



농업용 저수지와 논 경작을 고려한 HSPF-MASA-CREAMS-PADDY 연계 시스템 개발

Integrating the Mechanisms of Agricultural Reservoir and Paddy Cultivation to the
HSPF-MASA-CREAMS-PADDY System

이도길^a · 송정현^b · 류정훈^c · 이재남^d · 최순군^e · 강문성^{f, †}

Lee, Do Gil · Song, Jung-Hun · Ryu, Jeong Hoon · Lee, Jaenam · Choi, Soon-Kun · Kang, Moon Seong

Abstract

The objectives of this study were to develop a system linking hydrologic and water quality models considering the mechanisms of agricultural reservoir and paddy cultivation and to evaluate whether the developed system simulates hydrologic and water quality processes better than a hydrologic model that do not consider the mechanisms. The system consisted of Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF) as a watershed model, Module-based hydrologic Analysis System for Agricultural watersheds (MASA) as reservoir water balance model, and Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management System-Paddy (CREAMS-PADDY) as a hydrologic and water quality model for paddy fields. This study carried out on the Seolseong-Cheon watershed in Icheon, and the water level and water quality had been monitored for two years at the outlet of the watershed. According to the results of this study, the performance of the simulation using HSPF-MASA-CREAMS-PADDY system was better than others, but they did not show a statistically significant difference. This seemed to be due to the uncertainty of the farming data and the water quality data of the reservoir. Therefore, if accurate input data for the system is obtained, HSPF-MASA-CREAMS-PADDY system could be used to model an agricultural watershed to obtain more realistic results. The results of this study could be utilized to the modeling of agricultural watersheds in Korea where paddy rice cultivation is dominant.

Keywords: Agricultural reservoir; agricultural watershed; integrated system; paddy

1. 서론

농업용 저수지는 2015년을 기준으로 전국에 17,310 개소가 존재하며, 전체 농업용수의 약 60%를 공급하고 있다 (Kim et al., 2005; Korea Rural Community Corporation (KRC), 2016). 농업용 저수지는 농업용수 공급 이외에도 홍수나 가뭄

등의 극한사상의 방지, 하천유지용수 방류로 인한 하천건천화 방지, 친수환경 제공 등의 기능을 가진다. 최근에는 농업용수 공급 외 농업용 저수지의 다양한 기능이 부각됨에 따라 정부에서는 관리저수지를 지정하는 등 수질을 집중적으로 관리하고 있으나, 농업용 저수지의 수질은 좋지 않은 실정이다. 환경부 (Ministry of Environment, ME) (2014)에 따르면, 농업용수 수질측정망 815 개소 중 138 개소 저수지는 농업용수 수질 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났으며, 저수지로 부터 방류되는 방류수로 인해 하류 하천의 수질이 악화될 수 있다는 연구 결과가 도출된 바 있다 (Kim and Kim, 2016). 따라서, 농업용 저수지는 농촌 유역의 수문순환 및 수질을 분석하는 데 있어 반드시 고려해야할 요소이다.

논 또한 농촌 유역의 수문 순환 및 수질 해석에 있어 중요 인자이다. 논이 침수 현상은 강우시에 유출량을 감소시키는 효과가 있으며, 낙수, 배수 등 영농 활동에 따라 유출을 발생시키기도 한다. 따라서 논이 많은 유역의 경우, 영농 활동이 유역의 수문 현상에 영향을 미칠 수 있다 (Jeong and Jeon, 2012). 뿐만 아니라 작물 생장에 필요한 거름이나 비료를 살포함에 따라 논으로부터 배출되는 비점오염은 농촌 유역의 수질에도 영향을 미친다. 따라서 농촌 유역의 수문·수질 모델

^a Researcher, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

^b Research scholar, Department of Agricultural and Biological Engineering & Tropical Research and Education Center, University of Florida

^c Senior, Division of Solution Development, ECMiner Company Limited

^d Associate Researcher, Water Resources & Environment Research Group, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

^e Researcher, Climate Change and Agroecology Division, National Institute of Agricultural Science

^f Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4582 Fax: +82-2-873-2087

E-mail: mksang@snu.ac.kr

Received: January 24, 2018

Revised: September 17, 2018

Accepted: September 17, 2018

링에 있어 논에서의 수문기작 및 영농활동은 반드시 고려해야 한다.

기존 연구에서는 기초 자료의 부족, 모의의 복잡성 등으로 인해 농업용 저수지나 영농 활동을 고려하지 않고 유역의 수문 현상을 모의하였다. 하지만 강우가 특정 기간에 집중되는 우리나라에서 저수지의 저류 및 방류 능력으로 인해 농업용 저수지가 수문 순환에 있어 중요한 인자로 인식됨에 따라 (Chung and Kim, 2007), 최근에는 농업용 저수지를 모의에 포함하는 연구가 일부 수행된 바 있다. Park et al. (2007)은 안성천 유역에서 저수지, 댐, 조절장치 및 관개계획에 의한 효과를 고려하여 수문 순환을 모의하는 물리적 모형인 SLURP (Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes) 모형을 이용하여 농업용 저수지가 하천 유출량에 미치는 영향을 분석한 바 있다. Lee et al. (2008)은 안성천 유역에 대하여 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용하여 금광 저수지 및 고삼 저수지 등 농업용 저수지의 유무에 따른 유역 물수지 및 하천 유출량을 모의하여 농업용 저수지가 하류에 미치는 수문학적 영향을 분석하였다. Song et al. (2013)은 논과 시설재배지 등으로 이루어진 복합영농 관개지구에서의 수문 순환을 추정하는 모형을 개발하였으며, 이를 이동저수지 관개지구에 적용하여 물수지를 분석함으로써 적용성을 평가한 바 있다. Kim and Kim (2016)은 농업용 저수지인 봉현 저수지 및 봉현천을 대상으로 QUAL2K 모형을 이용하여 농업용 저수지의 방류에 따른 하류하천에서의 수질 변화를 모의한 바 있다. 또한 Jeon et al. (2007)은 HSPF 모형에 논 의 수문 및 수질 기작을 모의할 수 있는 모듈을 추가한 모형인

HSPF-Paddy 모형을 개발하고 새만금 유역을 대상으로 적용성을 평가한 바 있다. 하지만 유역 단위에서 농업용 저수지와 논에서의 영농 활동을 복합적으로 고려한 연구는 아직 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 농업용 저수지 및 논 의 기작을 반영한 저수지 물수지 모형, 포장단위 수문·수질 모형, 유역단위 수문·수질 모형을 연계한 시스템을 구성하여 유역말단에서의 유량과 수질을 모의하고, 이를 저수지와 논 기작을 반영하지 않은 수문·수질 모의 결과와 비교하여 농업용 저수지 및 논이 농촌유역의 수문·수질에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

II. 재료 및 방법

본 연구의 순서도는 Fig. 1과 같다. 유역 모형, 저수지 물수지 모형, 포장 단위 모형을 연계한 시스템을 구축하였다. 유역 모형은 HSPF (Hydrological Simulation Program - FORTRAN) (Bicknell et al., 1996), 저수지 물수지 모형은 MASA (Module-based hydrologic Analysis System for Agricultural watersheds) (Song, 2017), 포장 단위 수문·수질 모형은 CREAMS-PADDY (Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management System - PADDY) (Chin, 1998; Seo, 2001; Chin et al., 2002)를 적용하였다. 지형학적 자료, 기상자료, 영농자료, 저수지 관련 자료 등 시스템의 입력 자료를 수집하여 데이터베이스를 구축하고, 시스템을 이용하여 유량과 수질에 대하여 모의를 수행하였다. 시스템을 적용하여 모의

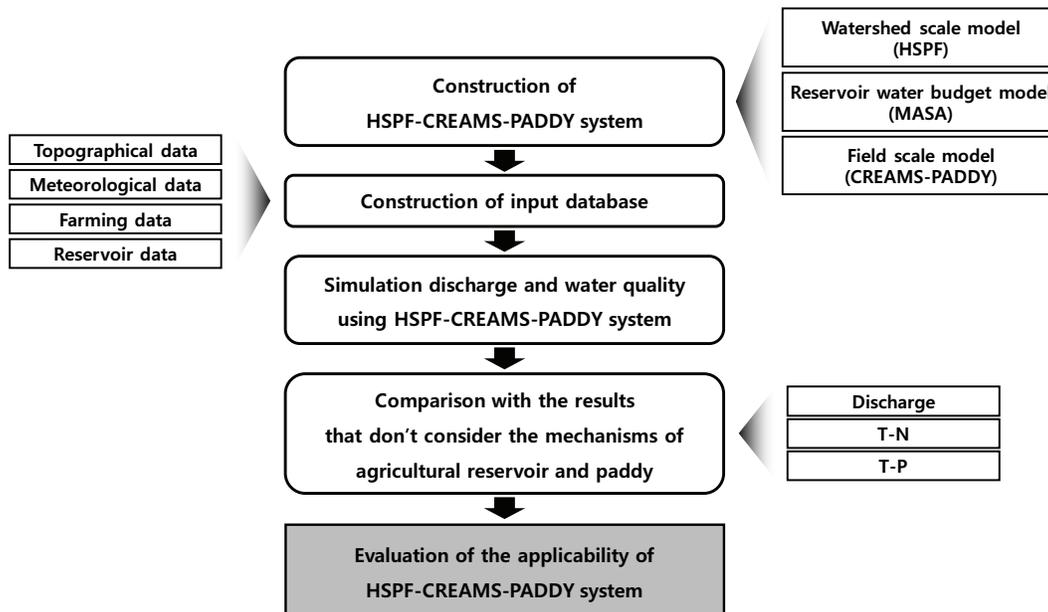


Fig. 1 Schematic diagram of this study

한 결과를 농업용 저수지와 논 기작을 고려하지 않고 모의하였을 때의 결과와 비교분석을 수행하여 시스템의 적용성을 평가하였다.

1. HSPF-MASA-CREAMS-PADDY 연계 시스템 구축
가. HSPF

HSPF 모형은 개념적 준분포형 모형으로써, 수문과 수질 현상을 모의할 수 있다. 최소 1분부터 최대 1일의 시간 간격으로 몇 분에서 몇 백 년 까지 다양한 기간에 대해 모의가 가능하며, 공간적인 범위 역시 수 ha의 포장부터 수십 만 km²에 이르는 유역까지 다양하게 적용되어 왔다. 다양한 모의 항목과 시공간적 범위로 인해 수많은 입력 자료가 필요하지만, HSPF의 모의 모듈은 시계열 자료가 저장되어 있는 WDM 파일로부터 자료를 입력받고, 모의 결과를 다시 WDM 파일에 저장함으로써 자료의 관리가 용이하다는 특징이 있다. 일반적으로 HSPF 모형에서는 담수 논 영농 기작을 고려하지 않으나, 본 연구에서는 담수 논에서의 영농활동을 고려하기 위해 CREAMS-PADDY 모형을 연계하여 모의를 수행하였다.

나. MASA

MASA는 Song (2017)이 Simulink를 기반으로 개발한 모듈 기반 농업유역 수문해석 시스템으로, 독립된 모듈들의 조합,

분해, 제거 및 교체를 통한 모델링 시스템의 구성을 도모하였다. MASA는 유역 증발산량 모듈, 유역 유출량 모듈, 관개지구 해석 모듈, 저수지 물수지 모듈, 농업 수문요소 합성 모듈, 다중목적 최적화 모듈 등으로 구성되어 있으며, 이를 통해 증발산량, 유출량, 필요수량, 포장배수량, 농업용수 공급량, 물넘이 방류량 등을 모의할 수 있다.

다. CREAMS-PADDY

CREAMS-PADDY 모형은 Chin (1998)과 Seo et al. (2001)이 개발한 모형으로, 포장규모에서 장기간의 유출량, 유사량 및 화학물질에 대한 모의를 할 수 있는 모형인 CREAMS 모형에 논에서의 기작을 추가한 모형이다. 담수상태에서의 물질 운송기작을 포함하였으며, 영양물질 반응식 역시 담수 환원 조건에 맞도록 개선되었다 (Chin et al., 2002; Seo et al., 2001).

라. HSPF-MASA-CREAMS-PADDY 연계 시스템 구성

본 연구에서는 농업용 저수지와 논 기작을 고려한 수문·수질 모의를 수행하기 위해 유역 모형인 HSPF, 저수지 물수지 모형인 MASA, 포장 단위 수문·수질 모형인 CREAMS-PADDY를 연계한 HSPF-MASA-CREAMS-PADDY 시스템을 구축하였다. 구축된 HSPF-MASA-CREAMS-PADDY 시스템의 구성은 Fig. 2와 같다.

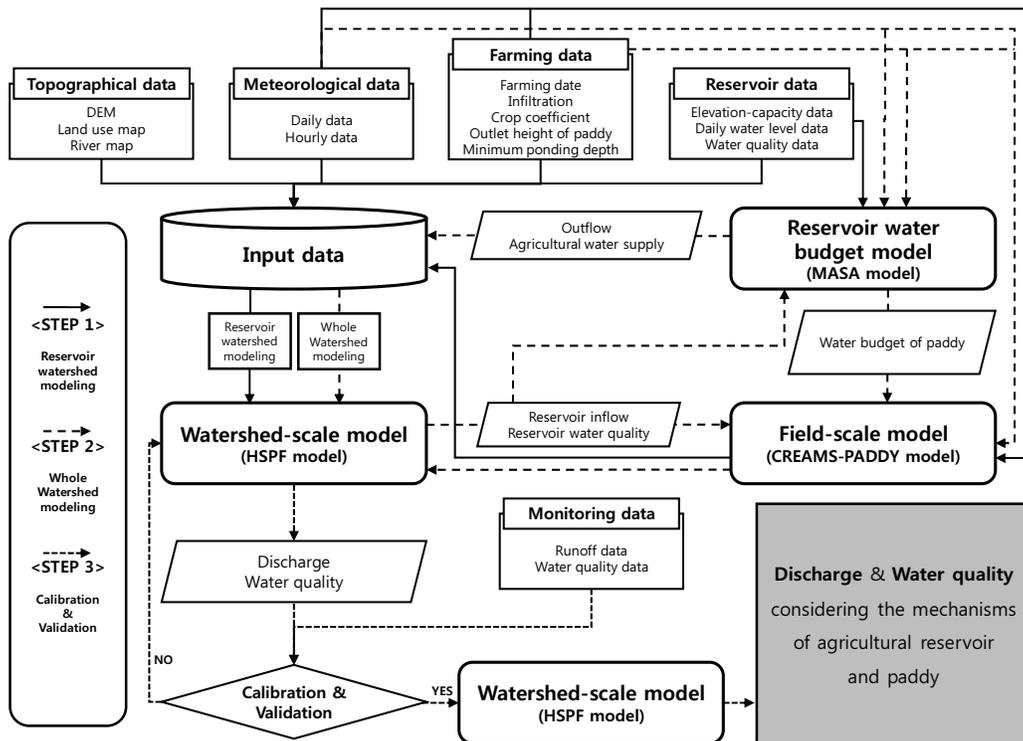


Fig. 2 Schematic diagram of HSPF-MASA-CREAMS-PADDY system

먼저, HSPF, MASA, CREAMS-PADDY 모형의 구동에 필요한 입력자료를 수집하여 데이터베이스를 구축하였다. HSPF 모형과 CREAMS-PADDY 모형을 이용하여 저수지 상류에 대한 모의를 수행하여 저수지 유입수의 유량과 수질을 산정하였다. 이 때 모의된 수질은 동일한 날짜의 관개수 및 물넘이 월류수의 수질로 설정하였다. 모의된 저수지 유입량과 영농자료, 기상자료 등을 이용하여 저수지 물수지 모형인 MASA 모형을 통해 물넘이 방류량, 농업용수 공급량, 그리고 포장배수량을 모의하였다. MASA 모의 결과와 HSPF로부터 모의된 수질, 그리고 수집한 영농 자료를 이용하여 CREAMS-PADDY 모형을 통해 논에서 배출되는 오염물질 농도를 산정하였다. 이후, MASA 모형을 통해 모의된 저수지의 물넘이 방류량 및 농업용수 공급량, 포장배수량과 CREAMS-PADDY 모형을 통해 모의된 논으로부터의 수질을 HSPF 모형에 적용하여 유량과 수질을 모의하였다. 마지막으로 유역 말단에서 모니터링한 실측자료를 이용해 보·검정을 수행하여 농업용 저수지와 논 기작을 고려한 유량과 수질을 도출하였다.

2. 연구 대상지

본 연구의 대상지는 경기도 이천시에 위치한 설성천 유역으로 선정하였다. 설성천은 경기도 이천시 장호원을 선읍리에서 발원하여 이황천, 방추천 등 여러 지류가 합류되어 청미천으로 유입된다. 설성천의 유역면적은 38.0 km², 유역평균경사는 5.9%, 유로연장은 8.5 km이다. 설성천 유역은 전체 면적의 약 62.6%가 농경지이며, 산림 24.7%, 시가화·건조지역 6.5%, 초지 2.8%, 습지 0.0%, 나지 1.3% 등으로 구성되어 있다. 설성천 유역 내에는 농업용 저수지인 용풍저수지가 위치하고 있다. 용풍저수지는 수혜면적 200 ha, 한발빈도 10년으로 설계된 저수지로 현재 한국농어촌공사에서 관리하고 있다.

설성천 유역의 유역특성인자를 추출하기 위해 수치표고모형 (Digital Elevation Model, DEM), 토지이용도, 하천도 등의 자료를 수집하였다 (Fig. 3).

3. 입력 자료 구축

가. 기상 자료

설성천 유역과 가장 인접한 장호원 자동기상관측장비에서 측정된 강우 자료와 이천 기상대에서 측정된 기온, 풍속, 이슬점온도, 일조시간 자료를 수집하였다. 이천 기상대에서는 유량과 일사량, 증발량을 측정하지 않고 있어 해당 데이터를 수집하는 기상대 중 가장 인접한 기상대인 수원 기상대에서 자료를 수집하였으며, 2013년부터 2017년까지의 자료를 이용하였다.

나. 저수지 자료

용풍저수지의 표고별 수면적 및 내용적 자료와 수혜구역도, 2013년부터 2017년까지의 일별 저수위 자료, 분기별 수질 자료를 수집하였다. 용풍저수지의 사수위는 67.40 EL.m, 만수위는 71.40 EL.m이며, 지난 10년 동안 용풍저수지의 수질은 COD 기준 4~6등급, T-P 기준 1a~6등급, T-N 기준 4~6등급으로 나타나 농업용수 수질기준인 4등급을 초과한 경우가 다수 있었다. 환경부(2014)에 따르면, 용풍저수지는 농업용수 수질기준을 만족시키지 못하여 중점관리저수지 대상으로 선정된 바 있다.

다. 영농 자료

설성천 유역의 농민과 관할 기관 등을 대상으로 한 구두조사 및 기존 중부지방 논 포장을 대상으로 수행한 연구의

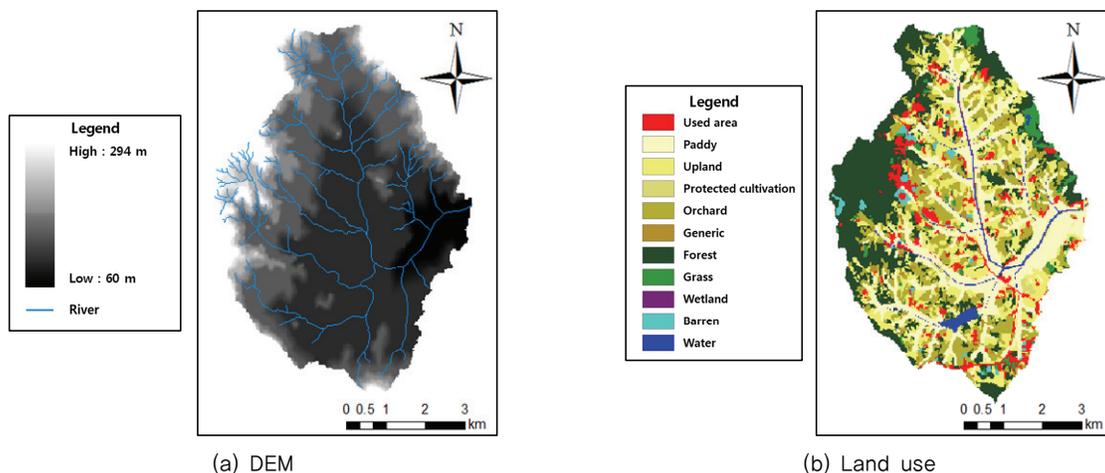


Fig. 3 Digital Elevation Model(DEM) and land use of Seolseong-cheon watershed

Table 1 Crop coefficients of rice in Suwon (Song, 2017)

Parameter	Preparation for transplanting	Transplanting	Days after transplanting						
			10	20	30				
Crop coefficients (Penman-Monteith)	0.78	0.78	0.78	0.97	1.07				
Outlet height (mm)	66.1	80.9	74.0	57.3	34.6				
Minimum ponding depth (mm)	20.0	60.0	40.0	40.0	20.0				
Parameter	Days after transplanting								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Crop coefficients (Penman-Monteith)	1.16	1.28	1.45	1.50	1.58	1.46	1.45	1.25	1.01
Outlet height (mm)	72.9	67.2	57.7	63.4	67.2	66.1	66.1	66.1	66.1
Minimum ponding depth (mm)	30.0	30.0	30.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0

문헌 조사를 통해 영농 관련 자료를 구축하였다. 침투량은 여러 선행 연구들에서 적용한 값을 조사하여 2 mm로 적용하였다 (Lee et al., 1999; Choo, 2004; Song et al., 2012; Song et al., 2013). 순별 작물 계수는 Yoo et al. (2006)이 수원 지역에 대하여 산정한 값을 적용하였으며, 포장 배수량을 산정하는데 필요한 물꼬 높이, 최소담수심은 선행 연구를 참고하여 순별로 적용하였다 (Song, 2017) (Table 1).

수질과 관련된 자료 중 기비 일자는 구두 조사 결과와 Jeong (2014)의 연구를 참고하여, 5월 10일부터 10일간으로 설정하였으며, 기비량은 Song et al. (2012)의 자료를 참고하여 총 질소 168 kg/ha, 총 인 56 kg/ha로 적용하였다. 추비 일자는 구두 조사를 통해 7월 31일부터 10일간으로 설정하였으며, 총 질소 13 kg/ha로 적용하였다. 관개수 수질 농도는 HSPF 모형을 통해 모의된 저수지 수질 중 영농기 동안의 평균값을 적용하였으며, 강우 수질은 Song et al. (2012)이 수행한 강우 수질 분석 결과인 T-N 0.9 mg/L, T-P 0.04 mg/L의 값을 사용하였다.

라. 모니터링 자료

설성천 유역 말단에 위치한 풍계교에 부자식 수위계, 초음파 수위계, 수위표 등을 설치하여 2016년 4월부터 2017년 10월까지 모니터링을 수행하였다. 비영농기인 11월부터 2월까지

지는 모니터링을 수행하지 않았다. 본 연구에서는 모니터링을 통해 수집한 유량 및 수질 자료를 이용하여 모형의 보정 및 검정 자료로 활용하였다. 부자식 수위계와 초음파 수위계를 이용하여 약 10분 간격으로 수위 데이터를 수집하였다. 레이팅을 통해 작성된 수위-유량 곡선을 통해 수위로부터 유량을 추정하였으며, 일별로 평균하여 보정 및 검정에 이용하였다. 수질의 경우 비강우 시 19회, 강우 시 13회 샘플을 채취하여 수질오염공정시험방법에 따라 분석된 총 질소와 총 인의 값을 이용하였다.

4. 농업용 저수지와 논 경작을 고려한 농촌유역 수문·수질 모의

농업용 저수지 기작과 논 의 수문·수질 기작을 반영하기 위하여 HSPF 모형, MASA 모형, CREAMS-PADDY 모형을 연계한 HSPF-MASA-CREAMS-PADDY 시스템을 구축하여 모의를 수행하였다. 또한 비교를 위해 HSPF 모형만 이용하여 모의를 수행하되, 매개변수만 시스템 보·검정 결과와 같은 경우를 Scheme 1, HSPF 모형만 이용하여 모의를 수행하고 매개변수를 다시 보정한 경우를 Scheme 2로 설정하고 모의를 수행하였다 (Table 2). 유량과 수질에 대한 모의 결과를 실측 모니터링 자료와 비교하여 시스템의 적용성을 평가하였다.

Table 2 Schemes applicated in this study

Scheme	Method	Consideration of the agricultural reservoir and paddy cultivation	Parameters
System	HSPF-MASA-CREAMS-PADDY	Consideration	Calibrated using system
Scheme 1	HSPF	Non-consideration	
Scheme 2			Calibrated using HSPF

III. 결과 및 고찰

1. 저수지 및 논 기작을 고려한 수문·수질 모의

구축한 HSPF-MASA-CREAMS-PADDY 시스템을 설정천 유역에 적용하여 보·검정을 수행하였다. 저수지 유입량을 주요 매개변수로 2016년과 2017년에 대해 MASA 모형을 보정한 결과, R^2 0.88, NSE 0.86로 Moriasi et al. (2007)의 기준을 “Very good”으로 만족하는 것으로 나타났다.

MASA 모형을 통해 산정한 2016~2017년의 물넘이 방류량은 2,153,026 m^3 , 농업용수 공급량은 2,274,779 m^3 , 포장배수량은 1,020,467 m^3 로 산정되었다 (Table 3). 물넘이 방류량과 포장배수량은 HSPF 모형의 입력자료로 사용되었다.

Table 3 Results of MASA model (Unit : m^3)

	2016	2017	Total
Spillway outflow	620,681	1,532,345	2,153,026
Agricultural water supply	1,323,698	951,081	2,274,779
Paddy drainage	341,393	679,074	1,020,467

CREAMS-PADDY 모형을 통해 필지에서 배출되는 T-N과 T-P의 부하량을 산정하였다. 필지에서의 실측치를 모니터링하지 않아, 타 필지에 대해 보·검정이 완료된 Song et al. (2012)의 연구에서 사용된 매개변수를 적용하였다. 모의 결과, 2016년에는 T-N 1,275.7 kg, T-P 96.0 kg, 2017년에는 T-N 2,474.0 kg, T-P 161.8 kg으로 산정되었다.

MASA 모형과 CREAMS-PADDY 모형의 모의 결과를 적용하여 HSPF 모형을 구동하고, 단순시행착오법을 통한 보·검정을 수행하였다. 유출량은 NSE, 부하량은 PBIAS를 목적함수로 이용하였다. 보·검정 결과, 유량은 보정기간인 2017년에 대해서 R^2 0.75, NSE 0.76, PBIAS -19%로 나타났으며, 검정기간인 2016년에 대해서 R^2 0.76, NSE 0.60, PBIAS -42%

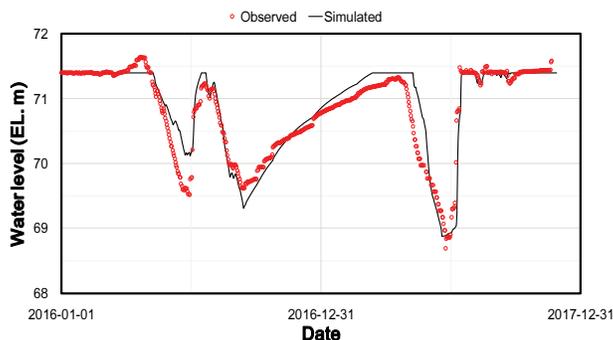


Fig. 4 Calibration result of the water level of the reservoir

Table 4 Calibration results of HSPF model

		R^2	NSE	PBIAS (%)
Discharge	Calibration period	0.75	0.76	-19
	Validation period	0.76	0.60	-42
T-N	Calibration period	0.68	0.60	-16
	Validation period	0.81	0.59	-38
T-P	Calibration period	0.79	0.76	-10
	Validation period	0.91	0.59	37

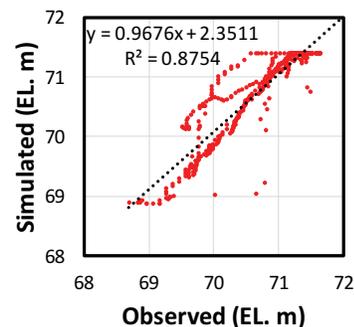
로 나타났다 (Fig. 5). T-N의 경우 보정기간의 R^2 , NSE, PBIAS는 각각 0.68, 0.60, -16%로 나타났으며, 검정기간의 경우 각각 0.81, 0.59, -38%로 나타났다. T-P의 경우 보정기간의 R^2 , NSE, PBIAS는 각각 0.79, 0.76, -10%로 나타났으며, 검정기간의 경우 각각 0.91, 0.59, 37%로 나타났다 (Table 4). 유량, T-N, T-P의 보·검정 결과는 Moriasi et al. (2007)의 기준을 “Very Good”~ “Satisfactory”로 만족하는 것으로 나타났다.

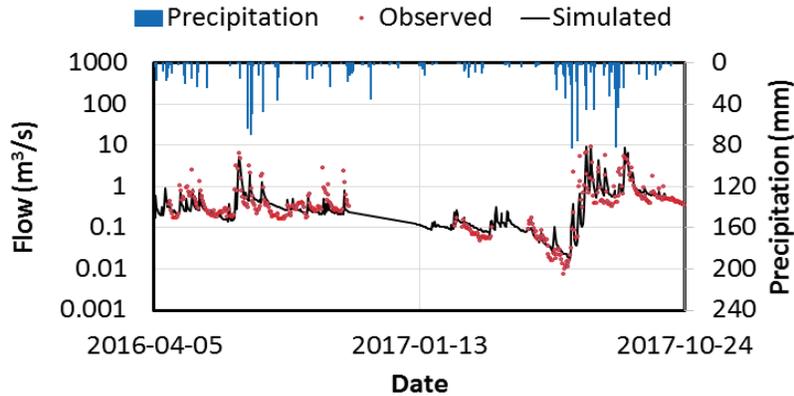
2. 저수지 및 논 기작을 고려하지 않은 수문·수질모의

농업용 저수지 기작과 논 기작을 고려하지 않고 매개변수가 HSPF-MASA-CREAMS-PADDY 연계 시스템 보·검정 결과와 같은 경우를 Scheme 1, 농업용 저수지 기작과 논 기작을 고려하지 않고 모형을 보정한 경우를 Scheme 2로 설정하고, 모의를 수행하였다.

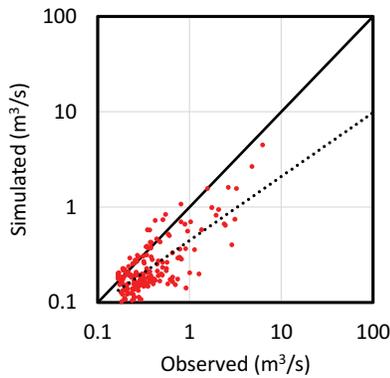
가. 시스템 보·검정 매개변수를 활용한 모의 결과 (Scheme 1)

농업용 저수지와 논 기작을 고려하지 않고 유역모형인 HSPF만 이용하여, HSPF-MASA-CREAMS-PADDY 연계 시스템에서 사용된 매개변수와 동일한 매개변수를 적용하여 유역의 수문과 수질을 모의한 경우인 Scheme 1의 모의 결과, 유량은 보정기간인 2017년에 대해서 R^2 0.75, NSE 0.74, PBIAS -2%로 나타났으며, 검정기간인 2016년에 대해서 R^2

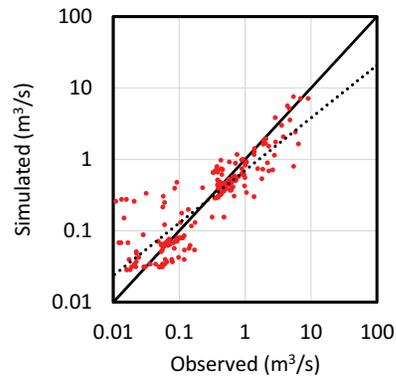




(a) Time-series plot

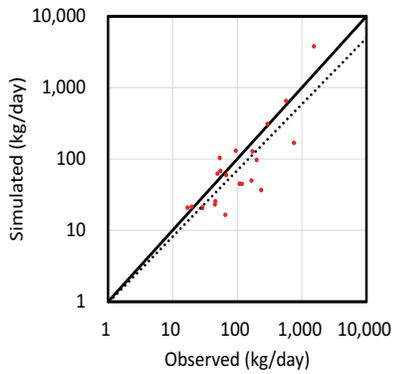


(b) Calibration period

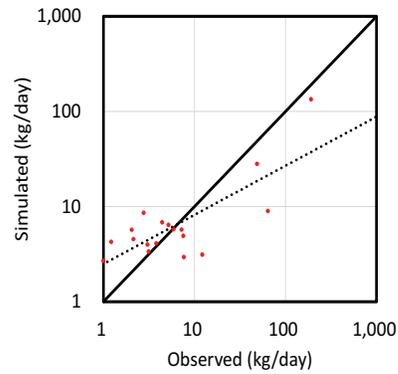


(c) Validation period

Fig. 5 Flow calibration results of HSPF model



(a) T-N



(b) T-P

Fig. 6 Water quality calibration and validation results of HSPF model

0.78, NSE 0.69, PBIAS -23%로 나타났다. T-N의 경우 보정기간의 R^2 , NSE, PBIAS는 각각 0.32, -0.01, -42%로 나타났으며, 검정기간의 경우 각각 0.81, 0.61, -35%로 나타났다. T-P의 경우 보정기간의 R^2 , NSE, PBIAS는 각각 0.00, 0.12, -49%로 나타났으며, 검정기간에는 각각 0.92, 0.05, 39%로 나타났다

(Table 5). 유량 모의 성능 평가 결과, NSE는 “Good”, PBIAS는 “Very Good”으로 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 하지만 T-N과 T-P 모의 성능 평가 결과, NSE는 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

Table 5 Modeling results of HSPF model in Scheme 1

		R ²	NSE	PBIAS (%)
Discharge	Calibration period	0.75	0.74	-2
	Validation period	0.78	0.69	-23
T-N	Calibration period	0.32	-0.01	-42
	Validation period	0.81	0.61	-35
T-P	Calibration period	0.00	0.12	-49
	Validation period	0.92	0.05	39

Table 6 Calibration results of HSPF model in Scheme 2

		R ²	NSE	PBIAS (%)
Discharge	Calibration period	0.74	0.75	-12
	Validation period	0.78	0.67	-33
T-N	Calibration period	0.31	0.63	-31
	Validation period	0.81	0.62	-31
T-P	Calibration period	0.00	0.19	-32
	Validation period	0.91	0.02	43

나. HSPF 보·검정 매개변수를 활용한 모의 결과 (Scheme 2)

농업용 저수지와 논 경작을 고려하지 않고 보·검정을 재수행한 경우인 Scheme 2의 모의를 수행하였다. 이 때 유출량은 HSPF-MASA-CREAMS-PADDY 연계 시스템을 이용한 모의 결과와의 총 합이 0.1% 이내가 되도록 보정하였다. 보·검정 결과, 유량은 보정기간인 2017년에 대해서 R² 0.74, NSE 0.75, PBIAS -12%로 나타났으며, 검정기간인 2016년에 대해서 R² 0.78, NSE 0.67, PBIAS -33%로 나타났다. T-N의

경우 보정기간의 R², NSE, PBIAS는 각각 0.31, 0.63, -31%로 나타났으며, 검정기간의 경우 각각 0.81, 0.62, -31%로 나타났다. T-P의 경우 보정기간의 R², NSE, PBIAS는 각각 0.00, 0.19, -32%로 나타났으며, 검정기간의 경우 각각 0.91, 0.02, 43%로 나타났다 (Table 6). 유량 보·검정 결과, NSE는 “Good”~“Very Good”, PBIAS는 “Very Good”으로 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 부하량의 경우, T-N은 기준을 만족하는 것으로 나타났으나, T-P는 NSE가 모두 기준을 만족시키지 못하는

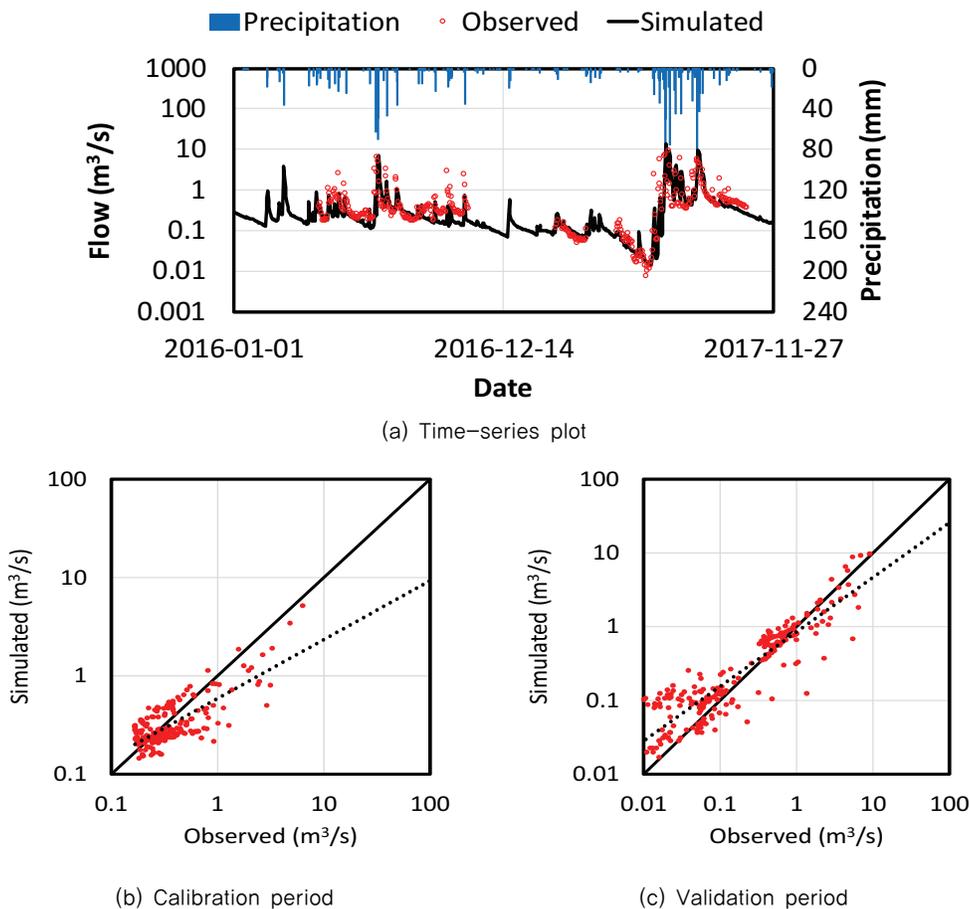


Fig. 7 Flow simulation results of HSPF model in Scheme 1

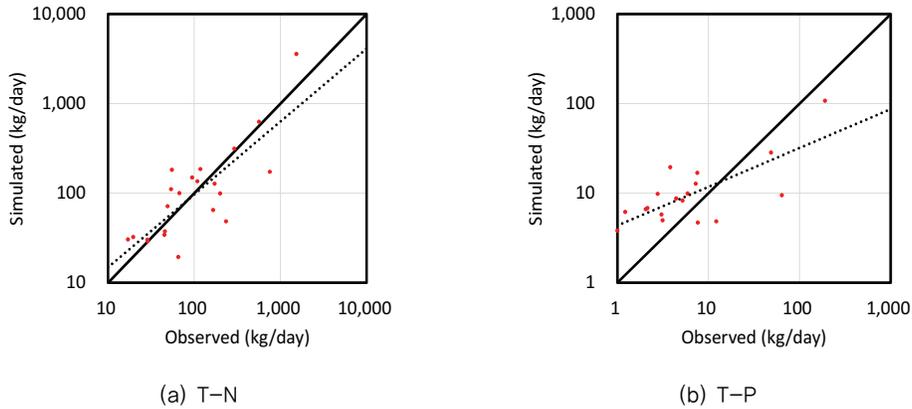


Fig. 8 Water quality simulation results of Scheme 1

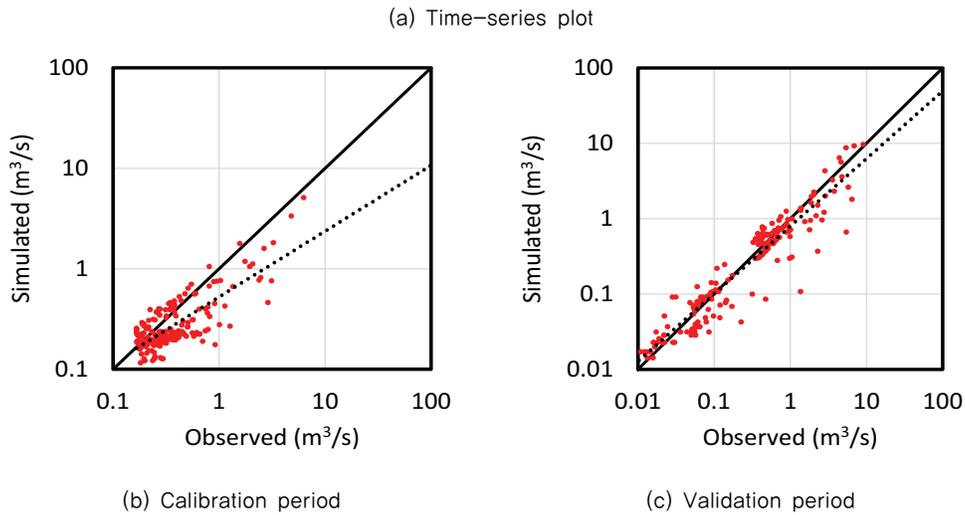
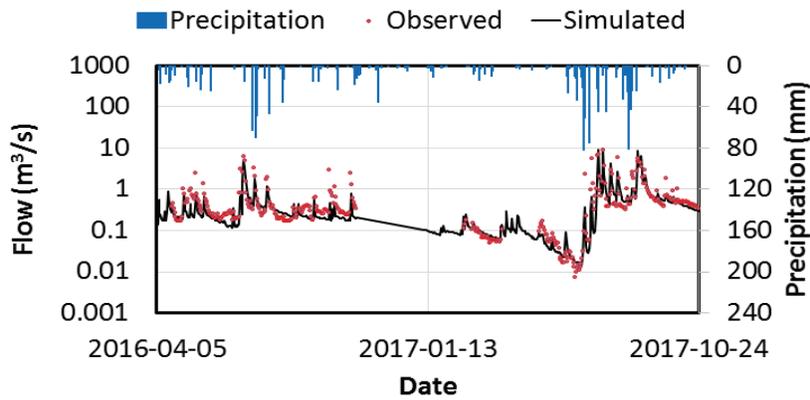


Fig. 9 Flow simulation results of HSPF model in Scheme 2

것으로 나타났다.

HSPF-MASA-CREAMS-PADDY 연계 시스템을 이용한 모의 결과와 Scheme 1, 2의 모의 결과를 이용하여 Flow duration curve (FDC)를 작성한 결과, Scheme 1의 유량 모의 결과는

시스템을 이용하여 모의한 유량과 비교하여 가장 유량이 적은 일부 갈수기에서는 유량이 더 적게 나타났지만, 나머지 대부분의 구간에서는 유량이 더 많은 것으로 나타났으며, Scheme 2의 유출량 모의 결과의 경우, HSPF-MASA-

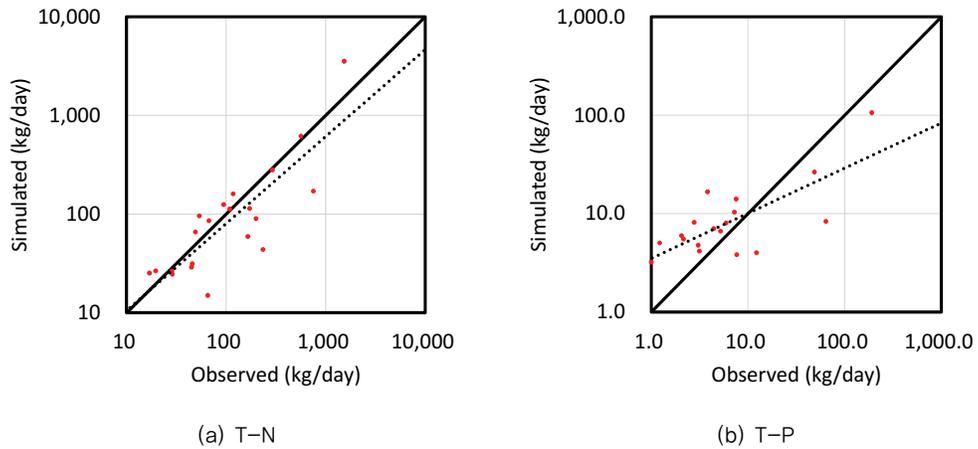


Fig. 10 Water quality calibration and validation results of Scheme 2

CREAMS-PADDDY 연계 시스템을 이용한 모의 결과와 비교하여 홍수기에서는 유출량이 더 많고, 갈수기에서는 유출량이 더 적게 나타났다 (Fig. 11). Scheme 1과 Scheme 2 모두 수량이 많은 구간에서 연계 시스템을 이용한 모의 결과보다 더 유출량이 많았는데, 이는 저수지와 논에서의 저류효과로 인한 것으로 사료된다. System, Scheme 1, Scheme 2의 모의 결과를 Table 7에 나타내었다. NSE와 PBIAS 등의 통계량을 통해 성능을 평가한 결과, 유량, T-N, T-P 항목 모두 연계 시스템의 성능이 유역 모형만 이용하여 모의한 경우보다 실측치를 조금 더 잘 반영하는 것으로 나타났지만, 유량, T-N, T-P 항목

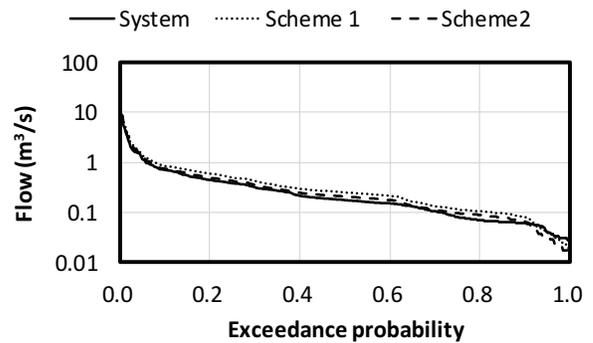


Fig. 11 Flow duration curve of flow modeling results of System, Scheme 1 and Scheme 2

Table 7 Comparison of the simulation results

			R ²	NSE	PBIAS (%)
Discharge	System	Calibration period	0.75	0.76	-19
		Validation period	0.76	0.60	-42
	Scheme 1	Calibration period	0.75	0.74	-2
		Validation period	0.78	0.69	-23
	Scheme 2	Calibration period	0.74	0.75	-12
		Validation period	0.78	0.67	-33
T-N	System	Calibration period	0.68	0.60	-16
		Validation period	0.81	0.59	-38
	Scheme 1	Calibration period	0.32	-0.01	-42
		Validation period	0.81	0.61	-35
	Scheme 2	Calibration period	0.31	0.63	-31
		Validation period	0.81	0.62	-31
T-P	System	Calibration period	0.79	0.76	-10
		Validation period	0.91	0.59	37
	Scheme 1	Calibration period	0.00	0.12	-49
		Validation period	0.92	0.05	39
	Scheme 2	Calibration period	0.00	0.19	-32
		Validation period	0.91	0.02	43

모두 통계적으로 유의한 성능의 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과가 나타난 것은 구축한 영농 자료의 불확실성에서 기인한 것으로 사료된다. 본 연구에서는 연구 대상지 내에 위치한 모든 필지별 영농 일정 및 자료를 정확하게 파악할 수 없어 문헌 조사를 통해 영농 자료를 구축하였다. 실제 유역 내 각 필지에서의 영농 인자들과 문헌 조사를 통해 구축한 영농 자료간의 불일치로 인해 실측치와의 비교에 있어 그 성능이 낮게 평가된 것으로 판단된다. 또한 관개수 수질 농도를 HSPF 모의치를 적용하였는데, 이 또한 모의 결과를 부정확하게 만든 요인이라 사료된다. 농업용 저수지의 수질은 분기별로 1회 측정되기 때문에 본 연구에서는 모의치의 사용이 불가피하였다. 실측치가 아닌 모의치를 관개수 수질 농도로 이용하였기 때문에 입력 자료의 불확실성이 증가하게 되어, 모의 결과에 영향을 준 것으로 판단된다. 따라서 유역에 부합하는 정확한 입력 자료를 확보할 경우, 농촌 유역 수문·수질해석에 HSPF-MASA-CREAMS-PADDY 연계 시스템을 이용하면 유역모형만 이용하여 모의하는 경우에 비해 하천 수문·수질의 변화를 더 현실적으로 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 농촌 유역에서 농업용 저수지와 논 기작을 고려한 수문 및 수질 모의를 위해 HSPF 모형, MASA 모형, CREAMS-PADDY 모형을 연계한 HSPF-MASA-CREAMS-PADDY 연계 시스템을 구축하였다. 설성천 유역을 대상으로 시스템을 적용하여 유역말단에서의 유량과 오염물질 부하량을 산정하였고, 이를 저수지와 논 기작을 고려하지 않은 경우의 수문 및 수질 모의 결과와 비교하여 적용성을 평가하였다.

HSPF-MASA-CREAMS-PADDY 연계 시스템을 설성천 유역에 적용한 결과, 유량, T-N, T-P 모의 결과를 통계량을 통해 분석한 결과, 모의치가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다. 농업용 저수지와 논 기작을 고려하지 않고 HSPF만 이용하여, HSPF-MASA-CREAMS-PADDY 연계 시스템에서 사용된 매개변수와 동일한 매개변수를 적용하여 유역의 수문과 수질을 모의한 경우를 Scheme 1, Scheme 1을 다시 보·검정한 경우를 Scheme 2로 설정하고 모의한 결과, 연계 시스템을 이용하여 분석한 결과와 유사한 수준으로 실측치를 반영하는 것으로 나타났다.

통계량을 통해 성능을 평가한 결과, 농업용 저수지와 논 기작을 고려한 경우가 실측치를 조금 더 잘 반영하는 것으로 나타났지만, 유역모형만 이용하여 모의한 결과와 큰 차이를 보이지는 않았다. 이는 MASA와 CREAMS-PADDY의 입력

자료인 영농 자료와 저수지 수질 자료의 불확실성으로 인한 것으로 판단되며, 정확한 입력 자료를 확보할 경우 더 나은 모의 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 농촌 유역에서 농업용 저수지와 논 기작을 고려한 연계 시스템을 구축하여 수문 및 수질 모의를 수행하고, 이를 농업용 저수지와 논 기작을 고려하지 않고 모의한 경우와 비교하여 연계 시스템의 적용성을 평가하였다. HSPF-MASA-CREAMS-PADDY 연계 시스템을 이용하여 모의한 결과와 HSPF 모형만을 이용하여 모의한 결과를 분석한 결과, HSPF-MASA-CREAMS-PADDY 연계 시스템을 이용하여 모의한 결과가 실측치를 더 잘 반영하는 것으로 나타났지만, 본 연구의 한계로 인해 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 하지만 연계 시스템을 이용하면 농촌 유역 수자원의 중요한 요소인 농업용 저수지와 논벼 재배의 영향을 고려할 수 있기 때문에 충분한 입력 자료가 갖추어진 경우 더 현실적인 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구의 결과는 논벼 재배가 다수를 차지하는 우리나라 농촌 유역에 대한 모델링에 있어 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구사업 (세부과제번호: PJ0134142018)의 지원에 의해 수행되었음.

REFERENCES

1. Bicknell, B. R., J. C. Imhoff, J. L. Kittle, A. S. Donigan, and R. C. Johanson, 1996. Hydrologic simulation program-FORTRAN user's manual, v.11, Athens, GA., USEPA.
2. Chin, Y. M., 1998. Development of CREAMS-PADDY model for simulating nonpoint source pollutants from paddies. Master's thesis. Seoul, Seoul National University (in Korean).
3. Chin, Y. M., S. W. Park, S. M. Kim, M. S. Kang, and M. G. Kang, 2002. Nutrient loads estimation at paddy field using CREAMS-PADDY model. *Journal of Korean Society of Rural Planning* 8(1): 60-68 (in Korean).
4. Choo, T. H., 2004. A study on return flow ratio of irrigation for a paddy field in pumping station by water balance method. *Journal of Korea Water Resources Association* 37(3): 249-255 (in Korean). doi:10.3741/jkwra.2004.37.3.249.

5. Chung, G. and T. W. Kim, 2007. Comparison of water distribution model through reservoir and water system operation. *Water for Future* 40(10): 38-43 (in Korean).
6. Hwang, S. J., 2014. Final report for the designation of the key management reservoir and the establishment of the basic plan, 43-166. Sejong: Ministry of Environment (in Korean).
7. Jang, T., H. Kim, S. Kim, C. Seong, and S. Park, 2011. Assessing irrigation water capacity of land use change in a data-scarce watershed of Korea. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 138(5): 445-454. doi:10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000420.
8. Jeon, J. H., C. G. Yoon, A. S. Donigian Jr., and K. W. Jung, 2007. Development of the HSPF-Paddy model to estimate watershed pollutant loads in paddy farming regions. *Agricultural Water Management* 90(1-2): 75-86. doi:10.1016/j.agwat.2007.02.006.
9. Jeong, G. W. and J. H. Jeon, 2012. HSPF-Paddy model for analyzing non-point pollution from paddy. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(1): 42-49 (in Korean).
10. Jeong, H. S., 2014. Modeling socio-hydrological systems for wastewater reused watersheds. Ph.D. diss., Seoul National University (in Korean).
11. Kim, J. T., K. W. Park, and U. J. Ju, 2005. Reservoir water monitoring system with automatic level meter. *KCID Journal* 12(1): 60-68 (in Korean).
12. Kim, M. J. and T. G. Kim, 2014. Analysis of runoff characteristics of non-point sources pollutant and application of BMP using BASINS/WinHSPF model. *Journal of Environmental Impact Assessment* 23(2): 88-100 (in Korean). doi:10.14249/eia.2014.23.2.88.
13. Korea Rural Community Corporation (KRC), 2016. Statistical yearbook of land and water development for agriculture (in Korean).
14. Lee, B. S., Y. Jung, M. J. Park, and K. I. Gil, 2008. A study on the discharge characteristics of non-point pollutant source in the agricultural area of the Kyongan watershed. *Journal of Korean Society on Water Quality* 24(2): 169-173 (in Korean).
15. Lee, K., U. Cheong, and I. Lee, 1999. Water balance in a paddy field with pumping irrigation system. *KCID Journal* 6(2): 11-18 (in Korean).
16. 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. doi:10.13031/2013.23153.
17. Park, M. J., G. A. Park, and S. J. Kim, 2007. Analysis of hydrologic behavior of SLURP model including agricultural reservoir operation. *Journal of Korean Society of Civil Engineers* 27(5B): 515-523 (in Korean).
18. Seo, C. S., S. W. Park, S. J. Im, K. S. Yoon, S. M. Kim, and M. S. Kang, 2002. Development of CREAMS-PADDY model for simulating pollutants from irrigated paddies. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* 44(3): 146-156 (in Korean).
19. Song, J. H., 2017. Hydrologic analysis system with multi-objective optimization for agricultural watersheds. Ph.D. diss., Seoul, Seoul National University (in Korean).
20. Song, J. H., M. S. Kang, I. Song, and J. R. Jang, 2012. Comparing farming methods in pollutant runoff loads from paddy fields using the CREAMS-PADDY model. *Korean Journal of Environment Agriculture* 31(4): 318-327 (in Korean). doi:10.5338/kjea.2012.31.4.318.
21. 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). doi:10.5389/ksae.2013.55.3.063.
22. 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). doi:10.5389/KSAE.2006.48.1.013.
23. Yoo, S. H., J. Y. Choi, S. H. Lee, Y. G. Oh, and D. K. Yun, 2013. Climate change impacts on water storage requirements of an agricultural reservoir considering changes in land use and rice growing season in Korea. *Agricultural Water Management* 117: 43-54. doi:10.1016/j.agwat.2012.10.023.