



논의 저류효과를 고려한 유역수문모델링 - HSPF Surface-Ftable의 적용 -

Watershed-scale Hydrologic Modeling Considering a Detention Effect of Rice Paddy Fields using HSPF Surface-Ftable

성충현^a · 오찬성^b · 황세운^{c, †}

Seong, Chounghyun · Oh, Chansung · Hwang, Syewoon

Abstract

A method to account a detention in a rice paddy field in hydrologic modeling was tested at plot and watershed scales. Hydrologic Simulation Program - Fortran (HSPF) and its one of surface runoff modeling method, i.e Surface-Ftable, were used to simulate a inundated condition in a rice paddy culture for a study plot and basins in Saemangeum watershed. Surface-Ftable in HSPF defines surface runoff ratio with respect to surface water depth in a pervious land segment, which can be implemented to the feature of water management in a rice paddy field. A Surface-Ftable for paddy fields in Saemangeum watershed was developed based on the study paddy field monitoring data from 2013 to 2014, and was applied to Jeonju-chun and Jeongeup-chun basins which comprise 12% and 22% of paddy fields in the basins, respectively. Four gaging stations were used to calibrate and validate the watershed models for the period of 2009 and 2013. Model performed 7.13% and 9.68% in PBIAS, and 0.94 and 0.90 in monthly NSE during model calibrations at Jeonju and Jeongeup stations, respectively, while the models were validated its applicability at Hyoja and Gongpyung stations. The comparison of results with and without considering detention effect of paddy fields confirmed the validity of the Surface-Ftable method in modeling watersheds containing rice paddy fields.

Keywords: HSPF; surface water modeling; Surface-Ftable; saemangeum

1. 서 론

논은 홍수조절, 지하수 함양, 수질정화, 토양침식 방지 등의 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 2016년 기준 국내 논 면적은 896천 ha 로 국토의 약 8.9%를 차지하고 있으며, 특히 농촌유역의 경우 논이 차지하는 비중은 크며, 새만금 유역의 경우 약 33%를 차지한다. 논은 밭과 달리 관개시 용수를 저류하고 영농에 따라 저류기간과 기간별 저류량을 달리한다. 이러한 논영농의 영농기 물순환은 필지와 유역의 수문순환에 영향을 미치므로 논영농의 수문기작은 유역수문모델링에 있어 반드시 고려해야 하는 주요 요소라 할 것이다.

유역수문모델은 주로 해외에서 개발되어 국내에서 활용되고 있다. 기존 대표적 유역모형인 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)과 HSPF (Hydrological Simulation Program - Fortran) 모형들을 기본으로 하고 국내 현실을 반영하여 SWAT-AGRIMAN (Kim et al., 2005)과 HSPF-paddy (Jeon et al., 2007) 등이 개발되었다. 이들 두 모형들은 기존 유역모형들의 기본 구조에서 논에서의 담수와 관개 등으로 인한 수문 및 수질에 대한 영향을 모의할 수 있도록 개선한 것으로, 대단위 유역에서부터 중소단위 유역까지 국내 다양한 지역에 적용된 바 있다. 특히 논이 전체 유역의 30% 이상을 차지하는 새만금 유역의 경우 수질종합대책에 따른 수질개선효과를 정량적으로 분석하기 위해 HSPF-Paddy 모형이 적용된 바 있다 (MOE, 2014; 2015). SWAT-AGRIMAN의 경우 이동저수지 관개지구에 적용되어 논 담수심과 용수공급량 및 시험유역내 저수지 저수량 모의에 적용하여 기존 SWAT모형에 비해 우월한 적용성이 보고된 바 있다 (Kim et al., 2010). 하지만 논 포장단위의 실측자료를 이용한 수문모형의 구축과 적용성 평가는 미흡한 편이다. 기존의 논 포장단위의 연구는 주로 논영농의 수질개선효과 연구 (Kim et al., 2013; Seo et al., 2002; Joen et al., 2005; Yoon et al., 2002) 가 중심이 되어왔으며, 이를 유역차원으로 확장하여 유역단위 수문해석에 있어 논영농의

^a Engineer III, Bureau of watershed modeling and management, St. Johns River Water Management District

^b Researcher, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

^c Associate Professor, Department of Agricultural Engineering, (Institute of Agriculture and Life Science) Gyeongsang National University

† **Corresponding author**

Tel.: +82-55-772-1934 Fax: +82-55-772-1939

E-mail: swhwang78@gmail.com

Received: May 15, 2018

Revised: July 26, 2018

Accepted: August 1, 2018

기작을 고려하고 모델을 평가하는 노력들은 상대적으로 미흡하다. 즉, 논 저류효과를 포장단위에서 검토하고, 이를 유역단위 모델링에 적용하여 논 저류효과에 대한 유역전체에 대해 정량적으로 비교하는 연구가 필요하다.

관측자료의 질과 양이 계속해서 증가하고 있는 상황에서 관측된 유역자료를 빠르게 처리하고 정확하게 해석할 수 있는 효율적이면서 정밀한 유역모델링은 필수적이다. 이를 위해서는 능동적이고 지속적인 모형의 유지관리가 강조되는데, 대표적으로 SWAT과 HSPF 모형들은 프로그램 소스코드를 공개하고, 이를 바탕으로 사용자와 개발자간 지식과 경험들을 공유 및 피드백과정을 통하여 모형의 개선과 진화를 도모하는 노력을 기울이고 있다. 한편 SWAT-AGRIMAN과 HSPF-paddy 모형들의 경우 프로그램 코드가 공개되어 있지 않거나 접근이 쉽지않아 각 모형의 가정이나 구동과정을 파악하는 데 어려움이 있으며, 모태가 되는 모형, 즉 SWAT과 HSPF와의 지속적인 유지관리와 업데이트가 유기적으로 이루어지기 힘든 상황이다. 더불어 국내 지역의 특징적인 수문기작에 대한 수문모형에 적용이 필요한 경우 모형의 확장성에 있어 한계가 존재하는 것이 사실이다. 한편, HSPF 모형의 가장 최신인 12.4 버전에서는 습지에서 지표유출수가 저류되는 현상을 구현하기 위해 Surface-Ftable과 연관된 부분이 수정되었다. Surface-Ftable은 기존 HSPF에서 하천과 같은 수체의 형

상을 정의하기 위해 이용되는 Ftable과는 달리 지표면에서의 유출현상을 구현하기 위한 것으로, 국내 농업유역의 주요 토지이용인 논에서의 수문현상을 설명하는데 그 적용성이 있는지에 대한 검토가 필요하다.

본 연구에서는 미국 환경청(US EPA)에 의해 지속적으로 개발 및 개선되고 있는 HSPF의 최신버전인 HSPF 12.4 모형의 Surface-Ftable 기반 습지모의방법을 적용하여 논에서의 저류현상 구현하고 유역단위 수문모의에 대한 영향을 분석하고자 하였다. 이를 위해 새만금유역의 포장단위 및 유역단위 대상지역을 선정하여 수문해석에 적용하고 그 모의성능을 평가하였다.

II. 재료 및 방법

1. 논 저류효과 모의를 위한 HSPF 모형의 Surface-Ftable의 적용

HSPF는 유역을 모의하는 기본단위로 PERLND (투수면), IMPLND (불투수면), RCHRES (수체)로 해석한다. 강우가 투수면과 불투수면에 도달하면, 투수면과 불투수면에서 유량이 유출되어 수체로 흘러들어가게 되며, RCHRES는 상류와 하류의 RCHRES로 연결되어 하천망을 이루는 방식으로 소유

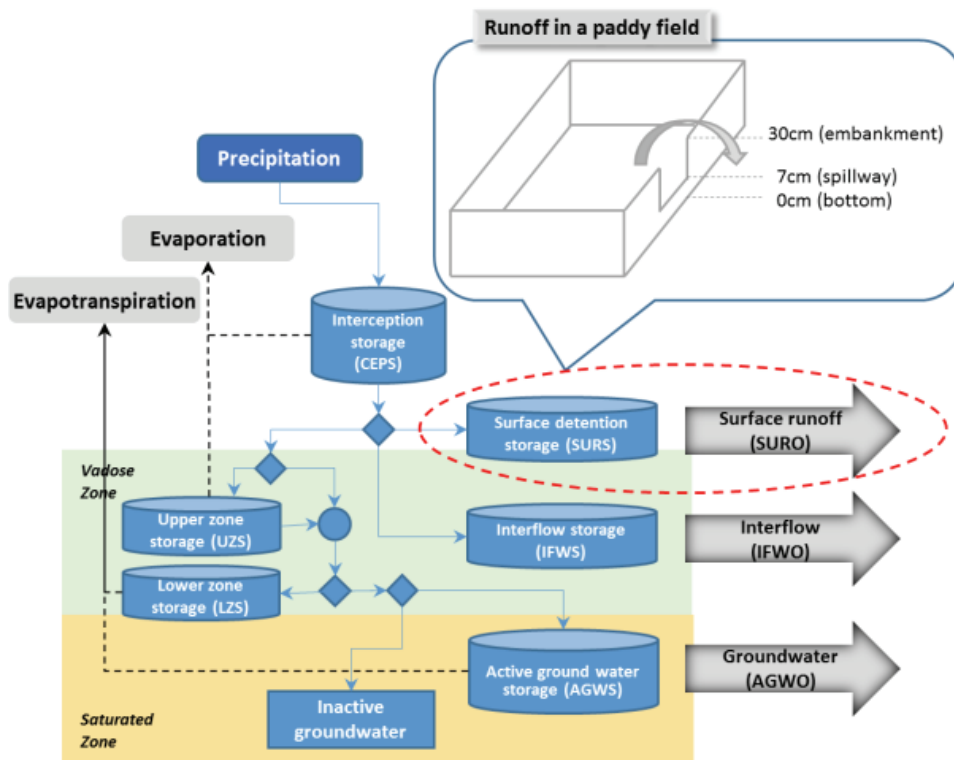


Fig. 1 Schematics of pervious land (PERLND) modeling in HSPF and application of Surface-Ftable

역 단위로 전체 유역을 모사한다. PERLND의 모의는 지표유출, 중간유출, 지하수유출로 구성되는데, 논외의 저류효과 모의는 지표유출 방법과 연관지을 수 있다 (Fig. 1).

PERLND 모듈의 지표유출 모의 방법은 총 3가지가 제공된다. 가장 일반적으로 이용되는 첫 번째 방법은 지표면의 경사에 따른 중력 흐름으로 유출을 모의하는 방법이고, 나머지 모의방법들은 지표면 경사가 완만해서 중력흐름을 유출로 가정하는 것이 적절하지 않은 경우에 적용하는 방법들로서, 평탄지의 습지에 의한 저류효과를 모의하기 위해 적용되어 왔다. PERLND모듈의 남은 두가지 지표유출 계산방식은 멱함수 (power function) 방법과 Surface-Ftable을 적용하는 방법이다 (USEPA, 2001). 멱함수 형태의 저류효과 모의방법은 식 (1)을 이용하는데, 이는 비교적 간편하게 저류효과를 고려할 수 있는 것으로 여겨진다. 하지만, SREXP와 같은 현실세계의 물리값(또는 측정값)이 아닌 상수를 입력해야하므로 실측자료를 이용한 보정이 필요하다는 단점이 있다. Fig. 2와 같이, Surface-Ftable의 경우 저류깊이에 따른 유출의 비율 (fraction of the current depth leaving the surface per time interval)을 설정해주는 방식으로 지표유출을 모의하므로 논외의 물꼬높이와 같은 물리적인 값을 적용하기에 유리하다는 특징이 있다.

$$SURO = (1 - SRRC \times DELT60) \times SURS^{SREXP} \quad (1)$$

여기서, SURO는 지표유출량 (Surface Outflow, in/interval), SURS는 지표저류용량 (Surface Detention Storage, in), SRRC는 감소계수 (Hourly Recession Constant), DELT60는 계산시간단위 (Hours per interval), SREXP는 지표유출계수 (Exponent in surface runoff equation)을 의미한다.

기존의 HSPF 모델링에서 논에서의 유출은 주로 PERLND의 지표면 경사에 따른 중력흐름모의 방법을 적용해 왔다. 이

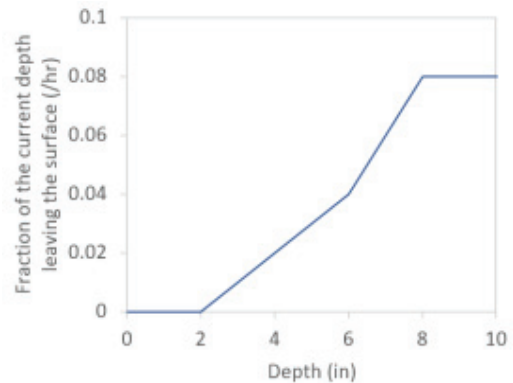
러한 지표흐름 모의방법은 담수 상태의 논을 합리적으로 모델링하기에 한계가 있는 것이 사실이다. 한편, 최근 HSPF 12.4 버전에서는 지하수위가 높을 경우에 대해서만 이용되어 오던 Surface-Ftable을 넓은 습지지역에 적용할 수 있도록 수문기작이 수정되어 국내 논외의 유출특성을 반영하기에 유리한 것으로 판단된다. 여기서 Surface-Ftable은 HSPF의 수체 모의를 위한 RCHRES 모듈에 이용되는 Ftable과는 다르며, PERLND 모듈의 계산에서 이용된다. 즉, RCHRES에서 이용되는 Ftable은 수체의 “깊이-면적-부피-유량”의 관계를 정의하는데 반해, PERLND의 Surface-Ftable은 지표면 유출 (surface runoff) 계산을 위한 “깊이-유출량비율”의 관계를 정의한다.

논에서의 유출은 주로 물꼬를 통해 발생하며 물꼬높이 이하의 경우 지표유출은 발생하지 않게 된다. 또한, 일정 규모이상의 호우 발생 시 담수심이 논둑높이 이상이 되는 경우 논둑을 통한 전체적인 유출이 발생할 수도 있다. 논외의 경우 경사를 고려할 필요가 없는 평탄지이고, 물꼬높이, 논둑높이에 따라 유출이 발생하므로, HSPF 모형의 Surface-Ftable을 통한 유출 모의를 하는 것이 실제 논에서의 저류효과와 유출을 모의하는데 적절하다고 판단된다. Surface-Ftable은 지표저류높이에 따른 유출비율로 구성되는데, 여기서 지표저류높이는 논외의 물꼬와 둑의 높이로 설정하여 적용이 가능하다.

본 연구에서는 논 모의를 위한 Surface-Ftable 구성을 위해 논시험포장 자료를 적용하였다. 관측된 논외의 물꼬높이 7cm와 논둑 높이 30cm를 지표저류높이로 적용하고, 각 지표저류높이에 따른 유출비율 (fraction)은 시험논에서 관측된 담수심과 유출자료를 바탕으로 시행착오 (trial and error) 방법으로 조정하였다. 완성된 Surface-Ftable은 Table 1과 같으며, 바닥부터 물꼬높이 (0~7cm) 까지는 유출이 발생하지 않고 (fraction = 0), 물꼬높이부터 논둑높이 (7~30cm)까지는 물꼬를 통하여

FTABLE 1	
rows	cols ***
5	2
Depth	Outflow ***
(in)	(/hr) ***
0.0	0.00
2.0	0.00
4.0	0.02
6.0	0.04
8.0	0.08
END FTABLE 1	

(a) Example of Surface-Ftable



(b) Conceptualized graph of the Surface-Ftable

Fig. 2 Example of Surface-Ftable in HSPF

Table 1 Developed Surface-Ftable for simulation of rice paddy field in Saemangeum watershed

Depth (in)	Outflow (fraction/hr)
0.0	0.00
2.75	0.00
2.76	0.05
11.91	0.05
11.92	0.89
20.00	0.99

논저류량의 5%가 모형 계산시간간격 (본 연구에서는 1시간 간격을 적용함)마다 유출되고 (fraction = 0.05), 논둑높이 이후의 경우에는 높이에 따라 89%~99%의 유출이 발생하는 것으로 구성되었다. 도출된 Surface-Ftable은 유역모형의 논 농경지에 적용하였다.

2. 시험포장 및 대상유역

연구 대상지역으로 새만금 유역내 위치한 시험포장과 2개 소하천 유역을 선택하였다. 논 저류효과 모의를 위한 논 시험포장자료는 기존의 농어촌 연구 (KRC, 2015)에서 구축된 모니터링 자료를 수집하여 적용하였다. 전북 익산시 춘포면 용연리 일대 8개 필지로 구성되며, 2013년과 2014년의 영농기간 동안의 강우, 관개량, 담수심, 배수량, 침투량 등의 물관리 자료를 수집하였다. 한편, 유역단위 적용성을 파악하기 위해 새만금 유역내 전주천 유역과 정읍천 유역에 대해 확대·적용하였다. 시험포장의 경우 현장 관측 강수량 자료를 이용하였으며, 타 기상요소 자료의 경우 인근에 위치한 전주관측소 지점의 자료를 이용하였다. 유역모의는 2009-2013년의 기간에 대해 각 유역내에 위치한 전주관측소 (기상청 ID: 146), 정읍관측소 (기상청 ID: 245) 지점의 기상자료를 이용하였다.

시험포장의 총 8개 시험포 중 관행 물관리 방법을 적용한 SPD#1과 SPD#5 포장에 대한 관측자료를 적용하였고, 관행 물꼬 높이는 7cm로 설정하였으며 5월말부터 시작되는 실측 관개량자료를 모형에 입력하였다. 다음 Table 2은 익산 시험

포장의 시기별 운영현황을 정리한 표이다.

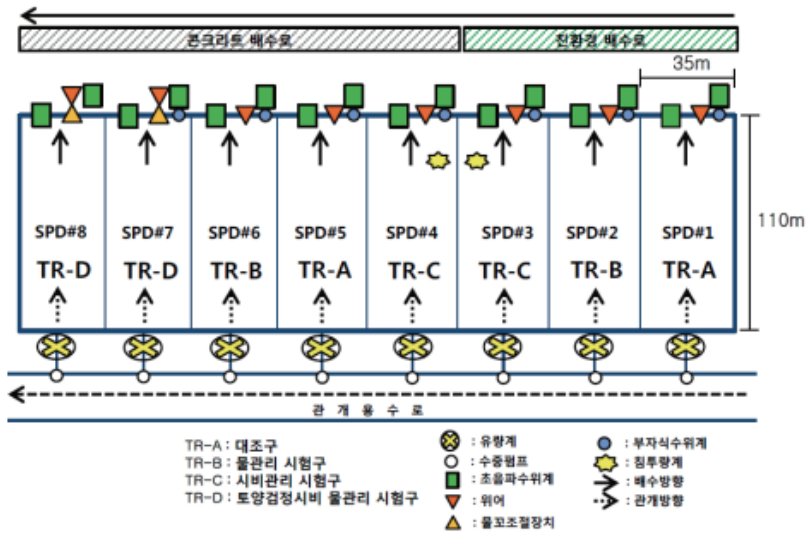
2개 관행시험포장 자료를 이용하여 Surface-Ftable을 구성하고, 이를 유역모형에 확대적용하였다. 본 연구에 적용된 유역은 양질의 관측자료가 확보된 소유역으로 시험포장에 적용된 새만금 유역의 평균적인 논 영농관리가 적용되었다고 가정하고 논 시험포장에서 도출한 매개변수들을 동일하게 적용하였다. 전주천과 정읍천 유역의 경우 새만금 유역의 상류 소하천유역으로서 기존 농어촌연구원 새만금 연구 (KRC, 2016; 2017)에서 구축된 바 있다. 본 연구에서는 전주천 유역과 정읍천 유역 모형을 과거 새만금 연구로부터 구성하여 논에 대해 Surface-Ftable을 적용하였다. 성 등(2017)은 자동보정시스템과 오염원 산정단위 수준의 세분화된 소유역 구분을 통해 모델의 활용성을 제고하고 새만금 유역에 대한 적용성을 보인바 있다. 만경강과 동진강의 주요 지류유역인 전주천과 정읍천 유역은 새만금 유역의 대표 소유역으로 논 토지이용이 각각 전체 유역의 12.5%와 22.2%를 차지하여 논 수문기작이 유역에 미치는 영향이 비교적 클 것으로 판단되어 본 연구의 대상 소유역으로 선정하였다.

3. 자동수문보정시스템을 이용한 유역모형 보정

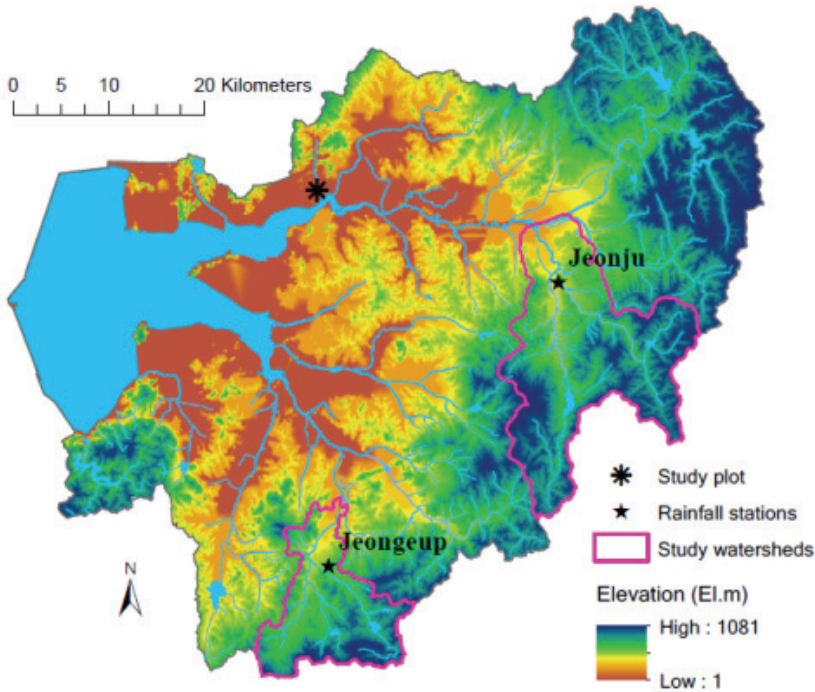
모형의 최적 매개변수 조합을 찾아내기 위해서 SCE-UA 알고리즘을 이용한 자동보정기법 (Seong et al., 2015)을 적용하였다. HSPF-SCE는 전역 최적해 (global optimum)를 찾으며, 다양한 목적함수를 동일한 수준으로 만족하는 다수의 해, 즉 다수의 매개변수 그룹을 도출한다. 모델러는 일반적으로 복수의 매개변수 그룹으로부터 얻은 모델링 결과 중에 가장 합리적으로 현실을 반영하고 있는 매개변수 그룹을 정성적 평가를 통해 선택하는 과정을 거쳐 보정을 실시하게 된다. 모형의 유량보정에 이용된 매개변수는 선행연구의 민감도 분석 및 전문가적 경험과 판단을 바탕으로, LZSN, UZSN, INFILT, AGWRC, DEEPR, BASETP, AGWETP, IRC, INTFW, INTERCEP, LZETP의 총 11개를 이용하였으며 나머지 매개변수들은 모형의 기본값 및 선행연구들의 값을 적용하였다 (Seong et al., 2017). LZSN과 UZSN은 HSPF 모형의 PERLND

Table 2 Agricultural activities in the Icsan study paddy field (KRC, 2015)

Activities	Year 2013		Year 2014	
	SPD#1	SPD#5	SPD#1	SPD#5
Irrigation start	2013/06/08	2013/05/20	2014/05/20	2014/05/20
Puddling	2013/06/12	2013/05/21	2014/05/25	2014/05/21
Transplanting	2013/06/13	2013/05/24	2014/05/29	2014/05/21
Midsummer drainage	2013/07/14~21	2013/07/07~16	2013/07/14~21	2013/07/07~16
Harvesting	2013/10/21	2013/10/18	2013/10/21	2013/10/18



A. Schematics of paddy study plots (KRC, 2015)



B. Locations of meteorological stations and watersheds selected for this study.

Fig. 3 Schematics of the study paddy plots and locations of plot, meteorological stations and study sub-watersheds

의 모듈의 구성에 있어서, upper와 lower soil zone의 크기를 결정하는 매개변수로, 각 토양층의 물 저장공간을 정의해 주며 물수지에 대한 민감도가 크다. 다른 매개변수들에 대한 자세한 설명은 USEPA (2001)에 소개되어 있다. 한편, 매개변수 탐색을 위한 범위는 USEPA(2001)에 제시된 기준을 이용하였고 적용된 목적함수는 Table 3와 같다. 이는 전체유량과 고유량과 저유량시의 수문특성을 모두 평가할 수 있는 방법으로, 단일 목적함수를 채용한 자동보정기법의 단점을 개선시킬 수 있는 장점이 있다 (Seong et al., 2015). 본 연구에서 적용한

목적함수들 간의 가중치는 모두 동일하게 설정하고 최종 매개변수 그룹의 선택에 있어서 통계변수와 그래프를 통한 다각적 평가를 통해 선정하였다.

전주천 유역의 전주, 효자 지점과 정읍천 유역의 정읍, 공평 지점에 대해 모형을 보·검정하였다. 모형의 보정은 2009년부터 2013년의 자료기간에 대해 수행하였으며, 모형의 보정을 위해 유역말단에 위치한 전주와 정읍 지점을 선정하였고, 중상류에 위치하고 자료기간이 상대적으로 짧은 효자와 공평 지점은 모형의 검정에 활용하였다 (Fig. 4 and Table 4).

Table 3 Description of objective functions deployed in the calibration

Description	Formula*
Objective function	$F(\theta) = \sum_{i=1}^4 f_i(\theta), \theta \in \Theta$
Absolute error of daily flow	$f_1(\theta) = \sum_{i=1}^N Q_{obs,i} - Q_{sim,i}(\theta) $
Absolute error of 50% lowest flows exceedance	$f_2(\theta) = EX_{obs,50\% \text{ lowest flow}} - EX_{sim,50\% \text{ lowest flow}}(\theta) $
Absolute error of 10% highest flows exceedance	$f_3(\theta) = EX_{obs,10\% \text{ highest flow}} - EX_{sim,10\% \text{ highest flow}}(\theta) $
Absolute error of seasonal volume	$f_4(\theta) = \sum_{j=1}^{N_{ss}} (\sum_{i=1}^{n_j} Q_{obs,i} - \sum_{i=1}^{n_j} Q_{sim,i})$

* $f_i(\theta)$ is sub-objective functions, θ is a parameter set, Θ is the possible ranges of parameters, Q_{obs} is observed daily flow, Q_{sim} is simulated daily flow, EX represent the fraction of stream flow equals or exceeds a specific flow rate, N_{ss} is the number of summer and winter months, n_j is the number of time steps in each j month.

Table 4 Discharge stations and data periods for calibration and validation

Watershed	Calibration		Validation	
	Station	Period	Station	Period
Jeonju–chun	Jeonju	2009–2013	Hyoja	2009–2013
Jeongeup–chun	Jeongeup	2009–2013	Gongpyung	2009–2011

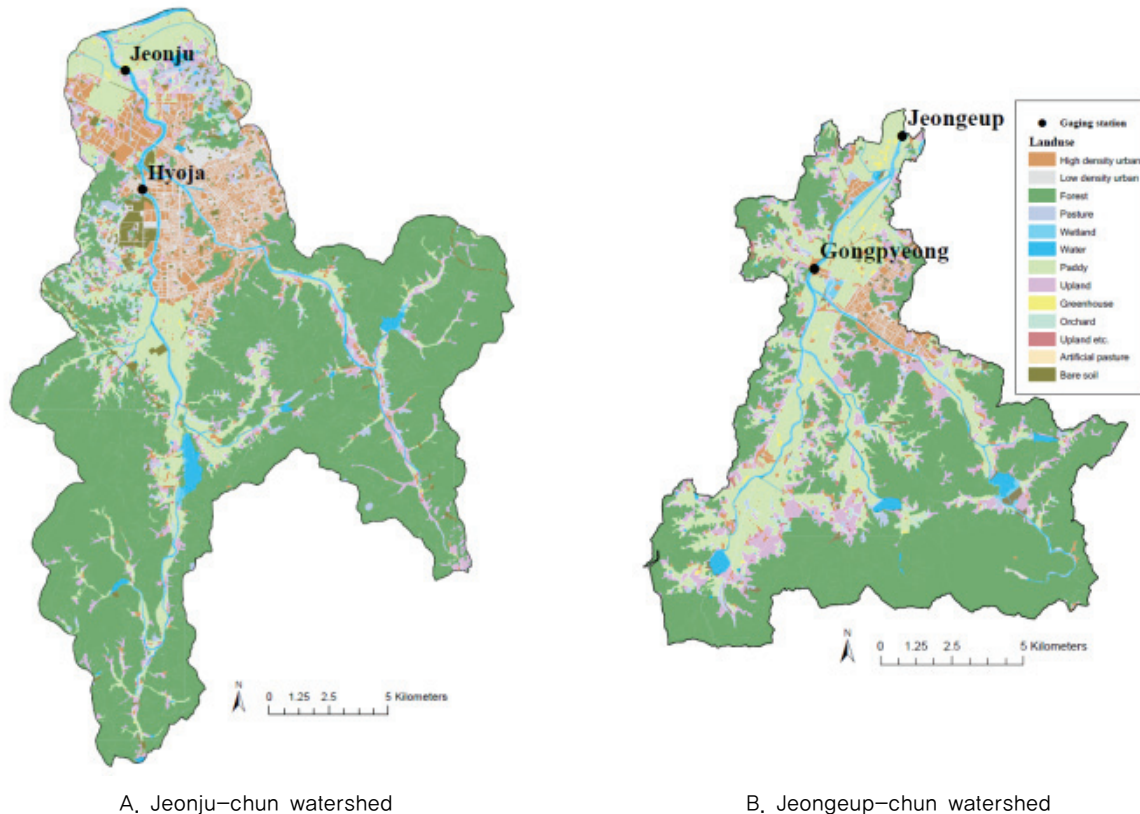


Fig. 4 Study watersheds landuse and discharge stations for model calibration and validation

Table 5 General ranges of statistics for hydrologic model performance evaluation

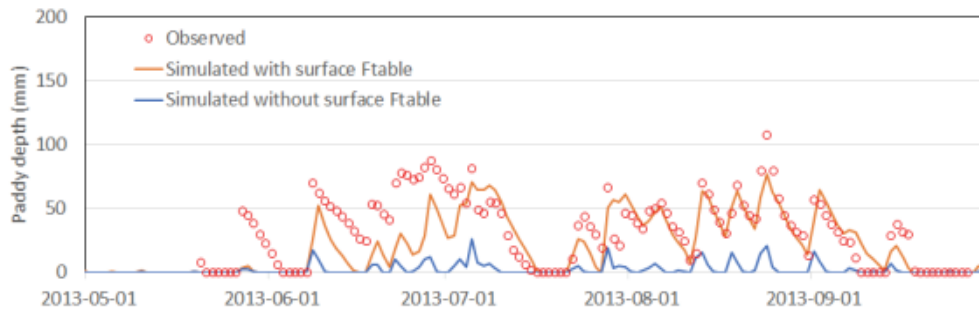
Statistics	Data time period	Very Good	Good	Fair	Poor	Ref.
R ²	Daily	0.80(R ² ≤1)	0.70(R ² ≤0.80)	0.60(R ² ≤0.70)	R ² ≤0.60	Duda et al., 2012
	Monthly	0.86(R ² ≤1)	0.75(R ² ≤0.86)	0.65(R ² ≤0.75)	R ² ≤0.65	
NSE	Monthly	0.75(NSE≤1)	0.65(NSE≤0.75)	0.50(NSE≤0.65)	NSE≤0.50	Moriassi et al., 2007
PBIAS	Monthly	PBIAS<±10	±10≤PBIAS≤±15	±15≤PBIAS≤±25	PBIAS≥±25	
	Monthly	PBIAS<±25	±25≤PBIAS≤±40	±40≤PBIAS≤±70	PBIAS≥±70	

모형의 평가를 위한 오차 통계변수는 R² (coefficient of determination), NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency), PBIAS (percent bias)를 적용하였다. R²는 실측치와 모의치간의 상관성을 평가해주는 통계지표로서, 0과 1사이의 값으로 나타나며, 1의 경우 완전한 선형관계가 있음을 설명한다. NSE는 실측치와 모의치간의 잔차 분산 (residual variance)의 상대적 크기를 정규화한 것으로, -∞에서 1의 범위로 계산되며, NSE=1인 경우는 실측치와 완벽하게 일치하는 것을 나타낸다. PBIAS는 실측치로부터의 상대적인 오차를 나타내는 것으로, 양수는 모의치가 과대산정된 경우이고, 음수는 모의치가 과소산정된 것을 의미한다. Table 5은 모형평가를 위해 널리 적용되는 각 통계변수들의 범위와 참고문헌을 보이고 있다.

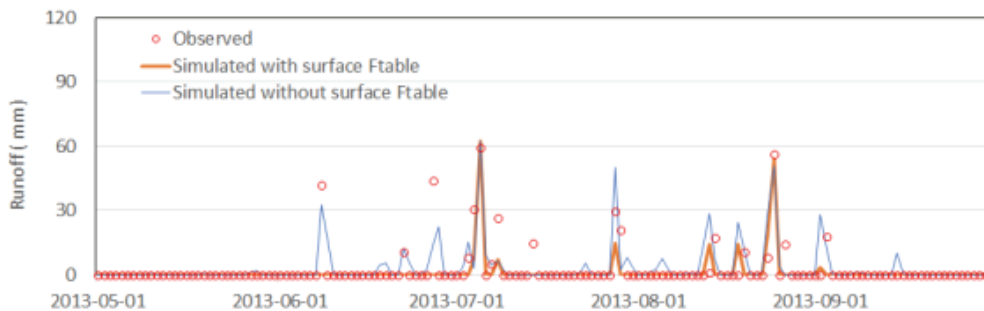
III. 결과 및 고찰

1. 시험포장 모의 결과

새만금 유역의 익산시험포장에 대한 모델링 결과는 Fig. 5와 같다. 7월 중간낙수기간의 담수심을 포함하여 전반적인 논 담수심을 구현하는데 있어, Surface-Ftable을 적용한 방법이 기존의 논의 저류기작을 고려하지 않은 모의에 비해 그 재현성이 크게 개선된 것으로 평가되었다. 다만, Surface-Ftable을 적용한 모의 담수심은 최대 7cm 정도로 물꼬높이와 일치하는 것으로 모의되었으나, 실측 담수심의 경우 6월말, 7월초, 8월말에 8cm를 넘는 경우가 관측되었는데 이는 시험포장의 물꼬가 실험설계와 달리 부유물로 인해 높이가 일시적으로 변한 상황 또는 현장의 모니터링 불확실성으로 이해되어야 할 것



A. Paddy depth comparison



B. Runoff depth comparison

Fig. 5 Comparison of observed and simulated paddy depths and discharge heights according to applying Surface-Ftable at SP#1

으로 판단된다.

논 유출고는 Surface-Ftable을 적용할 경우, 일정수준 이하의 강우에 대해서는 논의 저류효과로 인해 유출이 없거나, 유출이 적게 나타나 관측치의 경향을 잘 따르는 것으로 확인되었다. 또한, 논유출이 발생하는 일정 수준 이상의 강우에 대해서는 실측유량에 대한 모의성능이 높은 것으로 나타났다. Surface-Ftable을 적용하지 않은 경우 논 담수심은 대부분 실측치보다 낮게 모의되는 결과를 보이고 논 유출은 과대산정되는 것으로 나타났다.

시험논포장에서의 연도별 물수지는 Table 6과 같다. 지표 유출량은 전체 유입량 대비 (강우량 + 관개량) 모의치가 10~18%의 수준으로 계산되었고, 실측치의 경우 23~30% 수준으로 나타나 지표유출 모의치가 다소 작게 계산되었다. 이것은 Fig.5 에서 볼 수 있듯이, 대규모 사상에 대한 재현성에 비해 중간규모의 호우사상에 대한 지표유출 재현성이 다소 부족하여 기인한 것으로 판단된다. 한편, 중간유출과 지하수유출까지 고려한 논시험포의 전체 유출율은 연도별 시험포장별로

55~62%의 범위로 계산되었다. 이는 국내 논시험포 연구들 (Cho and Choi, 2001; Cho and Han, 2002; Yoon et al., 2006; Cho et al., 2008)에서 보여준 50~67%의 유출율과 비슷한 수준으로 평가되며, Surface-Ftable을 적용한 논담수 물수지 모의결과의 타당성을 강화시켜 주는 것으로 나타났다.

2. 유역모형 적용 결과

논의 저류기작을 고려한 유역모델링의 선정된 소유역 검·보정 지점에 대한 오차 통계 결과는 Table 7에 정리하였다. 전주 지점의 유량보정 결과 총유량오차가 각각 7.13%, 고유량 오차가 -1.73%, 저유량오차가 14.54%로 산정되었다. 또한, R²와 NSE 등의 오차 통계변수들은 월별로 각각 0.96과 0.94로 계산되어 “아주 좋음” 수준으로 보정이 이루어진 것으로 평가되었다. 정읍지점의 경우 실측치와 유량오차가 9.68%로 나타났다. 일별 R²와 NSE의 통계변수도 각각 0.78, 0.68, 월별로는 0.90과 0.90으로 계산되어 “아주 좋음” 수준의 보정결과를 나타냈다.

Table 6 Simulated water balance in the test paddy plot

Study Plot	Year	Rainfall (mm)	Surface Runoff (mm)		Interflow + Groundwater (mm)	Runoff Ratio* (%)	Actual ET (mm)	Irrigation (mm)
			Sim.	Obs.				
SP1	2013	1076.8	205.9	416.2	707.1	55.5	750.2	567.8
	2014	1071.5	292.8	494.5	951.3	60.3	757.2	991.7
	Mean	1074.0	249.4	455.4	829.2	58.2	753.7	779.7
SP5	2013	1076.8	152.5	384.8	749.1	55.2	751.2	555.2
	2014	1071.1	403.1	645.0	956.0	62.3	757.2	1109.6
	Mean	1074.0	277.8	514.9	852.6	59.3	754.2	832.4

*Runoff ratio was calculated by the formula here: (Surface Runoff + Interflow + Groundwater)/(Precipitation + Irrigation) * 100

Table 7 Calibration and validation results in the study watersheds

Statistics		Calibration		Validation	
		Jeonju	Jeongeup	Hyoja	Gongpyung
Total volume error (PBIAS, %)		7.13	9.68	-9.90	-1.86
High10 error (%)		-1.73	-7.62	-16.24	-9.99
Low50 error (%)		14.54	16.55	15.25	25.22
Daily	R ²	0.82	0.78	0.82	0.67
	RMSE	13.36	8.76	8.10	10.97
	NSE	0.81	0.68	0.79	0.55
	RSR	0.43	0.57	0.46	0.67
Monthly	R ²	0.96	0.90	0.96	0.84
	RMSE	3.11	2.14	2.28	2.61
	NSE	0.94	0.90	0.91	0.84
	RSR	0.24	0.32	0.41	0.41

Fig. 6과 Fig. 7은 두 소유역의 보정 지점에 대한 일단위 실측 및 모의 시계열 등을 비교한 그래프를 담고 있다. 두 지점에 대해 대부분 강우 사상에 대한 첨두유량을 합리적으로 반영하는 것으로 보이나, 2011년 여름의 호우사상에 대해서는 과대산정하는 결과를 보였다. 2011년을 제외한 실측유량 자료의 저유량비교에서도 합리적인 수준에서 모의치가 실측치를 반영하는 것으로 평가되었다. 2011년의 경우 실측유량

이 호우사상을 제외하면 “0”또는 “0”에 가까운 값을 나타내는데, 이는 2011년 당시 실측유량 지점의 현장여건, 즉 하천공사나 수위계 유지관리 등에 관한 자료확보를 통해 유량자료의 조정이 필요할 것으로 판단된다. Table 8은 검·보정 지점에 대한 모의기간의 실측 및 모의 유출률을 소유역별로 비교한 것으로, 보정지점인 전주와 정읍의 경우 연도별로 0.6~6.4%와 0.8~21.2%의 편차를 보였지만, 2009년부터 2013년까지의

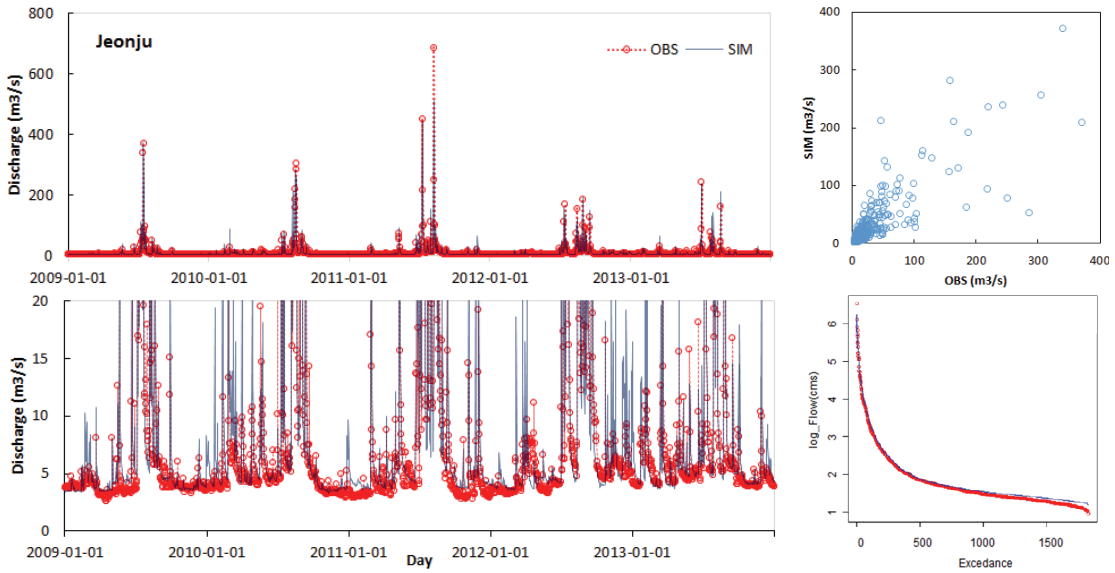


Fig. 6 Calibration results for the discharge at Jeonju station, The upper time-series shows all the discharge including the peaks and bottom one zooms in the low-flow, The scatter plot compares observed and simulated discharge and the flow exceedance plot presents discrepancy in between overall flow regime including high, medium, and low flow during the simulation period

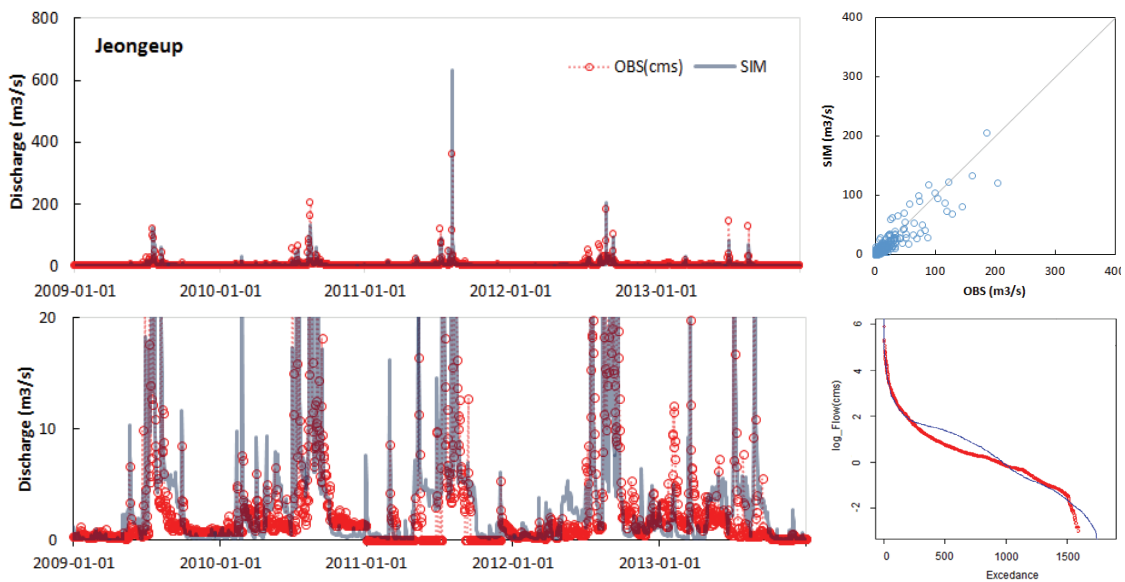


Fig. 7 Calibration results for the discharge at Jeongeup station, Plot descriptions are same as in Fig. 6

Table 8 Calculated runoff ratios at discharge stations

Stations		Year	2009	2010	2011	2012	2013	
Calibration	Jeon -ju	Precipitation (mm)	1163.9	1462.8	1621.8	1359.7	1264.7	
		Water intake from outside of watershed(mm)	445.07	458.73	463.91	468.56	480.64	
		Runoff ratio(%)	Sim.	64.3	69.5	75.0	73.1	64.7
		Obs.	64.9	66.3	78.7	68.7	58.3	
	Jeong -eup	Precipitation (mm)	1401.2	1749.3	1654.0	1473.9	1062.4	
		Runoff ratio(%)	Sim.	52.0	60.7	75.6	56.7	54.7
Obs.		41.6	61.5	54.4	69.5	57.3		
Validation	Hyo -ja	Precipitation (mm)	1163.9	1462.8	1621.8	1359.7	1264.7	
		Runoff ratio(%)	Sim.	47.2	56.6	64.3	60.0	48.1
		Obs.	61.0	79.1	78.9	58.3	57.3	
	Gong- pyung	Precipitation (mm)	1401.2	1749.3	1654.0	-	-	
		Runoff ratio(%)	Sim.	44.8	56.0	70.4	-	-
		Obs.	53.8	58.7	62.8	-	-	

평균 유출율은 모의치가 각각 69.3%와 59.9%, 실측치가 67.4%와 56.9%로 계산되어 장기간 유출율의 모의결과는 실측 연평균 유출율을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 검정지점 들인 효자와 공평지점들에서도 연평균 모의 유출율은 각각 55.2%와 57.1%, 실측 유출율은 66.9%와 58.4%로 계산되어 모형의 적용성을 보여주고 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 두 소유역의 검정 지점에 대한 일단위 실측 및 모의 시계열 등을 비교한 그래프를 담고 있다. 효자 지점의 경우 전주지점의 상류에 위치하고 검정에 이용된 지점으로, 전주 지점이 충분한 수준으로 보정이 완료되었음에

도 효자 지점의 총유량과 고유량이 다소 과소모의되는 결과가 나타났다. 이는 호우사상에 의한 유출이 상대적으로 적게 나타난 결과로 판단된다. 효자 지점의 실측유량에 대한 2009년~2013년에 대한 연도별 유출율은 약 60~80%로 계산되고 있는데, 이는 상류에 위치한 총 저수량 50만톤 이상의 저수지들 (안덕, 구이, 광곡)의 물이용을 고려할 때, 상대적으로 과대 산정된 것으로 판단된다. 특히, 구이 저수지의 경우 총 저수량이 11,639만톤으로 3,432 ha의 농경지에 용수를 공급하고 있는데, 농경지로 용수가 공급되면 증발산으로 소비되어 유출에 기여가 작아지기 때문에 판단된다. 향후 수위-유량자료

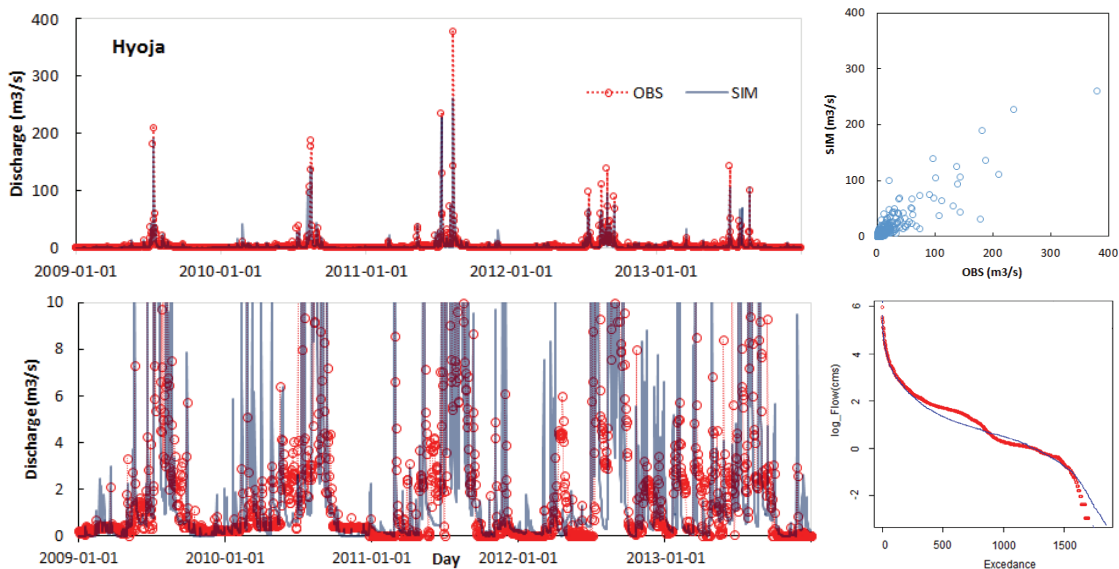


Fig. 8 Validation results for the discharge at Hyoja station

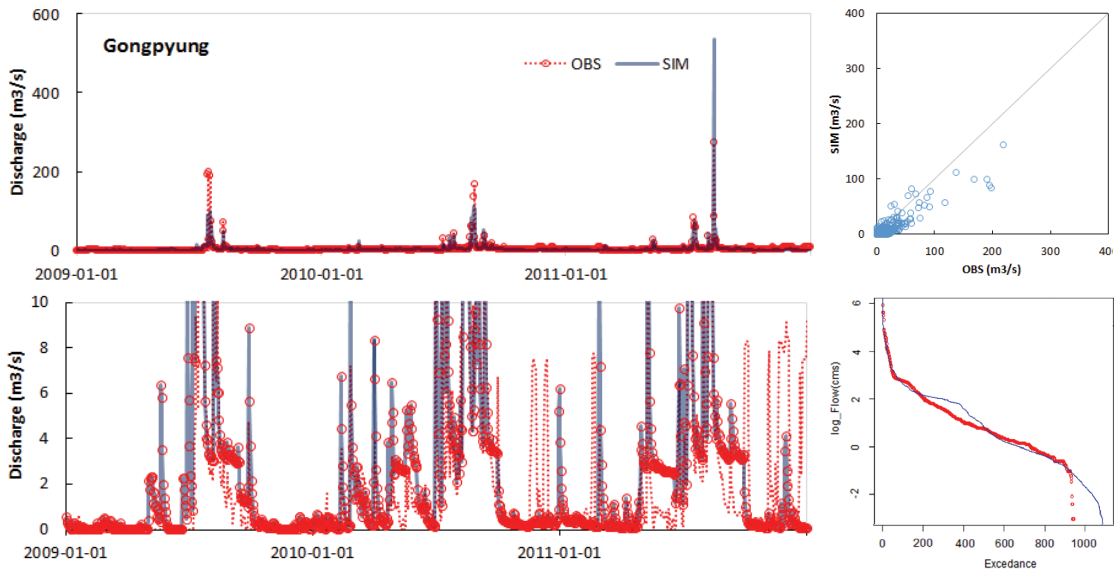


Fig. 9 Validation results for the discharge at Gongpyung station

의 보완 및 저수지 운영자료 구축을 통한 보완이 필요할 것으로 평가된다. 오차 통계변수별로 PBIAS 는 “적절”과 R²와 NSE는 “아주좋음” 수준으로 평가되어 전반적으로 효자지점의 검정결과는 적절한 수준으로 평가된다.

공평 지점의 경우 정읍 지점에 대해 보정된 모형의 검정을 위한 유량측점으로 적용되었으며, 정읍 지점과 일관된 좋은 수준의 검정결과를 보였다. 계산된 통계변수들은 “아주좋음” 수준의 결과를 나타내었다. 다만, 2011년에 발생한 무강우시 유출반응은 공평 지점의 상류에 위치한 50만톤 이상의 저수지들(입암, 용산, 내장, 부전)의 인위적인 조작으로 인하여 사료되며, 향후 저수지별 방류량자료가 보완되고 추가적으로 구축될 경우 보다 상세한 유량모의가 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.

3. 논리의 저류효과를 고려한 유역수문모델링 결과 비교

Surface-Ftable을 적용시 논리의 수문요소 모의결과 변화에 대해 관찰하기 위해 저류효과를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하였다 (Table 9). 본 연구에서 구축한 전주천 유역모형에서 지표유출 부분에 Surface-Ftable을 적용하지 않은 기존의 방법으로 단순 치환하여 모의결과를 비교·평가하였다. 더불어 유역모형 관개량의 경우 기존 연구(KRC, 2016; 2017)의 모의 가정을 적용하였으며, 영농기 관행 물관리 방법을 일률적으로 적용하여 연 관개량은 동일하다. 모의결과, 논리의 저류효과를 고려할 경우 논에서의 지표유출 즉, 논 물꼬를 통한 유출이 저류효과를 적용하지 않은 경우 대비 평균 약 20% 수준으로 작게 나타나는 한편, 중간유출과 기저유출이

각각 45%와 8.5% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 증발산량의 경우 연도별로 약 12~16 %가 증가되었고, 논에서의 유출률의 경우 평균적으로 약 5.2% 정도가 감소되어, 논 저류효과에 따른 수문요소들이 합리적으로 모의되는 것으로 판단되었다.

Fig. 10은 논리의 Surface-Ftable의 적용에 따른 전주 지점에서의 유량비교를 보여주고 있다. 분석 결과, 고유량의 경우 전반적으로 논 저류효과를 고려할 경우가 고려하지 않을 경우에 비해 낮게 모의되었으며(Fig. 10A), 저유량의 경우에는 그 반대 양상의 결과를 보였다. 이는 논리의 저류효과로 인해 침투유량이 감소되고, 중간 및 기저유출이 증가하여 저유량에 기여하는 부분이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 평가는 수문곡선(e.g., Fig. 10B)에서도 확인되는데, 7월10일의 침투유량이 Surface-Ftable을 적용할 경우 그렇지 않은 경우에 비해 감소하였으며, 이 후 논리의 저류량이 중간 및 기저유출에 미치는 영향으로 하천저유량이 다소 크게 모의된 것으로 평가된다.

본 연구에서는 HSPF 최신버전에서 갱신된 Surface-Ftable을 이용한 논 저류효과를 고려가 유역모델링에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해 여타 자동보정 등의 모델링 과정과 입력자료를 기존 연구(KRC, 2016)와 동일하게 적용하여 결과를 비교하였다. Table 10은 각 지점에 대한 두 가지 경우의 모델링 결과를 적용한 오차 통계를 비교한 표이다. 각 유량 지점별로 총 유량오차 (PBIAS)와 일별 및 월별 NSE 값을 비교한 결과 PBIAS의 경우 본 연구 결과의 오차율이 다소 증가하는 것으로 나타났지만 그 크기가 작고 일별 NSE의 경우

Table 9 Comparison of simulated water balance components by the surface Ftable implementation in Jeonju–chun watershed

Treatment	Year	Rainfall (mm)	Surface Runoff (mm)	Inter–flow (mm)	Ground–water (mm)	Runoff Ratio* (%)	Actual ET (mm)	Irrigation (mm)
Surface Ftable implemented	2009	1144,6	110,1	954,2	287,6	59,7	788,7	1120,0
	2010	1442,6	172,4	1220,3	289,0	65,9	783,4	1120,0
	2011	1560,9	239,3	1314,3	273,3	68,5	738,6	1120,0
	2012	1342,7	33,7	1256,6	248,3	62,9	830,6	1120,0
	2013	1321,6	64,0	1182,0	236,0	61,1	830,0	1120,0
	Mean	1362,5	123,9	1185,5	266,8	63,8	794,3	1120,0
Conventional	2009	1144,6	512,5	675,4	271,9	64,5	694,1	1120,0
	2010	1442,6	662,8	874,7	265,6	70,4	667,1	1120,0
	2011	1560,9	842,7	873,9	248,3	73,3	616,9	1120,0
	2012	1342,7	672,2	779,7	223,1	68,0	713,9	1120,0
	2013	1321,6	562,6	839,1	220,2	66,4	719,5	1120,0
	Mean	1362,5	650,6	808,6	245,8	68,7	682,3	1120,0

*Runoff ratio was calculated by the formula here: (Surface Runoff + Interflow + Groundwater)/(Precipitation + Irrigation) * 100

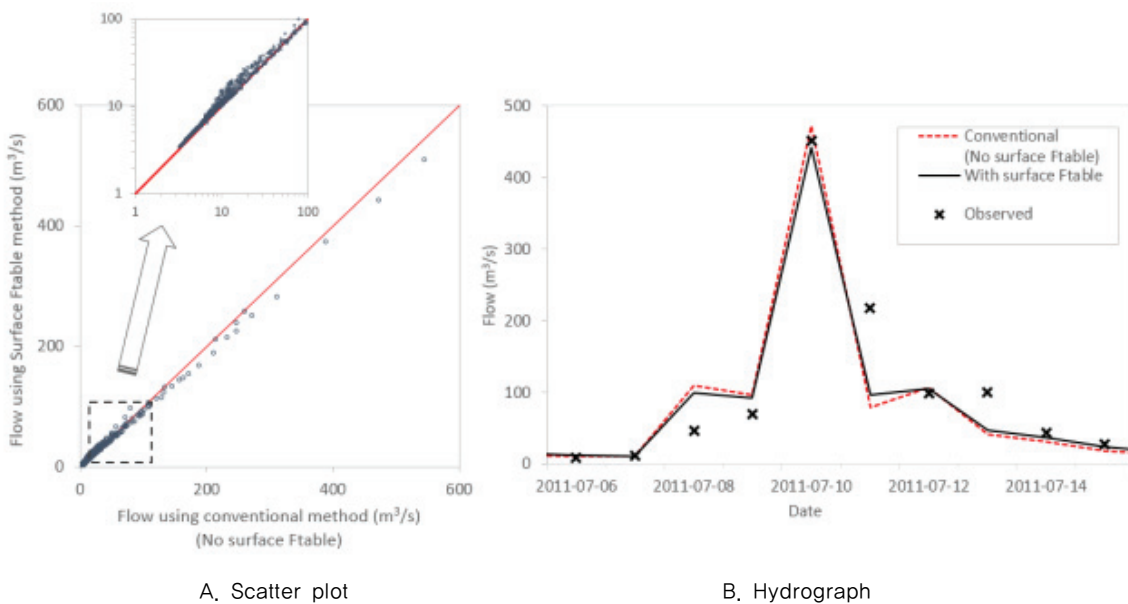


Fig. 10 Comparison of stream flow simulation results at Jeonju station in regards to the surface–Ftable implementation

Table 10 Comparative evaluation of model performance in this study to previous research by KRC(2016)

station	PBIAS		Daily NSE		Monthly NSE	
	KRC(2016)	this study	KRC(2016)	this study	KRC(2016)	this study
Hyoja	-9,21	-9,9	0,78	0,79	0,92	0,91
Jeongeup	8,79	9,68	0,48	0,68	0,89	0,90
Jeonju	6,67	7,13	0,78	0,81	0,94	0,94
Gongpyung	-1,6	-1,86	0,41	0,55	0,84	0,84

모든 유량측점에서 증가하는 것으로 나타났다. 전주천 유역의 경우 전주와 효자지점의 일별 NSE는 0.01과 0.03 만큼 개선되는 것으로 계산되었으며, 정읍천 유역의 정읍과 공평지점은 각각 0.20과 0.14 씩 개선되는 것으로 나타났다. 이는 논 농경지가 차지하는 비율이 정읍천유역의 경우 22%로서 12.5%를 차지하는 전주천유역에 비해 거의 두배에 육박하는 점을 고려하면, 전주와 효자지점의 일별 NSE 개선폭이 정읍과 공평지점에 비해 상대적으로 적은 것이 설명된다. 다만, 월별 NSE 에 대해서는 논 저류효과 모의에 따른 영향이 미미한 것으로 계산되었다. 이는 NSE 통계변수의 특성상 고유량(또는 침투유량) 값의 유사성이 클수록 더 나은 NSE 값이 계산되게 되는데, 실측 및 모의 월단위 유량자료의 비교에서는 논 저류효과로 인한 월평균 유량값의 민감도가 상대적으로 작아 월별NSE 의 계산에 미미한 영향을 미친 것으로 판단된다. 일별 NSE의 개선은 논 저류효과를 유역모델링에 반영하여 강우에 따른 유출의 시간적 패턴이나 크기가 실측치에 더 부합하도록 모의되는 것으로 판단할 수 있다. 따라서, 논 농경지가 주요 토지이용인 경우 Surface-Ftable을 적용하면 유역모형의 유량 재현성이 증가할 것으로 기대된다.

IV. 요약 및 결론

논 저류효과를 모의하기 위해 최신 HSPF 모형의 지표유출 모의 방법 중 하나인 Surface-Ftable 방법을 포장단위 및 유역단위 모델링에 적용하였다. 새만금 유역내 위치하는 익산지역 시험포장의 2013년과 2014년 모니터링 자료를 수집하고 이를 적용하여 포장단위 모델링을 실시한 결과 Surface-Ftable 적용시 논 저류효과가 반영된 담수심과 유출고 실측치에 대한 재현성이 크게 개선된 것으로 나타났다. 더불어 포장단위 보정을 통해 구성된 Surface-Ftable의 유역단위 모델링에 대한 적용성을 검토하기 위해 새만금 유역의 지류 하천인 전주천과 정읍천 유역에 대해 수문자동보정을 수행하였다. 각 소유역의 2개 지점에 대해 2009년부터 2013년 자료를 보·검정에 적용하여 모형의 적용성을 평가하였다. 전주와 정읍 지점의 보정결과 PBIAS가 7.13%, 9.68%, 월별 NSE가 0.94, 0.90으로 계산되어 “아주 좋음”수준으로 나타났고, 효자와 공평 지점의 검정결과 “적절” 또는 “아주 좋음” 수준으로 평가되어 논 저류효과를 모의하기 위한 Surface-Ftable의 적용이 고려하지 않은 경우(기존 연구결과)와 비교하여 유량재현성을 개선시키는 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 논 저류효과가 유역의 수문해석에 물리적으로 고려되는 것이 유의하다는 결과를 도출하였다. 단, Surface-Ftable의 도입이 수질 모의결과에 대해서도 직접적인

모의성능 개선에 영향을 미친다고 판단하는 것은 무리이다. Surface-Ftable이 수문측면에서는 저류효과를 나타내지만 수질반응에 있어서 Surface-Ftable이 담수시의 수질거동을 직접적으로 고려하지 않기 때문이다. 그러나 논 유출기작을 현실적으로 모사되기에 논에서의 배출부하량의 산정 결과에 대한 신뢰성은 제고될 것으로 판단된다. 향후 논과 습지 등 저류형태가 포함된 유역의 합리적인 비점오염모의 또는 수질관리평가를 위해서는 양적·질적 물순환 해석을 위한 모델링의 지속적 보완이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 운영되는 한국연구재단 기초연구사업의 지원(2016RIC1B1010074)과 한국농어촌공사 농어촌연구원의 연구지원을 받아 수행되었음.

REFERENCES

1. Cho, J. Y., and J. K. Choi, 2001. Nitrogen and phosphorus losses from a broad paddy field in central Korea. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32(15-16): 2395-2410. doi:10.1081/CSS-120000380
2. Cho, J. Y., J. K. Son, C. H. Song, S. A. Hwang, Y. M. Lee, S. Y. Jeong, and B. Y. Chung, 2008. Integrated nutrient management for environmental-friendly rice production in salt-affected rice paddy fields of Saemangeum reclaimed of South Korea. *Paddy and Water Environment* 48(3): 301-306. doi:10.1007/s10333-008-0124-z
3. Cho, J. Y., and K. W. Han, 2002. Nutrient losses from a paddy field in central Korea. *Water Air Soil Pollution* 134: 215-228. doi:10.1023/A:1014119807982
4. Kim, N. W., S. C. Shin, and Y. S. Won, 2005. Development of SWAT-AGRIMAN model. *Proceedings of Korean Water Resources Association* (in Korean).
5. Kim, N. W., K. W. Park, and C. K. Kim, 2010. Application of SWAT-AGRIMAN. *Magazin of Water Resources Association* 43(7): 25-30 (in Korean).
6. Kim, M. K., S. I. Kwon, G. B. Jung, S. C. Hong, M. J. Chae, S. G. Yun, and G. H. So, 2013. Small-scale pond effects on reducing pollutants load from a paddy field. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 32(4): 355-358 (in Korean).

7. Seo, C. S., S. W. Park, S. M. Kim, M. S. Kang, S. J. Lim, and K. S. Yun, 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).
8. Seong, C. H., S. Hwang, C. S. Oh, and J. P. Cho, 2017. Developing surface water quality modeling framework considering spatial resolution of pollutant load estimation for Saemangeum using HSPF. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 59(3): 83-96 (in Korean).
9. Yoon, C. K., B. H. Kim, J. H. Joen, and H. S. Hwang, 2002. Characteristics of pollutant loading from paddy field area with Groundwater irrigation. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 44(5): 116-126 (in Korean).
10. Yoon, K. S., J. Y. Cho, J. K. Choi, and J. G. Son, 2006. Water management and N, P losses from paddy fields in Southern Korea. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 42(5): 1205-1216. doi:10.1111/j.1752-1688.2006.tb05295.x
11. Jeon, J. H., J. K. Choi, K. S. Yoon, and C. K. Yoon, 2005. The comparison of water budget and nutrient loading from paddy field according to the irrigation methods. *Korean Journal of Limnology* 38(1): 118-127 (in Korean).
12. Jeon, J. H., G. Y. Chun, A. S. Donigian, 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 (in Korean).
13. KRC (Korea Rural Community Corporation), 2015. Assessing the agricultural non-point source pollution reduction measures of the Saemangeum watershed using watershed modeling, *Research Report*.
14. KRC (Korea Rural Community Corporation), 2016. Water quality assessment considering the role of reclaimed agricultural land in Saemangeum watershed, *Research Report*.
15. KRC (Korea Rural Community Corporation), 2017. Water quality assessment considering the land-use scenarios and water management of reclaimed agricultural land in Saemangeum, *Research Report*.
16. MOE (Ministry of Environment), 2014. Modeling framework for assessing water quality in the Saemangeum watershed (II).
17. MOE (Ministry of Environment), 2015. Modeling framework for assessing water quality in the Saemangeum watershed (III).
18. Seong, C., Y. Her, and B. L. Benham, 2015. Automatic calibration tool for hydrologic simulation program-FORTRAN using a shuffled complex evolution algorithm. *Water* 7(2): 503-527. doi:10.3390/w7020503
19. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), 2001. Hydrological Simulation Program - Fortran (HSPF) User's Manual Version 12, Washington, D.C., USA.