양수분량 ($V_{soilmoisture}(t)$), 침투량, 침투량 ($Per(t)$), 그리고 지표하 유출량 ($R_{subsurface}(t)$) 등으로 구성하였다.

$$V_{soilmoisture}(t) = V_{soilmoisture}(t-1) + I(t) - Per(t) - R_{subsurface}(t) \quad (2)$$

지하수 물수지를 구성하는 요소는 지하수량 ($V_{groundwater}(t)$), 침투량, 그리고 지하수 유출량 ($R_{groundwater}(t)$) 등이 있다.

$$V_{groundwater}(t) = V_{groundwater}(t-1) + Per(t) - R_{groundwater}(t) \quad (3)$$

나. 손실량

손실량은 지표면 유출 ($R_{surface}(t)$)로 나타나지 않는 강수량 ($P(t)$)으로, 손실량비 (r_{abs})와 지표저류능 (SC)을 함께 고려함으로써 극한 일유출량을 보다 잘 모의할 수 있도록 다음과 같이 모형화하였다.

$$Abs(t) = r_{abs} \cdot P(t) \quad (4)$$

$$(SC - V_{surface}(t-1)) \geq r_{abs} \cdot P(t)$$

$$Abs(t) = SC - V_{surface}(t-1) \quad (5)$$

$$(SC - V_{surface}(t-1)) < r_{abs} \cdot P(t)$$

손실량은 증발산에 의해서 감소되는 보류 (retention)와 차단 (interception), 유출로 감소되는 저류 (detention)와 토양수분으로의 침투 등으로 구성된다 (Chow et al., 1988). 증발산량은 증발산량 매개변수 (c_{eva})를 고려하여 산정하였으며,

침투량은 지면저류량에서 증발산량을 제외하고 모두 침투되는 것으로 각각 구성하였다.

$$E(t) = c_{eva} \cdot V_{surface}(t) \quad (6)$$

$$I(t) = V_{surface}(t) - E(t) \quad (7)$$

침투는 침투된 물이 중력방향으로 이동하여 지하수로 충전되는 것으로 침투량 매개변수 (c_{per})를 사용하여 토양수분 중 일정부분만 지하수에 기여하는 것으로 다음과 같이 구성하였다.

$$Per(t) = c_{per} \cdot V_{soilmoisture}(t) \quad (8)$$

다. 유출량

하천유출 ($F_{stream}(t)$)은 지표면 유출, 지표하 유출, 지하수 유출, 하수처리장 방류량 ($E_{ww}(t)$), 그리고 관개회귀수량 ($F_{return}(t)$)으로 구성하였다.

$$F_{stream}(t) = R_{surface}(t) + R_{subsurface}(t) + R_{groundwater}(t) + E_{ww}(t) + F_{return}(t) \quad (9)$$

지표면 유출은 초과강수량에 의해서 발생하며, 총강수량에서 손실량을 제외함으로써 산정된다.

$$R_{surface}(t) = P(t) - Abs(t) \quad (10)$$

지표하 유출은 침투된 강수량 중 지하수로 충전되지 않고 신속 또는 지연되어 하천으로 유입되는 유출을 의미하며, 침투량에서 침투량을 제외함으로써 산정된다.

$$R_{subsurface}(t) = I(t) - Per(t) \quad (11)$$

지하수 유출은 충전되는 지하수량에서 대상 구역의 유출에 기여하는 유출량으로 지하수량에 지하수 유출 매개변수 ($c_{gurunoff}$)를 고려하여 다음과 같이 산정하였다.

$$R_{groundwater}(t) = c_{gurunoff} \cdot V_{groundwater}(t) \quad (12)$$

관개회귀수량 ($F_{return}(t)$)은 수원공으로부터 공급된 관개용수 중에서 작물에 의해 소비되지 않고 배수되는 양으로서 물꼬를 넘어 월류하는 지표 배수량과 지하수 충전량 중에서

하천으로 회귀되는 지하수 유출량을 의미한다 (Im, 2000). 유역에 따라 산정되는 관개회귀수량은 차이가 있으며 본 연구에서는 수자원장기종합계획 (MLTM, 2011)에서의 농업용수 회귀율 (r_{rf})을 사용하여 다음과 같이 산정하였다.

$$F_{return}(t) = r_{rf} \cdot S_a(t) \quad (13)$$

3. 대상유역 및 자료구축

오산천 유역은 경기도 중부에 위치하는 안성천의 제2지류로서 유역의 동남쪽으로는 진위천 유역, 서북쪽으로는 황구지천 유역, 그리고 북쪽으로는 기흥저수지 유역과 접하고 있다. 유역의 형상은 비교적 장방형을 이룬 채 남북으로 형성되

어 있으며, 유역면적 98.31 km², 유역길이 16.49 km이다. 오산천 유역은 일 처리용량 140,000 m³의 하수처리장이 유역 중하류에 위치하며 하수처리장 하류 1 km에 위치한 양수장에서 관개용수가 취수되어 논으로 공급되는 간접하수재이용의 영농형태를 보이고 있는 하수재이용 유역이다 (Fig. 2).

기상자료는 대상유역으로부터 북서 방향으로 7 km 정도 떨어져 있는 수원기상대의 자료를 수집하였다. 2010년부터 2013년까지 일별 강수량, 최고기온, 최저기온, 일사량, 평균 풍속, 그리고 상대습도 등을 수문모형의 기상 입력자료로 구축하였다.

수위자료는 국토해양부 한강홍수통제소가 운영하고 있는 탐동 수위관측소 자료를 수집하여 이용하였으며, 유량자료는 탐동 수위관측소에 대한 수위-유량관 계곡선을 이용하여 구축하였다. Fig. 3는 2010년부터 2013년까지 수집된 수위 자료와 강수량 자료를 시계열로 도시한 것이다.

농업용수 공급량 ($S_a(t)$)은 대상유역에서 이루어지는 실제 작부시기를 이용하여 시설관리 손실률 (a) (Song et al., 2013)을 고려한 필요수량 ($WR(t)$)으로부터 다음과 같이 산정하였다.

$$S_a(t) = \frac{WR(t)}{(1-a)} \quad (14)$$

필요수량은 기준작물증발산량 (Allen et al., 1997)과 작물계수 (Yoo et al., 2006)를 이용하여 산정한 논에서의 작물증발산량 ($ET(t)$)과 기존 연구에서 적용된 방법 (Yoo et al., 2008; Yoo et al., 2012)을 이용한 침투량 ($I(t)$)과 유효우량 ($EFR(t)$)으로부터 다음과 같이 산정하였다.

$$WR(t) = ET(t) + I(t) - EFR(t) \quad (15)$$

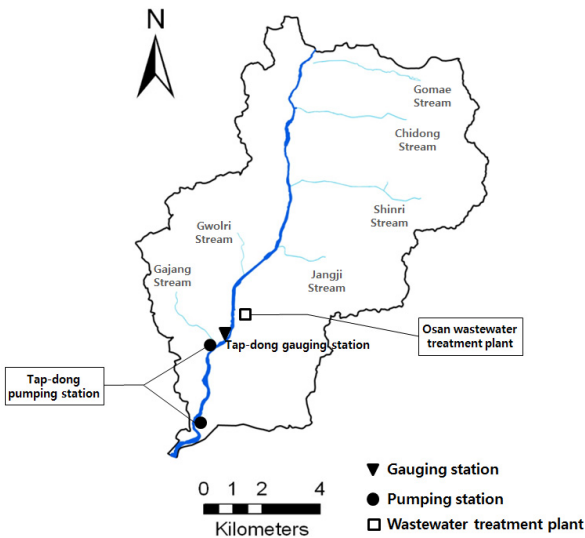


Fig. 2 Osan river watershed and monitoring networks including streamflow gauging station

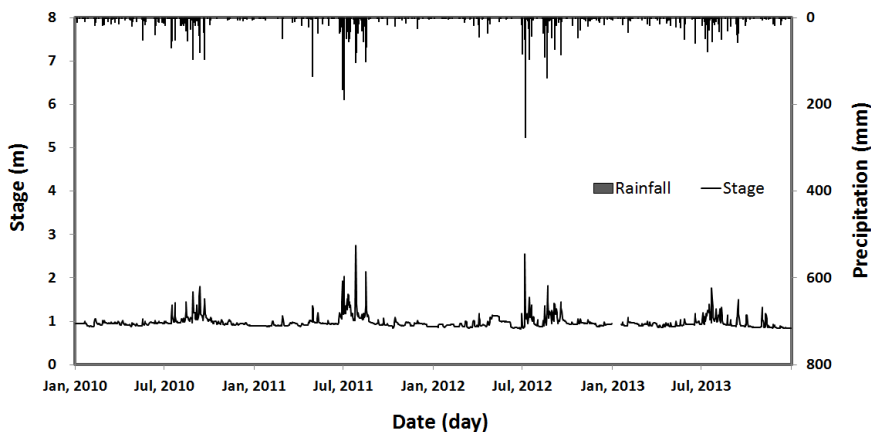


Fig. 3 Daily streamflow stage at the Tap-dong streamflow gauging station

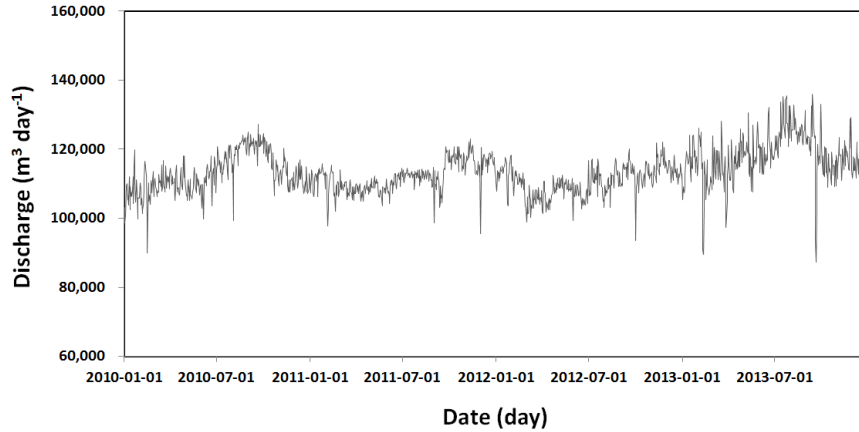


Fig. 4 Daily effluent discharge from the Osan wastewater treatment plant in the study watershed

Table 1 General performance ratings for selected statistics for a monthly time step (adopted from Moriasi et al., 2007)

Performance rating	E_{NS}	RSR	PBIAS (%)
			Streamflow
Very good	$0.75 < E_{NS} \leq 1.00$	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$ PBIAS < 10$
Good	$0.65 < E_{NS} \leq 0.75$	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$10 \leq PBIAS < 15$
Satisfactory	$0.50 < E_{NS} \leq 0.65$	$0.60 < E_{NS} \leq 0.70$	$15 \leq PBIAS < 25$
Unsatisfactory	$E_{NS} \leq 0.50$	$E_{NS} > 0.70$	$ PBIAS \geq 25$

대상유역 내 오산하수처리장으로부터 자료기간 2010년부터 2013년까지의 일방류량을 수득하여 본 연구에 활용하였다. 오산하수처리장은 일 평균 113,000 m³의 방류량을 기록하고 있으며, 우수배수량이 많은 여름철에 하수처리장 방류량이 증가하고 봄과 겨울철에는 상대적으로 방류량이 적은 것으로 나타났다 (Fig. 4).

4. 모형의 평가

모형의 평가는 Nash-Sutcliffe 효율계수 (Nash-Sutcliffe efficiency, E_{NS}), RSR (root mean square error-observations standard deviation ratio), 백분율 편차 (percent bias, PBIAS), 그리고 결정계수 (coefficient of determination, R^2) 등의 통계적인 변량을 사용하였다 (Table 1).

E_{NS} (Nash and Sutcliffe, 1970)는 $-\infty$ 에서 1사이의 값을 가지며, 0에서 1사이의 값은 일반적으로 구축한 모형의 적용성이 있는 것으로 판단되고, 1에 가까울수록 모의치가 실측치를 잘 반영하는 것을 의미한다. 반면 0보다 작은 값은 실측치의 평균값을 이용하는 것이 모의 결과를 이용하는 것보다 더 좋은 결과를 얻을 수 있는 것을 의미한다. E_{NS} 는 다음 수식으로 표현된다.

$$E_{NS} = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \overline{Y^{obs}})^2 \right]} \quad (16)$$

여기서, Y_i^{obs} 는 i 번째 실측치, Y_i^{sim} i 번째 모의치, 그리고 $\overline{Y^{obs}}$ 는 실측치의 평균치를 의미한다.

RSR (Moriasi et al., 2007)은 평균 제곱근 오차 (RMSE, root mean square error)와 실측치의 표준편차의 비를 의미하며, 오차의 값을 정량적으로 나타내기 위한 RMSE 값의 정도를 표준화한 것이다. RSR 값이 0이면 모의치가 실측치를 완벽하게 모의하는 것이며, 0에 가까운 값을 보일수록 모형의 적용성이 좋은 것을 의미한다. RSR은 다음 수식으로 표현된다.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \overline{Y^{obs}})^2} \right]} \quad (17)$$

여기서, $STDEV_{obs}$ 는 실측치의 표준편차를 의미한다.

Table 2 List of calibrated parameters of hydrological systems for monthly evapotranspiration, streamflow, and groundwater level for the study watershed

Parameters	Description	Range	Calibrated value	Unit
r_{abs}	Abstraction ratio	0 ~ 1	0.60	-
SC	Storage capacity	-	7200	$10^3 m^3$
c_{per}	Percolation coefficient	0 ~ 1	0.10	day^{-1}
c_{eva}	Evapotranspiration coefficient		0.36	
$c_{gwrnoff}$	Groundwater runoff coefficient		0.95	

Table 3 Model performance evaluation measures on daily streamflow for the entire simulation period (2010~2013)

Period	Rainfall (mm)	Streamflow (mm)		E_{NS}	RSR	PBIAS (%)	R^2
		Observed	Simulated				
2010-2011	3446.5	4186.9	4035.6	0.64	0.60	-3.6	0.64
2012-2013	2990.4	3728.1	3631.0	0.66	0.58	-2.6	0.66

PBIAS는 모의치의 실측치 대비 과대 또는 과소 추정 등의 평균적인 경향을 의미하며 최적값은 0이다. PBIAS 값이 낮을수록 모형의 모의가 정확함을 나타내며, 다음 식으로 표현된다.

$$PBIAS = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \times 100 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs}) \right]} \quad (18)$$

일반적으로 모형의 모의결과를 시간간격이 짧을수록 실측치를 잘 반영하지 못하기 때문에 (Engel et al., 2007), E_{NS} , PSR, 그리고 PBIAS 등의 통계변량에 대한 모형의 적합성은 Moriasi et al. (2007)이 월단위 모의에 대해서 제안한 기준을 준용하였다. 또한, R^2 의 경우, 0.5 이상의 값을 보일 경우에는 모형이 실측치를 잘 반영하는 것으로 판단하였다 (Santhi et al., 2006).

III. 결과 및 고찰

1. 모형의 보정

실측자료를 구축한 2010년부터 2013년의 전체 모의기간 중 2010년부터 2011년까지를 보정기간으로, 2012년부터 2013년까지를 검정기간으로 설정하고, 2008년부터 모의함으로써 모형의 초기값에 따른 영향을 최소화하였다. 모형의 보정은 단순시행착오법을 사용하여 E_{NS} 와 RSR, 그리고 PBIAS를 목적함수로 일유출량에 대한 매개변수를 최적화하였다.

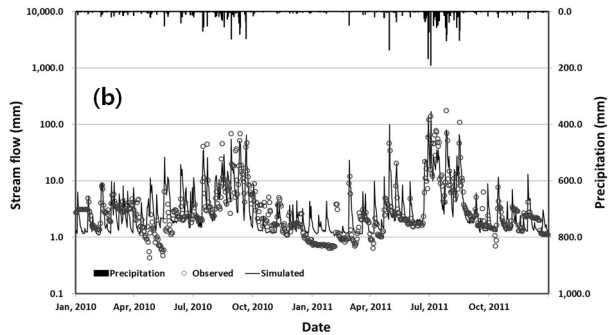
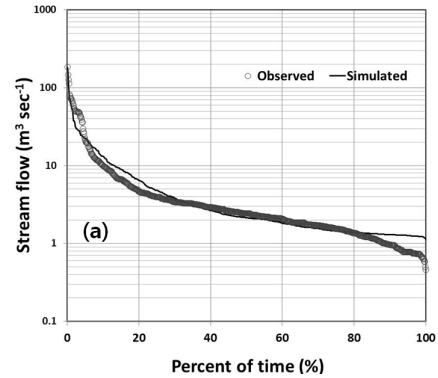


Fig. 5 Observed and simulated (a) flow duration curves and (b) daily streamflow for the calibration period (2010~2011)

2010년과 2011년의 유출량 자료를 이용하여 모형의 r_{abs} , SC , c_{per} , c_{eva} , 그리고 $c_{gwrnoff}$ 등의 매개변수를 보정하였다 (Table 2). 일유출량에 대해 보정한 결과 E_{NS} 는 0.64, RSR은 0.60, PBIAS는 -3.6%, 그리고 R^2 는 0.64로, 모의 유출량이 실측 유출량을 비교적 잘 모의하는 것으로 분석되었다 (Table 3)

(Moriassi et al., 2007).

모형의 적합성은 통계적 변량을 사용하는 것도 중요하지만 모의치와 실측치의 비교 그림을 통해서도 파악할 수 있다. 보정기간에 대한 유허곡선을 통해서 모의 유출량은 고수위에서는 실측 유출량을 비교적 잘 반영하는 것으로 나타났으나, 저수위에서는 다소 차이를 보였다. 보정기간 동안 강수량에 따른 유출량의 실측치와 모의치의 변화를 통해 모형의 강우-유출 응답반응이 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다 (Fig. 5).

2. 모형의 검정

보정된 매개변수를 이용하여 모형의 유출량에 대한 검정 결과, E_{NS} 는 0.66, RSR은 0.58, PBIAS는 -2.6 %, 그리고 R^2 는 0.66으로, 모의 유출량이 실측 유출량을 비교적 잘 모의하는 것으로 분석되었다 (Table 3) (Moriassi et al., 2007). 검정 기간에 대한 유허곡선을 통해서 보정기간에서와 같이 모의 유출량은 고수위에서는 실측 유출량을 비교적 잘 반영하는 것으로 분석되었으나 저수위에서는 다소 차이를 보였으며, 검정기간 동안 모형의 모의 일유출량이 실측치의 강우-유출 응답반응을 잘 반영하는 것으로 나타났다 (Fig. 6).

3. 모형의 동태적 이해

보정된 매개변수를 반영한 모형은 강우에 따른 수문시스템의 전체적 반응을 도식적으로 표현함으로써 직관적인 이해를 가능하게 한다 (Fig. 7). 이와 같은 도식적 표현은 물리적

수문순환에 영향을 주는 차단, 침투, 그리고 증발산 등의 변화에 따라 수문시스템 전체의 변화과정을 보다 쉽게 이해할 수 있도록 한다.

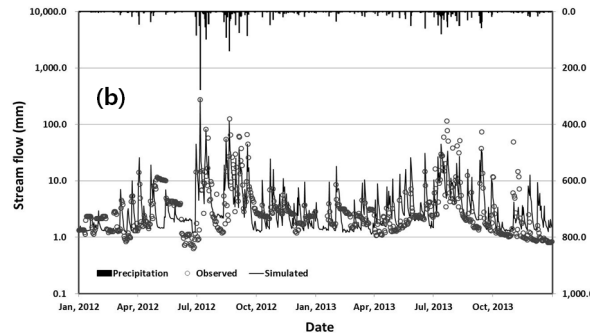
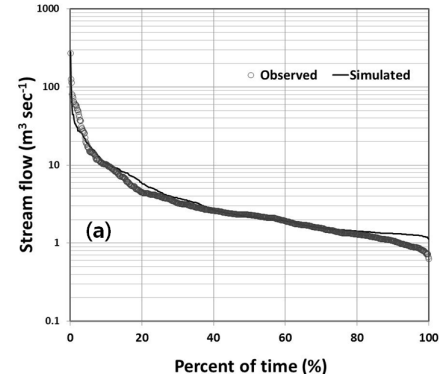


Fig. 6 Observed and simulated (a) flow duration curves and (b) daily streamflow for the validation period (2012~2013)

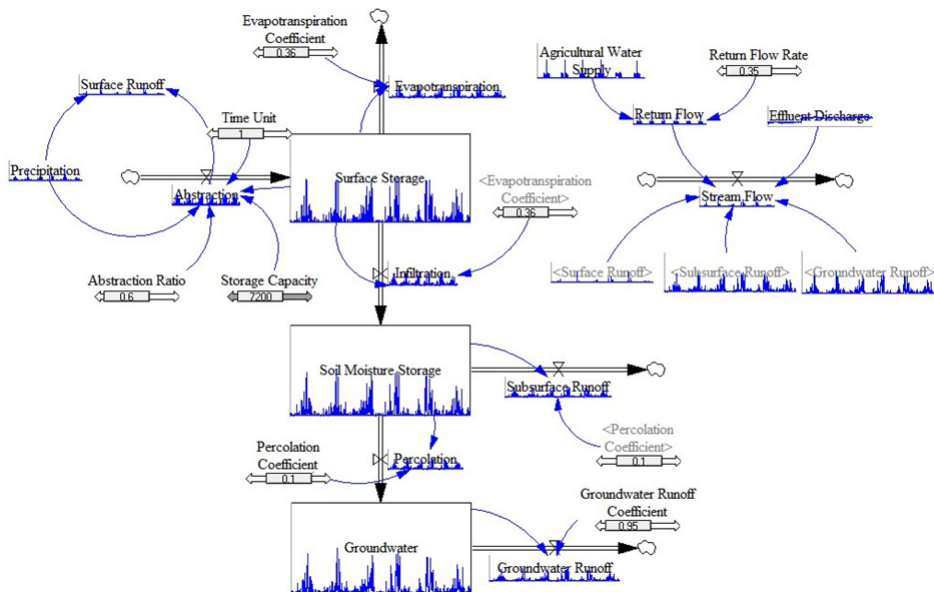


Fig. 7 Dynamics in the established conceptual hydrological model

예를 들어 토지이용 및 피복 변화에 따른 대상유역의 거동을 해석하기 위해 본 연구에서 구축한 모형에서 차단의 정도를 표현하는 차단비 (Abstraction Ratio)를 변화시키면 일반적인 수문모형에서의 목적함수가 되는 유출량의 변화만 결과적으로 해석할 수 있는 것이 아니라, 수문시스템 전체의 시간에 따른 변화를 도식적으로 한 눈에 확인할 수 있게 된다.

수문모형의 일반적인 보정 및 검증과정은 통계치를 이용한 목적함수의 최적화에 의해 실제 수문현상이 왜곡될 수 있으며, 이에 따라 수문시스템의 도식적인 적합성도 검증할 필요가 있다 (Moriassi et al., 2007). 시스템 다이내믹스를 이용한 수문모델링은 수문현상을 대변하는 모형 매개변수의 변화에 따른 수문시스템 전체의 거동을 도식적으로 쉽게 파악할 수 있기 때문에 일반적인 수문모델링보다 합리적이 모형의 평가가 가능하다.

시스템 다이내믹스를 이용한 개념적 수문모형은 본 연구에서처럼 연구자의 수문순환에 대한 이해와 관심을 반영하여 객체지향적으로 수문시스템을 구성할 수 있다. Ghashghaei et al., (2013)은 융설작용에 중점을 둔 유출과정을 시스템 다이내믹스를 이용하여 모형화한 바 있다. 또한, 수문순환뿐만 아니라 수문시스템과 연계된 인구, 토지이용 변화, 영농활동, 그리고 수자원 정책 등을 함께 모형화함으로써 수환경을 둘러싼 환경 변화에 따른 수문시스템의 거동을 이해할 수 있기 때문에 (Ryu et al., 2012; Wei et al., 2012; Ozturk et al., 2013), 향후 수문 및 수자원 연구에 유용한 접근방법이 될 수 있을 것이다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 하수재이용 유역에서의 일유출량을 모의하기 위해 시스템 다이내믹스를 이용하여 개념적 수문모형을 구축하고, 기상자료 및 수문자료를 이용하여 구축한 모형의 적용성을 평가하였다.

하수처리수를 농업용수로 간접재이용하고 있는 오산천 유역을 대상으로 하수처리장 방류수와 관개회귀수량을 고려한 일유출량을 모의하기 위해 강수량, 최고기온, 최저기온, 평균 풍속 등의 기상자료와 수위 및 유량자료, 하수처리장 방류량 자료, 그리고 농업용수 공급량 등을 포함하는 입력자료를 구축하였으며, 수문순환의 특성을 반영한 방정식과 유역단위 물수지를 이용하여 하수재이용 유역의 일유출량을 모형화하고, 시스템 다이내믹스를 이용하여 개념적 수문모형을 구축하였다. 구축한 수문모형을 일유출량에 대해 보정한 결과 E_{NS} 는 0.64, RSR은 0.60, PBIAS는 -3.6%, 그리고 R^2 는 0.64로 분석되었으며, 검증기간 동안 E_{NS} 는 0.66, RSR은 0.58,

PBIAS는 -2.6%, 그리고 R^2 는 0.66으로 나타남에 따라 시스템 다이내믹스를 이용한 일유출량 모의 모형이 하수재이용 유역에 대해 적용성이 있는 것으로 평가되었다.

시스템 다이내믹스를 이용한 수문모형은 수문시스템의 동태성을 도식적으로 파악할 수 있기 때문에 모형 매개변수의 변화에 따른 수문시스템의 거동을 직관적으로 이해할 수 있을 뿐만 아니라 보다 합리적이 모형의 보정을 가능하게 한다. 또한, 수문시스템과 연계된 시스템의 모형화를 통해 수환경을 둘러싼 환경 변화에 따른 수문시스템의 거동을 이해할 수 있는 대안적 모델링 기법으로 고려될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 농림수산식품기술기획평가원의 “하수처리수의 농업용수 간접재이용시스템 개발과 적용” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
2. Chow, V. T., D. R. Maidment, and L. W. Mays, 1988. *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.
3. Elshorbagy, A., and L. Ormsbee, 2006. Object-oriented modeling approach to surface water quality management. *Environmental Modeling & Software* 21: 689-698.
4. Engel, B., D. Storm, M. White, J. Arnold, and M. Arabi, 2007. A hydrologic/water quality model application protocol. *Journal of American Water Resources Association* 43: 1223-1236.
5. Forrester, J., 1961. *Industrial Dynamics*. Cambridge, MA: The MIT Press.
6. Ghashghaei, M., A. Bagheri, and S. Morid, 2013. Rainfall-runoff modeling in a watershed scale using an object oriented approach based on the concepts of system dynamics. *Water Resources Management* 27: 5119-5141.
7. Her, Y. G., 2014. The research trends and applications of the distributed hydrological model. *Rural Resources* 56(2): 43-51 (in Korean).
8. Im, S. J., 2000. Modeling irrigation return flow from paddy fields on agricultural watersheds. Ph.D. diss., Seoul, Ind.: Seoul National University (in Korean).
9. Jeong H. S., K. Suh, T. I. Jang, C. H. Seong, H. K. Kim, and S.

- W. Park, 2013. Economic analysis of wastewater reuse systems for agricultural irrigation using a system dynamics approach. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(2): 9-20 (in Korean).
10. Jung, S. H., and Y. J. Joo, 2005. A study on the analysis of policy effects for system dynamics methodology: focusing on the sex trade special law. *Korean Public Administration Review* 39(1): 219-236 (in Korean).
 11. Khan, S., L. Yufeng, and A. Ahmad, 2009. Analysing complex behaviour of hydrological systems through a system dynamics approach. *Environmental Modeling & Software* 24: 1363-1372.
 12. Kim, H. K., 2009. Modeling hydrologic and water quality effects of impervious surfaces in farm and urban watersheds. Ph.D. diss., Seoul, Ind.: Seoul National University (in Korean).
 13. Kim, K. C., K. Y. Jung, and S. W. Kim, 2014. *System Dynamics with Vensim*. Seoul: Seoul Geongje Gyeongyoung (in Korean).
 14. Kim, S. M., 2004. Analysis of wastewater reuse effects on TMDL using nonpoint source pollution models. Ph.D. diss., Seoul, Ind.: Seoul National University (in Korean).
 15. Li, L., and S. P. Simonovic, 2002. System dynamics model for predicting floods from snowmelt in north american prairie watersheds. *Hydrological Processes* 16: 2645-2666.
 16. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM), 2011. Long-term plans for water resources (2011-2020). Gwacheon, Korea (in Korean).
 17. Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3): 885-900.
 18. Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3): 282-290.
 19. Ozturk, M., N. K. Copty, A. K. Saysel, 2013. Modeling the impact of land use change on the hydrology of a rural watershed. *Journal of Hydrology* 497: 97-109.
 20. Ryu H. J., B. Contor, G. Johnson, R. Allen, and J. Tracy, 2012. System dynamics to sustainable water resources management in the eastern snake plain aquifer under water supply uncertainty. *Journal of the American Water Resources Association* 48(6): 1204-1220.
 21. Santhi, C., R. Srinivasan, J. Arnold, and J. Williams, 2006. A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in a watershed in Texas. *Environmental Modeling & Software* 21: 1141-1157.
 22. Shin, D., 2011. Value proposition modelling and analysis for business models of product-service systems using system dynamics. Master's thesis, Seoul, Ind.: Seoul National University (in Korean).
 23. Song, J. H., M. S. Kang, I. Song, S. H. Hwang, J. Park, and J. H. Ahn, 2013. Surface drainage simulation model for irrigation districts composed of paddy and protected cultivation. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(3): 63-73 (in Korean).
 24. Venkatesan, A. K., S. Ahmad, W. Johnson, and J. R. Batista, 2011. Systems dynamic model to forecast salinity load to the Colorado River due to urbanization within the Las Vegas Valley. *Science of the Total Environment*: 2616-2625.
 25. Ventana Systems, 2013. *Vensim User's Guide Version 6*. Harvard, MA: VENTANA Systems Inc.
 26. Wei, S., H. Yang, J. Song, K. C. Abbaspour, and Z. Xu, 2012. System dynamics simulation model for assessing socio-economic impacts of different levels of environmental flow allocation in the Weihe River Basin, China. *European Journal of Operational Research* 221(1): 248-262.
 27. Yoo, S. H., J. Y. Choi, and M. W. Jang, 2008. Estimation of design water requirement using FAO Penman-Monteith and optimal probability distribution function in South Korea. *Agricultural Water Management* 95: 845-853.
 28. Yoo, S. H., J. Y. Choi, W. H. Nam, and E. M. Hong, 2012. Analysis of design water requirement of paddy rice using frequency analysis affected by climate change in South Korea. *Agricultural Water Management* 112: 33-42.
 29. Yoo, S. H., J. Y. Choi, and M. W. Jang, 2006. Estimation of paddy rice crop coefficients for FAO Penman-Monteith and Modified Penman method. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 48(1): 13-23 (in Korean).