



HWSD와 정밀토양도를 이용한 유출해석시 토양 매개변수 특성 비교 평가

Soil Related Parameters Assessment Comparing Runoff Analysis using Harmonized World Soil Database (HWSD) and Detailed Soil Map

최윤석* · 정영훈**† · 김주훈* · 김경탁*

Choi, Yun Seok · Jung, Young Hun · Kim, Joo Hun · Kim, Kyung-Tak

Abstract

Harmonized World Soil Database (HWSD) including the global soil information has been implemented to the runoff analysis in many watersheds of the world. However, its accuracy can be a critical issue in the modeling because of the limitation the low resolution reflecting the physical properties of soil in a watershed. Accordingly, this study attempted to assess the effect of HWSD in modeling by comparing parameters of the rainfall-runoff model using HWSD with the detailed soil map. For this, Grid based Rainfall-runoff Model (GRM) was employed in the Hyangseok watershed. The results showed that both of two soil maps in the rainfall-runoff model are able to well capture the observed runoff. However, compared with the detailed soil map, HWSD produced more uncertainty in the GRM parameters related to soil depth and hydraulic conductivity during the calibrations than the detailed soil map. Therefore, the uncertainty from the limited information on soil texture in HWSD should be considered for better calibration of a rainfall-runoff model.

Keywords: Detailed soil map; Distributed Hydrologic Model; GRM, HWSD; Rainfall-runoff; Soil related parameter

1. 서론

홍수해석을 위해서는 수치지형도, Digital Elevation Model (DEM) 등을 이용해서 대상 유역의 수문학적 지형인자를 산정하고, 토지피복 및 토양 속성을 이용해서 홍수추적과 침투량 계산 등에 필요한 매개변수를 추출해야 한다. 이때 토양 속성은 유효수량 산정을 위한 침투량, 지표하 유출 및 기저유출의 계산을 위한 매개변수로 이용된다. 우리나라의 경우 대상 유역 토양의 물리적 속성 정보를 구축하기 위해서 주로 정밀토양도를 이용하고 있다. 그러나 북한과 같은 비접근 지역이나, 지상 관측에 의한 자료가 부족한 해외 지역에 대한 유출해석을 위해서는 대상 지역에 대한 상세한 자료를 얻기 어려우므로, 전지구적 토양정보를 이용하는 것이 대안이 될 수 있다. 본 연구에서는 전지구 토양정보 중 Harmonized World Soil Database (HWSD, FAO et al., 2009)의 적용성을 평가하였다.

우리나라에서 유출해석시 일반적으로 이용할 수 있는 토

양도는 개략토양도와 정밀토양도가 있다 (Kim, 1998). 이 중 정밀토양도는 현지조사를 위주로 작성된 것으로 우리나라의 토양을 토양통, 토양구, 토양상으로 구분하고 있으며, 가장 작은 단위인 토양상별 물리적 특성을 포함하고 있다 (NAS, 1992; Choi, 2010). 이에 따라 유출해석시 토양도의 활용에 대한 기존의 연구에서는 항공사진 해설위주의 개략 토양도보다는 토양의 물리적 특성을 상세히 반영할 수 있는 정밀토양도를 이용해야 함을 제시하고 있다 (Jung et al., 1995; Kim, 2003; Kim and Choi, 2004; Choi, 2010).

HWSD는 Food and Agriculture Organization of the United Nations (UN FAO)와 International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Institute of Soil Science-Chinese Academy of Science (ISSCAS), Joint Research Centre of the European Commission (JRC) 등으로부터 제공되는 지역별 토양 데이터베이스를 조합해서 만들어 졌다 (FAO et al., 2009). HWSD는 약 1 km (30 arc-second)의 해상도를 가지며, 토양별 구성 성분과 물리적 특성을 포함하고 있다. 국외의 경우 전지구적 수문 모델링에서 토양자료가 미치는 영향 평가 (Christian et al., 2016) 및 토양특성 분석 (Todd-Brown et al., 2013; Kochy et al., 2015), 정밀한 토양자료가 구축되어 있지 않은 지역의 유출 해석 HWSD가 활용되고 (Abdelhamid et al., 2011; Elena et al., 2013; Xianwu et al., 2013; Yassine et al., 2016) 있으나, 국내에서는 아직 이에 대한 적용 및 평가가 부족한 실정이다. 앞에서 언급한 토양정보는 강우유출모의의 입력자료로 많

* Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

** Water Resources Research Center, K-water Institute

† Corresponding author

Tel.: +82-42-870-7473 Fax: +82-42-870-7499

E-mail: younghun@kwater.or.kr

Received: July 4, 2016

Revised: July 25, 2016

Accepted: July 27, 2016

이 사용된다. 강우유출 모형들 가운데 GRM (Grid based Rainfall-runoff Model) 모형은 Green-Ampt 모형을 이용해서 침투 과정을 모의한다. Green-Ampt 모형은 토양에서의 침투과정을 모의하기 위해서 수리전도도, 공극률, 습윤전선 흡인수두 등과 같은 토양의 물리적 특성을 이용한다. Rawls et al. (1983)은 미국의 약 5,000개의 토양을 분석하고 11개의 토성 (soil texture)에 대한 Green-Ampt 모형의 매개변수를 제시한바 있으며, 일반적으로 유출해석 시점에서의 토양포화도를 결정하는 초기수분함량을 제외한 모든 매개변수는 Rawls et al. (1983)의 연구결과를 이용하고 있다. 이때 토양의 물리적 특성을 이용한 침투해석에 대한 기존의 연구 (Park and Hur, 2008; Jung et al., 2008; Choi et al., 2012; Noh et al., 2014)에서는 유역특성과 수문사상별로 초기포화도, 수리전도도, 유효토심 매개변수가 변동성과 민감도가 큰 것으로 알려져 있으며, 유출해석시의 주요한 보정대상 매개변수이다.

이와 같이 HWSD와 정밀토양도를 이용한 기존의 연구에서는 각 연구 대상 지역에서 가용한 자료를 이용하여 유출해석을 수행하였으며, 해당 지역의 실측 토양자료와 HWSD를 비교분석한 유출해석 연구는 미진하였다. 본 연구의 목적은 (1) 대상 유역에서의 HWSD와 정밀토양도의 속성분포를 비교함으로써 HWSD 자료의 특성을 분석하고, (2) 두 토양자료를 이용한 유출해석 결과를 비교함으로써 HWSD를 이용한 유출해석시의 토양과 관련된 매개변수의 특성을 평가하고자 한다.

II. 연구 방법 및 자료 구축

1. 대상 유역

대상 유역은 낙동강의 지류인 내성천의 향석 수위관측소 유역 (Fig. 1)으로 선정하였다. 향석 유역의 면적은 1,514 km²로 비교적 커서 분포형 모형의 공간 해상도를 500 m로 적용할 수 있으며, HWSD 원시 자료의 공간 해상도가 약 1 km 인 것을 고려할 때 원시자료의 큰 변형 없이 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 향석유역은 대부분이 산지 (62%)와 농지 (32%)로 이루어져 있으며, 영주시, 예천군을 포함하고 있다. 향석 유역 인근에는 14개의 강우관측소 (봉화, 부석, 영주, 석현, 예안2, 명호, 풍기, 희방, 시항, 월포, 풍산, 동로1, 동로2, 지보)가 있으며, 본 연구에서는 향석 유역의 강우관측소 강우량과 비슬산 강우레이더 자료를 적용하였다.

2. 수문학적 모형 및 입력자료 구축

유출해석 모형은 한국건설기술연구원의 물리적 분포형 모형인 GRM을 적용하였다. GRM은 운동파 모형을 이용해서 지표면 유출 (식 (1)), 하도유출 (식 (2)), 지표하 유출을 계산하고, 침투는 Green-Ampt 모형 (식 (3)-(4))을 이용한다. 유효강우량 산정을 위해서 침투초과유출과 포화초과유출을 계산하고, 기저유출은 Darcy의 법칙을 이용한다 (KICT, 2011).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r - f + \frac{q_r}{\Delta y} \quad (1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = r \Delta y + q_L + q_{ss} + q_b \quad (2)$$

여기서,

- q : 단위 폭당 유량 ($q = uh$)
- u : x 방향 유속
- r : 강우강도
- f : 침투율
- A : 하도 단면적
- q_r : 복귀류
- A : x 방향에 직각인 단면적
- Q : 유량
- h : 수심
- q_L : 지표면 흐름에 의한 측방유입
- q_{ss} : 하도로 유입되는 지표하 유출
- q_b : 기저유출
- t : 시간

$$F(t) = Kt + \Delta\theta\psi \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\Delta\theta\psi}\right) \quad (3)$$

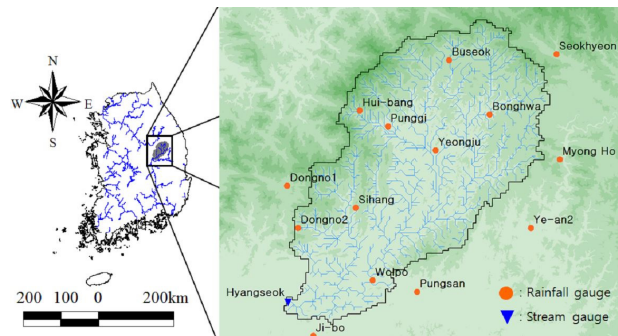


Fig. 1 Study area location and hydrometric stations

$$f(t) = K \left(\frac{\psi \Delta \theta}{F(t)} + 1 \right) \quad (4)$$

여기서,

$F(t)$: t 시간에서의 누가침투량

$f(t)$: t 시간에서의 침투율

$\Delta \theta$: 토양수분함량변화 ($\Delta \theta = (1 - S_e) \theta_e$)

S_e : 유효포화도 ($S_e = (\theta - \theta_r) / (\eta - \theta_r)$)

θ : 수분함량 ($\theta_r \leq \theta \leq \eta$)

θ_r : 잔류 수분함량 ($\theta_r = \eta - \theta_e$)

η : 공극율

θ_e : 유효공극율

ψ : 습윤전선흡인수두

K : 수리전도도

본 연구에서는 오픈소스 GIS인 MapWindow (MW)의 플러그인으로 실행되는 GRM인 MW-GRM (KICT, 2016)을 이용하였다. MW-GRM을 실행하기 위해서는 유역, 흐름방향, 흐름누적수, 하천망, 경사, 토지피복, 토성, 토양심 레스터 레이어가 필요하다. 본 연구에서는 Table 1과 Fig. 2에서와 같이 DEM, 환경부 대분류 토지피복도, 농업과학기술원 정밀토양도, HWSD를 이용해서 향석 유역에 대한 입력자료를 500 m 공간 해상도로 구축하였다.

강우사상은 2008년~2012년 사이에 비교적 큰 홍수량을 나타낸 4개의 사상을 Table 2에서와 같이 선정하였다. Event1~Event3은 향석 유역의 강우관측소에서 관측된 강우량을 티센 폴리곤을 이용해서 유역 평균강우량으로 계산하였으며, Event4는 비슬산 강우레이더에서 관측된 비차등위상차 (specific differential phase, KDP)로부터 추정된 강우량(RKDP)을 지상관측소 강우량을 이용

Table 1 GRM model input data and sources

Source data	Data property	Remark
DEM	Watershed	Watershed area
	Flow direction	Calculated by D-8 method
	Flow accumulation	
	Stream	
	Slope	Gradient slope of rise/run
Land cover map	Land cover	7 attributes (Urban/dry, Crop, Forest, Grass, Wet land, Bare, Water) land cover map from Ministry of Environment, Korea.
Detailed soil map	Soil texture	
	Soil depth	
HWSD	Soil texture	
	Soil depth	

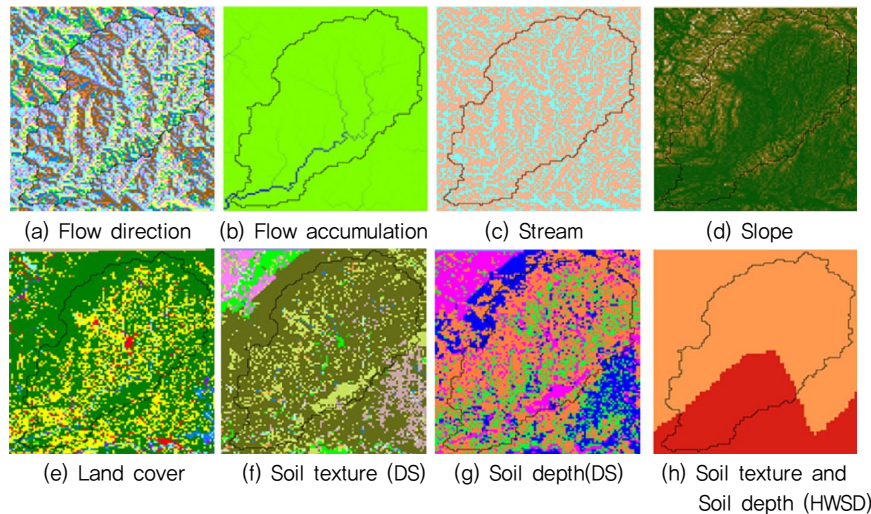


Fig. 2 GRM model input Geographic data (DS : detailed soil map)

Table 2 Storm events

Events	Event Periods	Rainfall (mm)	Peak flow (m ³ /s)	Time interval (min)	Remark
Event1	2008.07.24. 20:00 – 2008.07.27. 07:00	128	1,619	60	· Mean areal precipitation using Thiessen method
Event2	2009.07.12. 03:00 – 2009.07.14. 09:00	85	847	60	
Event3	2009.07.14. 14:00 – 2009.07.16. 23:00	86	1,310	60	
Event4	2012.09.16. 16:00 – 2012.09.20. 12:00	89	716	10	· Calibrated RKDP from rainfall radar · Spatially distributed

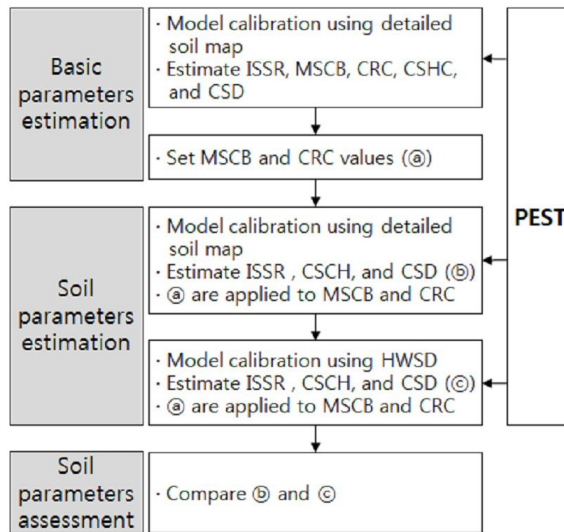


Fig. 3 Soil parameters assessment procedure

해서 보정된 자료를 이용하였다. 비슬산 강우레이더의 강우량 산정 및 보정에 대해서는 MLTMA (2011)를 참고할 수 있다.

3. 분석 방법

본 연구에서는 GRM 모형의 보정을 위해서 범용 최적화 모형인 PEST (model-independent parameter estimation) (Doherty, 2009; Noh et al., 2013)을 이용하였다. 일반적인 유출해석에서는 실측자료를 구하기 어렵거나, 불확실성과 민감도가 큰 매개변수를 대상으로 모형을 보정한다. GRM 모형에서 보정이 가능한 주요 매개변수는 하도 최소경사, 하폭과 같은 지형관련 매개변수, 불투수율, 지표면 조도계수, 하도 조도계수와 같은 지표면 상태에 관한 매개변수, 수리전도도, 토양심 등과 같은 토양관련 매개변수, 그리고 토양의 초기포화도가 있다. 본 연구에서는 이 중 민감도가 비교적 큰 것으로 알려진 초기포화도 (ISSR), 하도 최소경사 (MSCB), 하도 조도계수 (CRC), 토양 수리전도도 보정계수 (CSHC), 토양심 보정계

수 (CSD)를 이용해서 모형을 보정하였다 (Choi et al., 2012; Noh et al., 2014). 수리전도도 보정계수와 토양심 보정계수는 수리전도도와 토양심 값에 곱해지는 계수로서, 0 이상의 값을 적용할 수 있다 (KICT, 2011).

정밀토양도와 HWSD를 이용하여 유출해석을 하고, 각각의 토양 관련 매개변수를 평가하기 위한 절차는 Fig. 3과 같다. PEST를 이용해서 정밀토양도를 적용한 GRM 모형의 초기포화도, 하도 최소경사, 하도 조도계수, 토양 수리전도도 보정계수, 토양심 보정계수를 추정하고, 하도 최소경사와 하도 조도계수의 기본값 (ⓐ)을 설정한다. 토양도 (정밀토양도와 HWSD)의 적용에 따른 토양 관련 매개변수의 변동성을 평가하기 위해서, 하도 최소경사와 조도계수를 고정된 값으로 하고, 수리전도도 보정계수와 토양심 보정계수를 반복적으로 추정 (ⓑ, ⓒ)하였다. 초기포화도는 수문사상과 토양 특성에 따라서 개별적으로 추정되어야 하는 매개변수이다.

토양도 적용에 따른 유출량 계산 결과의 평가는 Nash-Sutcliffe 효율계수 (Nash-Sutcliffe efficiency; NSE), 표준평균

제곱근오차 (normalized root mean square error; nRMSE), 상관계수 (correlation coefficient; CC)를 적용하였으며, 다음의 식 (5)~(7)과 같다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs}^i - Q_{sim}^i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs}^i - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (5)$$

$$nRMSE = \left[\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{obs}^i - Q_{sim}^i)^2 / N} \right] / \overline{Q_{obs}} \quad (6)$$

$$CC = \left[\sum_{i=1}^N (Q_{obs}^i - \overline{Q_{sim}})(Q_{sim}^i - \overline{Q_{obs}}) / N \right] / (\sigma_{sim} \sigma_{obs}) \quad (7)$$

여기서,

N : 전체 자료의 수

Q_{obs}^i : 관측유량

Q_{sim}^i : 계산유량

$\overline{Q_{obs}}$: 관측유량 평균

$\overline{Q_{sim}}$: 계산유량 평균

σ_{obs} : 관측유량 표준편차

σ_{sim} : 계산유량 표준편차

III. 분석 및 고찰

1. 토양도 특성 분석

향석 유역에 대해서 정밀토양도와 HWSD를 추출하고 토성과 토양심을 분류하였다. 향석 유역에서 HWSD 자료는 두 개의 mapping unit (4295, 4352)이 속해 있으며, 두 개 모두 하나의 토성 (Loam)을 가진다. HWSD에서 제시하고 있는 토양심 정보는 ① Obstacle to roots, ② Impermeable layer, ③ Reference soil depth이다. Mapping unit 4295와 4352는 obstacle to roots, impermeable layer 값을 가지고 있지 않으므로, 본 연구에서는 reference soil depth 값을 이용해서 토양심 (4295 : 100cm, 4352 : 10cm)을 설정하였다. 정밀토양도에서는 토양구에서 토성 속성을 포함하고 있고, 토양통에서 토양심을 제시하고 있다 (KICT, 2016). GRM 모형은 정밀토양도의 토성과 토양심을 기본값으로 제시하고 있으며, 본 연구에서는 이를 이용하였다. Table 3~Table 5는 향석 유역에서의 정밀토양도와 HWSD의 토성 및 토양심 분포와 각각의 매개변수 (수리전도도, 토양심) 값을 나타낸 것이다.

정밀토양도에서는 사양토 (Sandy Loam, 75.3%, 수리전도도 1.09 cm/h)가 지배적이고 평균 수리전도도는 1.07 cm/h이다. HWSD에서는 유역 전체가 양토 (Loam, 100%)이며, 양토의 수리전도도는 0.34 cm/h로 사양토 및 정밀토양도 평균 수리전도도에 비해 약 1/3의 값을 가진다. 그러므로 HWSD를 이용할 경우 침투율이 작아짐에 따라 침투량이 작아지고, 직접유출이 크게

Table 3 Soil texture distribution (detailed soil map)

Soil texture	Hydraulic cond (cm/h)	Areal ratio (%)
Silty clay loam	0.1	0.5
Silt loam	0.65	1.4
Sandy loam	1.09	75.3
Sand	11.78	0.8
Clay	0.03	0.9
Loamy sand	2.99	2.6
Loam	0.34	18.5
Area weighted average	1.07	-

Table 4 Soil depth in the study watershed (detailed soil map)

Soil depth	Depth (cm)	Areal ratio (%)
Deep	125	19
Moderately deep or Moderately shallow	75	55
Shallow	25	16
Very shallow	10	10
Area weighted average	70	-

Table 5 HWSD soil attributions in the study watershed

Soil data	Mapping unit	Attribute	Parameter value	Areal ratio (%)
Soil texture	4295	Loam	Hydraulic cond	100
	4352		0.34 cm/h	
Soil depth	4295	Deep	100 cm	30
	4352	Very shallow	10 cm	70
	Area weighted average		37 cm	-

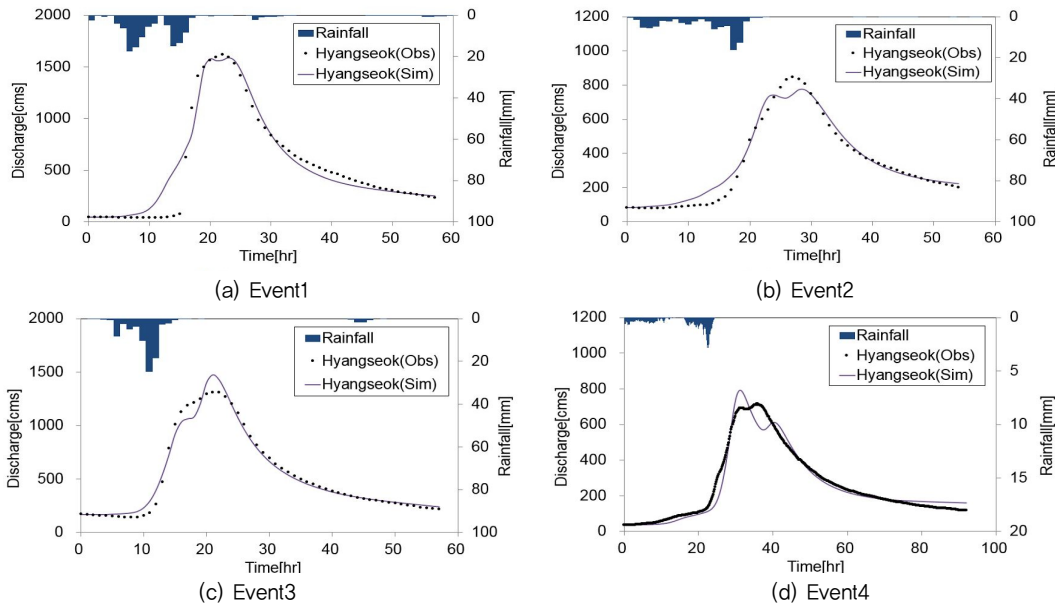


Fig. 4 Model calibration using detailed soil map for MSCB and CRC

산정될 것으로 평가된다. 토양심은 정밀토양도를 적용한 경우 ‘보통’속성 (75 cm)이 지배적이고 평균 토양심이 70 cm이다. HWSD에서는 ‘매우얕음’ 속성 (10 cm)이 지배적이고, 평균 토양심 또한 37 cm로 정밀토양도를 적용한 경우에 비해 매우 작기 때문에 토양포화가 상대적으로 빨리 발생함으로써 직접유출량이 크게 계산될 수 있을 것으로 평가된다. 이와 같이 향석구역에서 HWSD는 정밀토양도에 비해서 수리전도도와 토양심이 모두 작게 설정되며, 이를 이용하여 모형을 보정할 경우에는 수리전도도 보정계수와 토양심 보정계수 값이 커질 수 있을 것으로 판단된다.

2. 기본 매개변수 설정

GRM 모형의 주요 보정대상 매개변수 중 토양도 변경과 상관 없이 적용할 기본 매개변수 (하도 최소경사, 하도 조도계수)를 설정하였다. 기본 매개변수의 설정을 위해 정밀토양도를 적용하였다. PEST를 이용해서 4개의 수문사상에 대한 초기포화도 (ISSR), 하도 최소경사(MSCB), 하도 조도계수 (CRC), 토양수

리전도도 보정계수 (CSHC), 토양심 보정계수 (CSD)를 추정하여 모형을 보정하고, 4개의 하도 최소경사, 하도 조도계수 값을 산술평균하여 각 매개변수의 보정값으로 이용하였다.

향석 수위관측소의 관측유량을 기준으로 모형 보정한 결과 (Fig. 4, Table 6) 4개의 사상에서 모두 NSE (0.94 ~0.98), CC (0.97~0.99), nRMSE (0.05~0.08)가 양호하여 실측수문곡선을 잘 재현할 수 있는 것으로 나타났다. Table 4에서 Event4에 대한 하도 최소경사 (0.0001)와 하도 조도계수 (0.025)는 다른 사상에 비해서 작게 산정되었다. 이는 다른 사상과는 달리 Event4는 강우의 시공간 해상도가 각각 10분과 500m이기 때문인 것으로 판단되며, 강우자료의 시공간해상도가 운동파 모형을 이용한 유출해석시의 하도경사 매개변수에 미치는 영향 평가에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 하도 최소경사, 하도 조도계수의 평균값은 각각 0.0012와 0.05로 산정되었다. 각각의 평균값은 Event4에서의 최적값과 큰 차이가 있다. 그러므로 하도 최소경사, 하도 조도계수 평균값을 이용한 토양 관련 매개변수 평가시 정밀토양도를 이용한 모의결과에서 Event4는 다른 사상에 비해서 불확실성이 클 것으로 추정된다.

Table 6 Calibration results using detailed soil map for MSCB and CRC

Event	Parameter					NSE	C	nRMSE
	ISSR	MSCB	CRC	CSHC	CSD			
Event1	0.76	0.0018	0.063	1.9	0.7	0.94	0.97	0.08
Event2	0.71	0.0011	0.048	1.5	0.9	0.97	0.99	0.06
Event3	0.88	0.0019	0.065	3.9	0.7	0.98	0.99	0.05
Event4	0.74	0.0001	0.025	0.7	1.4	0.96	0.98	0.06
Ave.	0.77	0.0012	0.050	2.0	0.9	0.96	0.98	0.06

Table 7 The calibrated parameters by using PEST

Event	Parameter (95 % confidence interval)	Detailed soil map	HWSD
Event1	ISSR	0.75 (0.66 - 0.85)	0.67 (0.59 - 0.75)
	CSHC	2.1 (0.6 - 3.7)	5.6 (5.1 - 6.4)
	CSD	0.7 (0.3 - 1.1)	1.71 (1.66 - 1.75)
Event2	ISSR	0.69 (0.61 - 0.77)	0.57 (0.49 - 0.64)
	CSHC	1.1 (0.7 - 1.6)	1.6 (0.9 - 2.3)
	CSD	1.1 (0.6 - 1.5)	5.0 (2.2 - 7.8)
Event3	ISSR	0.84 (0.77 - 0.92)	0.59 (0.11 - 1.00)
	CSHC	2.2 (0.9 - 3.5)	2.1 (1.7 - 2.7)
	CSD	0.9 (0.6 - 1.1)	2.3 (0.2 - 4.4)
Event4	ISSR	0.24 (0.12 - 0.35)	0.70 (0.66 - 0.74)
	CSHC	10.0 (4.7 - 15.3)	4.9 (4.0 - 5.9)
	CSD	2.0 (1.2 - 2.8)	1.6 (1.2 - 2.0)

3. 토양 관련 매개변수 변동성 평가

정밀토양도와 HWSD의 적용에 따르는 토양관련 매개변수의 변동성을 평가하기 위해서 하도 최소경사(0.0012)와 하도 조도계수 (0.050)는 고정된 값을 적용하고, PEST를 이용하여 모형을 보정하였다. 보정대상 매개변수는 ISSR, CSHC, CSD이다. Table 7과 Fig. 5은 각 경우에서의 매개변수 최적값과 95% 신뢰구간을 나타낸 것이다. 매개변수 보정결과는 Event1~Event3과 Event4가 서로 다른 양상을 나타내었다. 정밀토양도를 이용하여 Event4를 모의한 경우, ISSR, CSHC, CSD 모두에서 Event1~Event3의 결과에 비해서 변동성과 신뢰구간이 크게 나타났다. 이는 하도 최소경사와 하도 조도계수를 기본 매개변수 설정시 계산된 평균값 (0.0012, 0.050)으로 적용함으로써, Table 6에서 제시된 Event4에서의 최적값 (0.0001, 0.025)과 차이가 크기 때문인 것으로 판단된다.

Event1~Event3의 모든 사상에서 HWSD를 이용한 모의결과는 정밀토양도를 이용한 경우에 비해서 ISSR은 작게 산정되고, CSHC와 CSD는 크게 산정되었다. 이는 HWSD가 수리전도도와 토양심 모두에서 정밀토양도 보다 작은 값을 가지기 때문인 것으로 판단된다. 강우사상별 최적 매개변수의 변동성과 신뢰

구간 범위에서도 HWSD를 이용한 경우가 더 크게 나타났으며, 이는 실측에 의해 작성된 정밀토양도에 비해서 HWSD가 가지는 매개변수 값이 불확실성이 크기 때문인 것으로 판단된다.

PEST로 보정된 매개변수를 이용하여 계산된 유출량 결과는 Fig. 6와 Table 8과 같다. Fig. 6에서 정밀토양도와 HWSD를 적용한 모든 경우에서 관측 수문곡선의 형태를 잘 재현할 수 있었다. Table 7에서 NSE, CC, nRMSE는 각각 0.87~0.97, 0.96~0.99, 0.05~0.12의 범위를 나타냄으로써 실측 유량을 비교적 잘 모의할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 Event4를 제외한 모든 사상에서 정밀토양도를 이용한 경우가 HWSD를 이용할 때 보다 다소 더 좋은 모의결과를 얻을 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 정밀토양도와 HWSD를 이용하여 유출해석을 수행하고, 각각의 토양자료를 이용했을 때 토양관련 매개변수의 변화를 평가하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

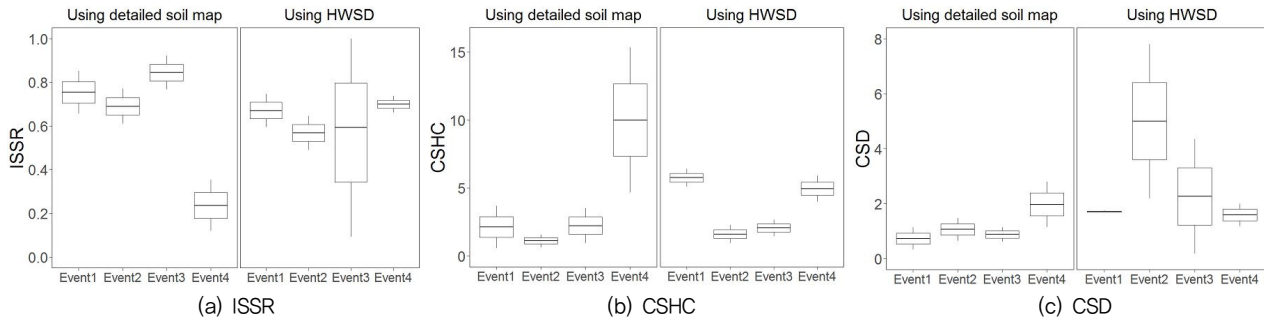


Fig. 5 Comparing parameters ranges using detailed soil map and HWSD

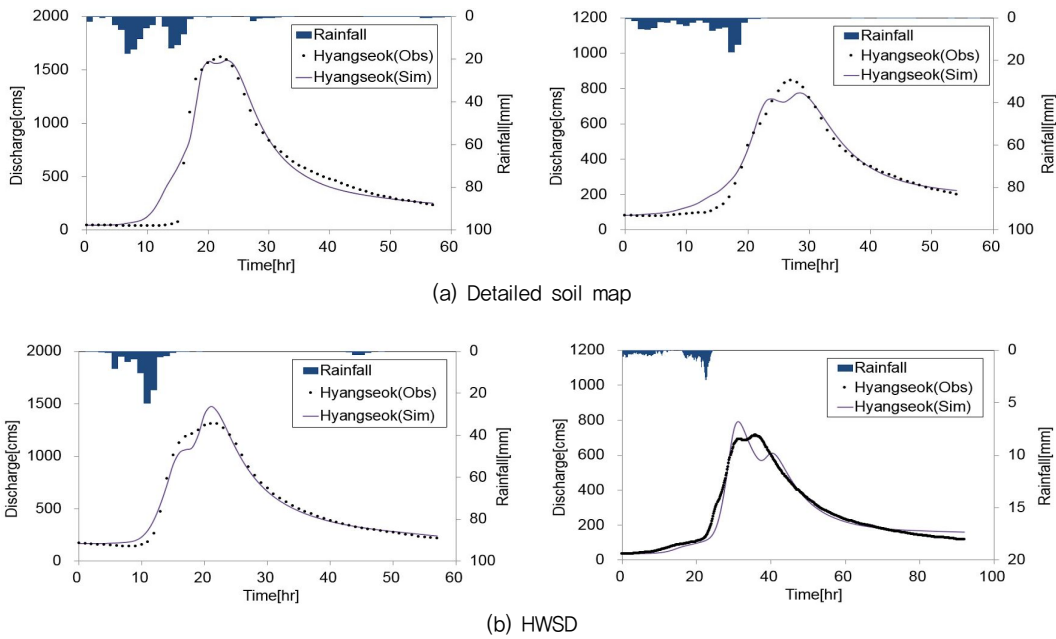


Fig. 6 Model calibration with ISSR, CSHC, and CSD (■ : rainfall, ● : observed flow, — : simulated flow)

Table 8 Assessment of runoff results using the calibrated ISSR, CSHC, and CSD

Event	Detailed soil map			HWSD		
	NSE	CC	nRMSE	NSE	CC	nRMSE
Event1	0.94	0.97	0.08	0.91	0.96	0.10
Event2	0.97	0.99	0.05	0.94	0.97	0.08
Event3	0.97	0.98	0.06	0.87	0.96	0.12
Event4	0.94	0.98	0.07	0.95	0.98	0.06
Ave.	0.96	0.98	0.07	0.92	0.97	0.09

1. 향석 유역에서의 두 토양자료를 비교한 결과 HWSD는 정밀토양도에 비해 토성과 토양심 속성이 단순하였으며, 각 속성별 수리전도도와 토양심 매개변수가 더 작은 값으로 분포되었다.
2. 토양 자료별 토양관련 매개변수의 특성을 평가한 결과 강우의 시공간 해상도가 같은 Event1~Event3은 유사한

매개변수 값을 가지나, Event4는 다소 큰 차이를 나타내었다. 이는 Event4의 강우 자료가 강우레이더로부터 생성된 시공간적 고해상도 자료이기 때문인 것으로 판단되며, 기존의 공간해상도에 관한 연구 (Noh et al., 2014) 와 더불어 수문자료의 시간해상도에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

3. 모형 보정 결과 정밀토양도와 HWSD를 이용한 모두에서 유출량은 실측값을 잘 재현 할 수 있었다. 정밀토양도에 비해서 작은 수리전도도와 토양심 값을 가지는 HWSD를 적용한 경우, 각 매개변수가 크게 보정되고 변동성과 신뢰구간 범위가 크게 산정되었다. 이는 정밀토양도에 비해서 불확실성이 큰 HWSD를 적용하였기 때문인 것으로 판단된다. HWSD와 같은 전지구 토양 자료의 경우 해상도와 정확도에서 불확실성이 클 수 있으므로, 이를 이용한 유출해석시에는 토양관련 매개변수를 주요 보정대상에 포함해야 한다.

일반적으로 미세측 지역이나 접근이 어려운 지역의 유출해석을 위해서는 전지구적으로 제공되는 수문자료와 지형공간자료가 이용되고 있다. 이때 사용되는 자료에 따라서 불확실성 요인이 각기 달라질 수 있으며, 이 중 토양 자료는 영상판독에 의한 자료 구축이 어렵고, 지역별로 자료구축 방법과 정확도가 크게 달라질 수 있다. 본 연구에서는 토양 자료에 따른 관련 매개변수의 불확실성을 우선적으로 평가하였으며, 다양한 지역에 대한 평가가 추가되어야 한다. 이러한 연구는 향후 토지피복도, DEM, 수문자료로 확대될 수 있을 것이며, 미세측 지역과 접근이 어려운 지역의 유출해석과 전지구 자료를 이용한 유출해석시 모형 보정 및 매개변수의 불확실성을 이해하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업 (16WMP-B079625-03)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Abdelhamid, F., R. Hassan, K. Abdelhadi, K. Youness, and A.B. Omar, 2011. Hydrologic Modeling of the Bouregreg Watershed (Morocco) Using GIS and SWAT Model. *Journal of Geographic Information System* 3: 279-289.
- Choi, Y.S. 2010. Development and evaluation of a physically based distributed rainfall-runoff model embedded in GIS. Doctoral dissertation, Inha University, Incheon, Korea 19-26 (in Korean with English abstract).
- Choi, Y.S., C. K Choi, K. T. Kim, 2012. Development of a multi-site calibration module of distributed model -the case of GRM-. *Journal of Korean Association of Geographic Information Studies, Korean Association of Geographic Information Studies* 15(3): 103-118 (in Korean with English abstract).
- Christian, F., S. Rastislav, M. Elena, B. Juraj, B.A. Ligia, O. Michael, and V.D.V. Marijn. 2015. Uncertainty in soil data can outweigh climate impact signals in global crop yield simulations. *Nature Communications* 7:11872, 1-13.
- Doherty, J. 2009. *PEST: Model-Independent Parameter Estimation*. Watermark Numerical Computing, Australia.
- Elena, T., M. Mark, O. Mohamed, F. Abdoulaye, and B. Emily. 2013. Dynamic Hydrological Modeling in Drylands with TRMM Based Rainfall. *Remote Sensing* 5: 6691-6716.
- FAO, IIASA, ISRIC, ISS-CAS, JRC. 2009. Harmonized World Soil Database (version 1.1). *FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg Austria*, 1-6.
- Jung, I.K., H. J. Shin, J. H. Park, and S. J. Kim, (2008). A modified grid-based kinematic wave storm runoff model (ModKIMSTORM) (II)-Application and Analysis-. *Journal of Korean Society of Civil Engineers, KSCE* 28(6B): 709-721 (in Korean with English abstract).
- Jung, J.H., S. P. Jang, H. I. Kim, Y. T. Jung, G. S. Her, and H. Park, 1995. Classification of hydrologic soil group for estimating runoff rate. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* 37(6): 12-32 (in Korean).
- KICT. 2011. *HyGIS-GRM user's manual* 1-5 (in Korean).
- KICT. 2016. Grid based Rainfall-runoff Model user's manual for MapWindow GIS 22-32 (in Korean).
- Kim, K.T. 1998. Analysis of Runoff Response Using GIS. Doctoral dissertation, Inha University, Incheon, Korea. 94-98 (in Korean with English abstract).
- Kim, K. T. 2003. A suggestion of using the detailed soil map for calculating CN. *Magazine of Korea Water Resources Association* 36(4): 45-53 (in Korean).
- Kim, K. T., Y. S. Choi, 2004. A study on the estimation of effective precipitation using detailed soil map. *Journal of Korean Association of Geographic Information Studies* 7(2): 1-15 (in Korean with English abstract).
- Kochoy, M., R. Hiederer, and A. Freibauer. 2015. Global distribution of soil organic carbon-Part 1: Masses and frequency distributions of SOC stocks for the tropics, permafrost regions, wetlands, and the world. *Soil* 1: 351-365.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). 2011. Hydrological Survey Report in 2010 29-34, 327-336 (in Korean).
- Ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs (MLTM). 2011. *Development of Rainfall Estimation and Analysis Optimization System of the Bisl-San Rainfall Radar* (in Korean).
- National Institute of Agricultural Sciences (NAS). 1992. *Korean Soil taxonomy-supplement*. Soil survey data 13: 283-290.
- Noh, S. J., S. W. Choi, Y. S. Choi, K. T. Kim, 2014. Impact assessment of spatial resolution of radar rainfall and a distributed hydrologic model on parameter estimation. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 34(5): 1443-1454 (in Korean with English abstract).

- English abstract).
20. Noh, S. J., Y. Choi, C. Choi, and K. Kim, 2013. Parameter estimation of a distributed hydrologic model using parallel PEST: comparison of impacts by radar and ground rainfall estimates. *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA* 46(11): 1041-1052 (in Korean with English abstract).
 21. Park, J. H., Y. T. Hur, 2008. Analysis of runoff sensitivity for initial soil condition in distributed model. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 28(4B): 375-381 (in Korean with English abstract).
 22. Todd-Brown, K.E.O., J.T. Randerson, W.M. Post, F.M. Hoffman, C. Tarnocai, E.A.G Schuur, and S.D. Allison. 2013. Causes of variation in soil carbon simulations from CMIP5 Earth system models and comparison with observations. *Biogeosciences* 10: 1717-1736.
 23. Xianwu, X., H. Yang, S. L. Ashutosh, J. G. Jonathan, J. H. George, I. K. Sadiq, D. Chhimi, and C. Sheng. 2013. Statistical and hydrological evaluation of TRMM-based Multi-satellite Precipitation Analysis over the Wangchu Basin of Bhutan: Are the latest satellite precipitation products 3B42V7 ready for use in ungauged basins. *Journal of Hydrology* 499: 91-99.
 24. Yassine, B., K. Ilias, B. Hassane, K. Mourad, R. Aicha, N.E.A. Pazzal, M. Abdelhalim, and Y. Zainab. 2016. Hydrologic Modeling Using SWAT and GIS, Application to Subwatershed Bab-Merzouka(Sebou, Morocco). *Journal of Geographic Information System* 8: 20-27.