



남강댐 상류 소유역의 유출량 추정을 위한 SWAT 모형의 적용성 평가

Evaluation of SWAT Model Applicability for Runoff Estimation in Nam River Dam Watershed

김동현* · 김상민**†

Kim, Dong-Hyeon · Kim, Sang-Min

Abstract

The objective of this study was to evaluate the applicability of SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model for runoff estimation in the Nam river dam watershed. Input data for the SWAT model were established using spatial data (land use, soil, digital elevation map) and weather data. The SWAT model was calibrated and validated using observed runoff data from 2003 to 2014 for three stations (Sancheong, Shinan, Changchon) within the study watershed. The R^2 (Determination Coefficient), RMSE (Root Mean Square Error), NSE (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient), and RMAE (Relative Mean Absolute Error) were used to evaluate the model performance. Parameters for runoff calibration were selected based on user's manual and references and trial and error method was applied for parameter calibration. Calibration results showed that annual mean runoff were within $\pm 5\%$ error compared to observed. R^2 were ranged 0.64 ~ 0.75, RMSE were 2.51 ~ 4.97 mm/day, NSE were 0.48 ~ 0.65, and RMAE were 0.34 ~ 0.63 mm/day for daily runoff, respectively. The runoff comparison for three stations showed that annual runoff was higher in Changchon especially summer and winter seasons. The flow exceedance graph showed that Sancheong and Shinan stations were similar while Changchon was higher in entire fraction.

Keywords: SWAT model; Nam river dam watershed; runoff; hydrology statistics

1. 서론

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형은 준분포형 모형으로서 수치고도자료인 DEM을 이용하여 유역경계를 자동으로 산정하고, 유역내 토지이용과 토양에 따른 수문반응단위를 통해 유역의 유출량, 유사, 영양물질의 이동 등을 모의한다. 국내 주요 유역을 대상으로 적용성 평가 및 검증에 대한 연구가 많이 이루어 졌으며, 유역의 유출량 추정 및 분석을 기본으로 비점 오염, 토양유실량, 하천수질개선 그리고 기후변화 시나리오를 사용하여 미래 유출량 추정 및 분석 등 다양한 연구들이 이루어지고 있다.

SWAT 모형의 국내 적용사례를 살펴보면 유역단위 유출량 추정과 실측자료와 모의자료를 비교하고 적합성을 평가한 연구들이 많이 이루어졌다. Moon and Kim (2006)은 대전광역시 3대 하천인 유등천, 대전천, 갑천의 수위관측지점에 SWAT

모형을 적용하여 소유역에 대한 유출량을 추정하여 최적 매개 변수와 COE, R^2 , R.E 등 모형 평가지표를 통해 적용성을 평가한 바 있다. Kang et al. (2013)은 제주도 남부지역에 위치한 강정천과 약근천을 대상으로 2009 ~ 2012년까지 실측한 유출자료를 활용하여 SWAT 모형을 구축하고 장기간의 유출량을 산정하였으며, 실측 자료를 통해 매개변수 보정으로 일 유출량 모의를 정밀하게 분석한 바 있다. Jung et al. (2012)은 유출자료 수득을 위한 효율적인 방법을 평가하기 위해 유역면적만을 활용하는 비유량법, 유출에 영향을 주는 지형인자를 이용하는 지역회귀방법, 그리고 SWAT 모형의 유출추정 방법을 비교한 바 있으며, 금호강 유역 내에 하류지점에 위치한 동촌 수위관측소의 유출자료를 이용하여 각 방법을 통해 유출을 산정 및 비교한 결과 비유량법과 SWAT 모형의 유출추정 방법을 사용하는 것이 타당함을 판단하였다.

본 연구의 대상유역인 남강댐 유역은 연평균 강수량이 1,634 mm (2000 ~ 2014년의 연평균 강수량)으로 남부지방 (1,000 ~ 1,800 mm)에서도 다우지역에 속한다 (기상청). 또한 하상계수가 크기 때문에 우기에 남강의 수위, 유속이 증가하고 하천 침식 및 고농도의 탁수가 발생하여 피해가 발생하고 있어 남강댐 상류 소유역에 대한 유출량 추정 및 수문 특성에 대한 분석은 향후 남강댐의 수자원 관리 측면에서 매우 중요할 것이다. 또한, 남강댐은 현재 치수능력 증대사업을 추진하기 위한 기본계획을 수립하고 있으며, 기존댐의 수문학적 안전성 평가 및 치수능력증대를 위한 방안을 다각도로 고려하

* Dept. of Agricultural Engineering, National Academy of Agricultural Science, RDA

** Dept. of Agricultural Engineering (Insti. of Agric, and Life Sci) Gyeongsang National University

† Corresponding author

Tel.: +82-55-772-1931 Fax: +82-55-772-1939

E-mail: smkim@gnu.ac.kr

Received: February 19, 2016

Revised: June 23, 2016

Accepted: June 28, 2016

고 있다. 따라서, 남강댐의 안정적인 운영을 위해 기후변화와 다양한 수문여건의 변화를 고려한 상류유역의 유출량의 변화를 분석할 필요가 있다.

남강댐 유역을 대상으로 SWAT 모형을 적용한 연구를 살펴보면 Kim (2012)은 남강댐 유역을 10개의 소유역으로 분할한 후 그 중 3개의 소유역에 대한 유출량과 오염부하량을 분석한 바 있다. 모의 유출량과 실측 유출량을 상관계수로 분석하였으며, 다른 모형의 적용성 평가 지표는 사용하지 않았다. Lee (2011)는 남강댐 유역에 위치한 진양호의 일 유입량에 대한 장기간의 모의를 위해 2001 ~ 2007년까지 모의자료와 실측자료를 비교하고 AME, EI, R^2 등 모형 평가지표를 통해 모형검증을 수행하였다. Lee et al. (2012)이 남강댐 유역의 산청 소유역과 남강댐을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 기후변화에 따른 하천 유출량, 댐 유입량 변화를 예측하였다. 기후변화 시나리오의 적용을 위해 모의자료와 실측자료의 연도별 유출량, 유출률, 그리고 NSE, RMSE, R^2 등 평가지표를 이용하여 모형의 적용성을 평가한 바 있다. 하지만 대상 소유역별 유출 특성 분석과 고찰이 부족하며, Lee et al. (2012)을 제외하고 유역의 연도별 유출량 및 유출률 분석 등이 없고, 모형의 평가지표 또한, 저수위, 고수위, 변동계수 등 다양한 기법을 적용할 필요가 있다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 남강댐 상류에 위치하고, 장기간의 실측자료 수집이 가능한 산청, 신안, 창촌 소유역을 대상으로 SWAT 모형의 적용성을 평가하고 각 소유역의 연도별 유출량, 유출률 및 유출특성을 분석하고 다양한 평가지표를 이용하여 남강댐 상류에서 유출되는 유출량에 대해 비교, 분석하고자 한다.

II. 연구방법

1. 대상유역

남강댐 유역의 유역특성인자를 살펴보면, 유역면적 2,280.1 km^2 , 유역평균고도 427.6 m, 유역평균경사 40.4 %, 유로연장 110.8 km, 유역평균 폭 20.5 km, 형상계수는 0.43을 나타내고 있다. 남강댐은 다목적댐으로 높이 34 m, 길이, 1,126 m, 체적 1,280 m^3 이며, 계획 홍수량이 초당 10,570 m^3 을 사천만으로 방류하고 진양호의 수자원 조절을 통해 남강 본류에 2,000 m^3 이하를 방류한다. 이에 따라 남강 하류의 토지 50,000 ha에 대한 홍수 피해를 방지하고 예방할 수 있으며, 낙동강 하류 농경지 9,800 ha에 연간 6,000만 m^3 의 관개용수를 공급한다(Kim et al., 2012). Fig. 1에서는 남강댐 유역도와 기상관측소, 각 소유역의 수위관측소 위치를 나타내고 있다.



Fig. 1 Location of meteorologic and water level stations in Nam river dam watershed

산청 기상관측소의 2000 ~ 2014년까지 일강우량, 최고기온, 최저기온, 평균풍속, 평균습도 자료를 기상청에서 수집하였다. SWAT 모형에 필요로 하는 일사량 자료의 경우 산청 관측소에서 수집되지 않고 있어 인근 기상관측소인 진주 관측소의 일사량 자료를 수집하여 사용하였다. 수위와 유량 자료는 국가수자원관리종합정보시스템 (Wamis)에서 수집하였으며, 유량자료의 경우 유속계, 부자, 초음파, 희석, 위어측정방법에 의해 측정하며, 기존 유량 측정 성과 (수문조사연보, 유량연보 등)를 통해 자료를 제공하고 있다. 수위자료는 수문조사연보에서 제공된 수위 - 유량곡선식을 이용하여 유량자료로 변환하였다. 본 연구에서는 수위 - 유량곡선식을 사용하여 산정한 유량자료와 국가수자원관리종합정보시스템에서 제공되는 유량자료를 비교하여 적절한 유출량 자료를 2003년부터 2014년까지 구축하였으며, 저유량에서 0으로 떨어지는 값에 대해서는 최소유량으로 보정하였다. Table 1은 대상유역의 강우량과 각 소유역의 연평균 유출량을 나타내고 있다. 각 소유역의 평균 유출량은 산청이 691 mm, 신안이 738 mm, 창촌이 1,093 mm로 나타났으며, 연평균 유출률은 산청이 42.8 %, 신안이 44.5 %, 창촌이 68.1 %로 나타났다.

2. SWAT 모형의 개요

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형은 미국 농무성 산하 농업연구소 (Agricultural Research Service)에서 개

Table 1 Observed rainfall and runoff data for study watersheds

Year	Rainfall (mm)	Sancheong		Shinan		Changchon	
		Runoff (mm)	Runoff rate (%)	Runoff (mm)	Runoff rate (%)	Runoff (mm)	Runoff rate (%)
2003	1,935	1,014	52.4	1,211	62.6	1,299	67.2
2004	1,886	663	35.2	945	50.1	1,046	55.4
2005	1,313	414	31.5	479	36.5	748	56.9
2006	1,685	850	50.5	710	42.2	869	51.6
2007	1,776	815	45.9	821	46.2	1,019	57.4
2008	786	380	48.4	264	33.6	746	95.0
2009	1,169	470	40.2	422	36.1	928	79.4
2010	2,190	782	35.7	1,085	49.6	1,575	72.0
2011	2,013	657	32.6	724	36.0	1,759	87.4
2012	1,914	1,032	53.9	819	42.8	1,425	74.4
2013	1,254	595	47.5	605	48.3	673	53.7
2014	1,539	618	40.1	771	50.1	1,032	67.0
Mean	1,622	691	42.8	738	44.5	1,093	68.1

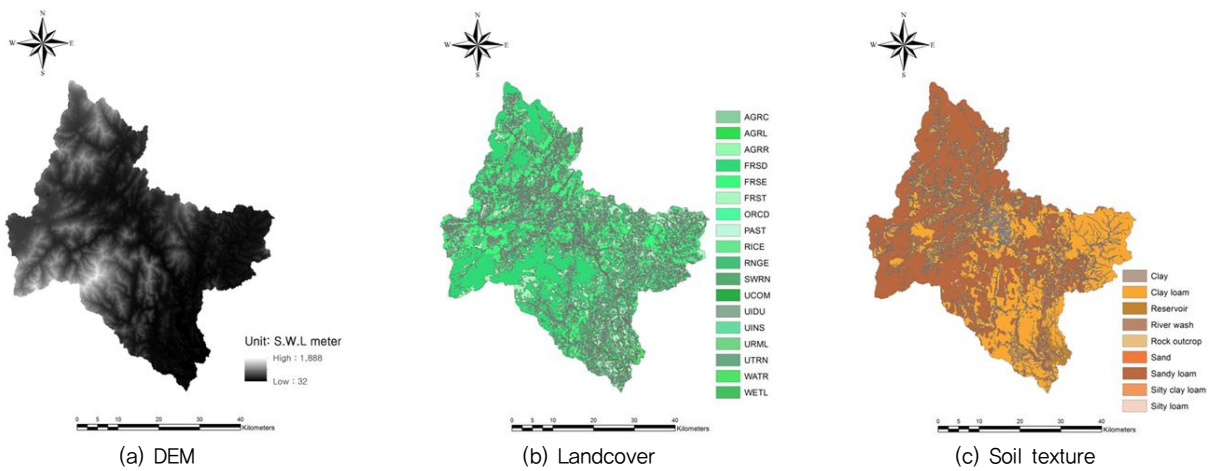


Fig. 2 DEM, landcover, and soil texture map for the Nam river dam watershed

발한 물리적 기반의 준분포형 장기유출 모형으로, 기존의 SWRRB, CREAMS, GLEAMS, EPIC 모형을 개선한 모형이다 (Neitsch et al., 2009). 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 유출과 유사, 그리고 농업화학물질의 거동에 대한 영향을 예측하기 위해 개발된 모형이다 (Park et al., 2009; Lee et al., 2012). 수치표고 특성을 통해 하천과 유역경계를 나누며 토양, 토지이용 조건, 경사도 등에 의해 결정되는 수문응답단위 (Hydrologic Response Unit, HRU)가 산출된다. 각 HRU에서 물수지식에 근거하여 지표면유출, 침투량, 증발산량을 산정한다.

SWAT 모형은 SCS 유출곡선법 (SCS, 1972)과 Green & Ampt 침투법 (1911)을 통해 지표유출, 기저유출, 침투유출 등을

모의하며, Penman-Monteith 방법, Priestley-Taylor 방법, Hargreaves 방법 등에 의해 잠재증발산량과 실제증발산량을 모의한다. 이 밖에도 지하수, 토양수, 측방흐름 등의 수문량과 토사유출, 침식, 영양물질의 발생량을 모의한다. SWAT 모형에서는 수문순환의 모의를 위해 식 (1)과 같은 물수지 방정식을 이용한다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_{suri} - ET_i - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서, SW_t 는 t일까지의 최종 토양수분함량 (mm), SW_0 는 i 일 동안의 초기토양수분량 (mm), t는 시간으로서의 일단위

Table 2 Landcover classification for study watershed

Classification	Area (km ² , percent)			
	Sancheong	Shinan	Changchon	Nam river dam
Urban land (URLD)	28,6 (2,4)	10,1 (2,4)	6,4 (1,8)	53,9 (2,4)
Agricultural land (AGRL)	246,7 (20,9)	91,3 (21,4)	29,2 (12,7)	449,8 (19,7)
Forest (FRST)	862,9 (73,3)	309,6 (72,9)	291,7 (82,1)	1677,6 (73,4)
Range-grasses (RNGE)	13,9 (1,2)	3,5 (0,8)	2,6 (0,7)	23,4 (1,0)
Wet lands-mixed (WETL)	6,45 (0,55)	2,74 (0,65)	2,31 (0,65)	19,80 (0,87)
South western US (Arid) range (SWRN)	10,84 (0,92)	2,13 (0,5)	3,85 (1,08)	22,60 (0,99)
Water (WATR)	8,47 (0,72)	5,08 (1,2)	2,73 (0,77)	33,06 (1,45)
Sum	1,177,74 (100)	424,70 (100)	354,54 (100)	2,280,11 (100)

Table 3 List of runoff parameters and calibrated values for study watershed

Class	Parameter	Definition	Range		Calibrated values		
			Min	Max	SC	SA	CC
Soils (.sol)	Sol_Z	Depth from soil surface to bottom of layer	0	3,500	180	190	260
	Sol_Awc	Available water capacity of the soil layer	0	1	0,5	0,3	0,5
HRU (.hru)	ESCO	Soil evaporation compensation coefficient	0	1	1	1	1
	EPCO	Plant uptake compensation factor	0	1	0,1	0,1	0,1
	CANMAX	Maximum canopy storage	0	100	100	100	100
Ground water (.gw)	Gw_Delay	Delay time for aquifer recharge	0	500	31	31	31
	Alpha_Bf	Baseflow recession constant	0	1	0,85	0,98	0,5
	Gwqmin	Threshold water level in shallow aquifer for base flow	0	5,000	2,000	2,000	2,000
	Gw_Revap	Revap coefficient	0,02	0,2	0,02	0,02	0,02
	Revapmn	Threshold water level in shallow aquifer for revap	0	500	100	100	100
Management (.mgt)	CN2	SCS runoff curve number	35	98	65	65	80
General data (.bsn)	EVLAI	Leaf area index at which no evaporation occurs from water surface	0	10	0,01	0,01	0,01
	CNOFF	Plant ET curve number coefficient	0,5	2	2	2	2
	SURLAG	Surface runoff lag time	0,05	24	0,152	0,08	0,05

SC: Sancheong, SA: Shinan, CC: Changchon

(day), R_i 는 i 일 동안의 강수량 (mm), Q_{suri} 는 i 일 동안의 표면유출량 (mm), ET_i 는 i 일 동안의 증발산량 (mm), W_{seep} 은 i 일 동안의 침투량 (mm), Q_{gw} 는 i 일 동안의 회귀수량 (mm)를 나타낸다.

3. 자료구축

SWAT 모형의 입력자료인 수치고도모형 (Digital Elevation Model, DEM), 토지피복도, 정밀토양도는 ArcGIS를 통해 구축하였다 (Fig. 2). 구축된 지형자료의 해상도는 30 m × 30 m이며

좌표체계는 GRS80으로 동일하게 설정하였다. 수치고도모형은 공간속성정보 (표고, 경사, 경사방향)를 포함하며 표고 값을 중심으로 지형을 표현한 모형으로써 환경부에서 제공되며, SWAT에서는 수치고도모형을 기초자료로 활용하여 소유역을 분할한다. 토지피복도는 환경부에서 제공하는 중분류의 2010년도 토지 피복자료를 이용하였으며, SWAT에서 입력되는 분류 체계인 산림, 논, 밭, 주택지, 도심, 초지, 나지 등으로 구성하였다. 토양도는 농업과학기술원에서 제공하고 있는 1:25,000 정밀토양도를 이용하여 입력자료를 구축하였다. 토양환경정보시스

템 (www.soil.rda.go.kr)에서 제공되는 토양통 (토층, 토심, 배수그룹, 수문학적 토양군, 투수계수 등) 정보를 기반으로 토양자료를 구축하였다. Table 2는 각 소유역과 남강댐 유역의 토지이용 면적을 나타내고 있다.

4. 모형의 평가지표

모의 기간은 모형의 안정화 기간 (2000 ~ 2002년)을 고려하여 2000 ~ 2014년까지 모의하였다. 모형의 보정과 검증은 2003 ~ 2008년, 2009 ~ 2014년 각 6년씩 설정하였다. 모형의 적합성과 상관성을 평가하기 위한 함수로 결정계수 (Determination Coefficient, R^2), 평균제곱근오차 (Root Mean Square Error, RMSE), Nash-Sutcliffe 효율성 지수 (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient), 상대평균절대오차 (Relative Mean Absolute Error, RMAE)를 사용하였다. 각각의 함수는 다음 식과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Q_s(i) - Q_o(i)]^2} \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Q_o(i) - Q_s(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Q_o(i) - Q_m(i)]^2} \quad (3)$$

$$RMAE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_s(i) - Q_o(i)|}{Q_m} \quad (4)$$

여기서, Q_o 는 실측치, Q_s 는 모의치, Q_m 은 실측치의 평균, n 은 자료의 총 개수이다. 결정계수 R^2 는 1, 평균제곱근오차는 0, NSE는 1, RMAE는 0에 가까울수록 오차가 없다는 것을 나타낸다.

III. 결과 및 고찰

1. 모형의 보정

Table 3은 본 연구에서 사용된 매개변수의 정의와 보정할 수 있는 값의 최대, 최소범위와 각 소유역에 보정된 매개변수 값을 나타내고 있다. 기존의 SWAT 모형을 연구했던 논문들을 참고하여 보정할 매개변수 14개를 선정하고 시행착오법을 통해 매개변수를 보정하였다. 시행착오법의 경우 매개변수의 값을 사용자가 직접 조정하여 오차를 줄이는 방법으로 매개변수의 보정을 위한 가장 단순한 방법이나 모형의 최적화에 많은 시간이 소요된다. SWAT 모형은 각각의 수문반응단위별 매개변수의 조정이 가능

하기 때문에 소유역별, HRU별 매개변수 조정에 따른 다지점 보정이 가능하다 (Park et al., 2009).

매개변수의 보정결과 Sol_Z, CANMAX, CN2, EVLAI, SURLAG 등이 유출량에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. Sol_Z를 증가시킬수록 유출량이 전체적으로 높아지는 것으로 나타나며, CANMAX의 경우 증가시킬수록 차단저류가 높아져 유출량이 감소하는 것으로 나타났다. CN2을 증가시킬수록 전체 유출량이 증가되며, EVLAI는 감소시킬수록 증발산량이 증가하여 유출량이 감소하였다. SURLAG는 침투유출과 관련된 매개변수로 감소시킬수록 침투유출이 감소되었다. 봄철의 유출량 모의시 토양내의 동결된 물에 대한 용설효과 매개변수는 따로 고려하지 않았다. CN값의 경우 초기값은 토지이용도와 토양도를 이용하여 산정하였으며, 유출량의 보정과정에서 토지이용별로 CN값을 보정하여 적용하였다.

Table 4는 산청, 신안, 창촌 소유역의 강우량, 실측유출량 및 모의유출량에 대한 유출율, 그리고 보정결과에 따른 모형의 적합성 평가 결과를 보여주고 있다. 산청 소유역의 보정기간에 대한 실측 연평균 유출량은 689.3 mm이며, 모의 유출량은 696.2 mm로 +1.0 %의 오차를 나타내었다. 보정기간에 대한 적합성 평가 결과 R^2 의 경우 0.64, RMSE 3.00 mm/day, NSE 0.48, RMAE 0.50 mm/day로 나타났다. 신안 소유역의 보정기간에 대한 실측 연평균 유출량은 738.4 mm이며, 모의 유출량은 742.2 mm로 +0.5 %의 오차를 나타내었다. 보정기간에 대한 평균적인 적합성 평가 결과 R^2 의 경우 0.69, RMSE 3.17 mm/day, NSE 0.50, RMAE 0.53 mm/day로 나타났다. 창촌 소유역의 보정기간에 대한 실측 연평균 유출량은 954.5 mm이며, 모의 유출량은 989.4 mm로 +3.5 %의 오차를 나타내었다. 보정기간에 대한 평균적인 적합성 평가 결과 R^2 의 경우 0.75, RMSE 2.51 mm/day, NSE 0.59, RMAE 0.34 mm/day로 나타났다. Fig. 3은 실측유출량과 모의유출량의 보정결과를 일별 그래프로 나타내고 있으며, Y축 단위를 로그 눈금간격으로 하여 기저유출이 잘 나타나게 하였다.

2. 모형의 검증

Table 5는 산청, 신안, 창촌 소유역의 강우량, 실측유출량 및 모의유출량에 대한 유출율, 그리고 검증결과에 따른 모형의 적합성 평가 결과이다. 산청 소유역의 검증기간에 대한 실측 연평균 유출량은 692.3 mm이며, 모의 유출량은 737.0 mm로 +6.1 %의 오차를 나타내었다. 보정기간과 달리 실측치와 비교하여 모의치의 유출량이 높게 산출되었다. 검증기간에 대한 평균적인 적합성 평가 결과 R^2 의 경우 0.72, RMSE 2.99 mm/day, NSE 0.64, RMAE 0.53 mm/day로 나타났다. 신안 소유역의 검증기간에 대한 실측 연평균 유출량은 737.8 mm이며, 모의 유출량은 775.1 mm로 +4.8 %의 오차를 나타내었다. 보정기간과 달리 실측치와

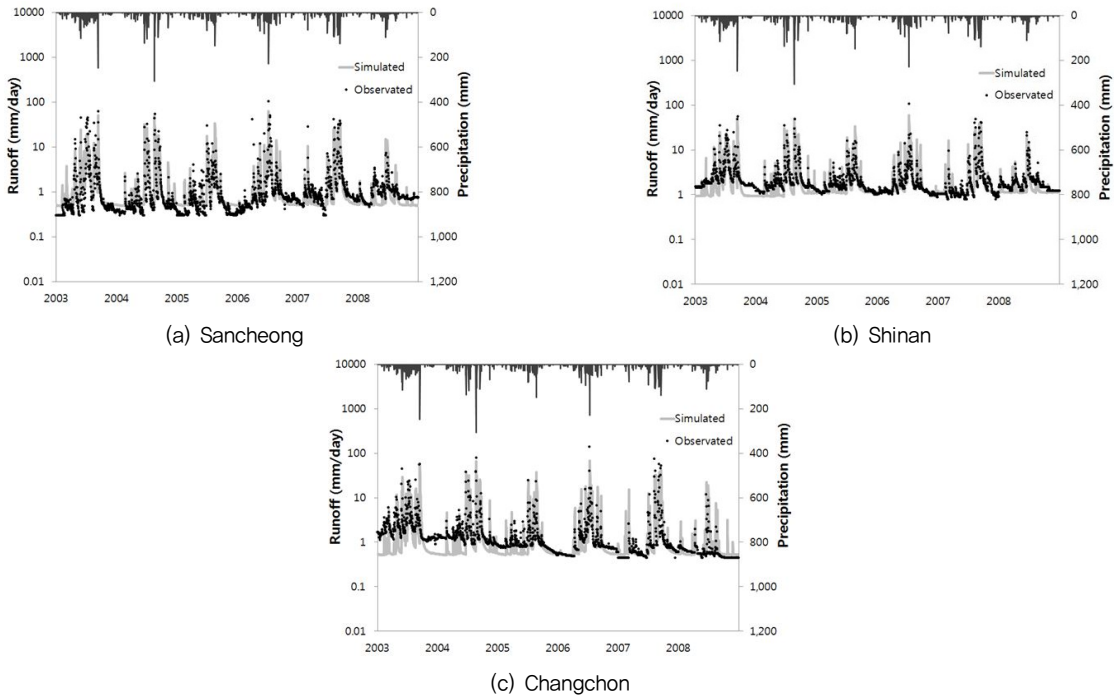


Fig. 3 Observed and simulated daily flow for the calibration period

Table 4 Observed and simulated annual mean runoff and model performance results for calibration period

Station	Year	Rainfall (mm)	Observed data		Simulated data		R ²	RMSE (mm/day)	NSE	RMAE (mm/day)
			Runoff (mm)	Runoff rate (%)	Runoff (mm)	Runoff rate (%)				
San cheong	2003	1,935	1,013.7	52.4	867.4	44.8	0.70	4.35	0.65	0.77
	2004	1,886	663.3	35.2	851.4	45.1	0.70	2.99	0.65	0.51
	2005	1,313	413.5	31.5	542.0	41.3	0.40	2.42	0.08	0.39
	2006	1,685	850.2	50.5	731.7	43.4	0.70	4.50	0.66	0.59
	2007	1,776	815.2	45.9	837.5	47.2	0.74	2.71	0.72	0.50
	2008	786	379.9	48.4	346.9	44.2	0.61	1.06	0.12	0.27
	Mean	1,563	689.3	44.0	696.2	44.3	0.64	3.00	0.48	0.50
Shinan	2003	1,935	1,210.8	62.6	926.3	47.9	0.76	2.88	0.75	0.82
	2004	1,886	945.3	50.1	907.6	48.1	0.64	3.83	0.58	0.71
	2005	1,313	478.8	36.5	574.5	43.7	0.74	2.07	0.08	0.35
	2006	1,685	710.2	42.2	775.8	46.1	0.65	4.76	0.64	0.51
	2007	1,776	821.1	46.2	891.4	50.2	0.67	4.15	0.67	0.58
	2008	786	264.2	33.6	377.5	48.1	0.67	1.35	0.28	0.20
	Mean	1,563	738.4	45.2	742.2	47.3	0.69	3.17	0.50	0.53
Chang chon	2003	1,935	1,299.2	67.2	1,156.1	59.8	0.78	2.57	0.77	0.45
	2004	1,886	1,046.0	55.4	1,138.5	60.4	0.76	2.90	0.54	0.42
	2005	1,313	747.7	56.9	830.7	63.3	0.73	2.07	0.07	0.26
	2006	1,685	868.9	51.6	1,064.6	63.2	0.62	3.75	0.61	0.37
	2007	1,776	1,019.0	57.4	1,178.8	66.4	0.79	2.75	0.78	0.35
	2008	786	746.4	95.0	567.8	72.3	0.82	1.02	0.80	0.19
	Mean	1,563	954.5	63.9	989.4	64.2	0.75	2.51	0.59	0.34

비교하여 모의치의 유출량이 높게 산출되었다. 검증기간에 대한 평균적인 적합성 평가 결과 R^2 의 경우 0.69, RMSE 4.55 mm/day, NSE 0.65, RMAE 0.63 mm/day로 나타났다. 창촌 소유역의 검증기간에 대한 실측 연평균 유출량은 1,231.9 mm이며, 모의 유출량은 1,251.4 mm로 + 1.6%의 오차를 나타내었다. 검증기간에 대한 평균적인 적합성 평가 결과 R^2 의 경우 0.65, RMSE 4.97 mm/day, NSE 0.64, RMAE 0.54 mm/day로 나타났다. Fig. 4는 실측유출량과 모의유출량의 검증결과를 일별 그래프로 나타내고 있으며, Y축 단위를 로그 눈금간격으로 하여 기저유출이 잘 나타나게 하였다.

3. 소유역별 유출특성 분석

Table 6은 전체 모의기간에 대한 시계열 자료의 각 소유역별 수문 통계를 비교하여 보여주고 있다. 각 소유역의 연 평균, 연 유출량에 대한 기저유출의 비율, 여름철과 겨울철, 그리고 95, 90, 50p (percentile)의 평균 유출량을 비교한 결과 상대적으로 창촌 소유역의 유출량이 크게 나타났으며, 신안, 산청 소유역 순으로

유출량이 크게 나타났다. 특히 창촌 소유역은 여름철과 겨울철의 유출량이 다른 소유역보다 크게 나타났다. 실측 유출량과 모의 유출량의 연 평균값을 비교한 결과 산청 소유역에서는 3.73%, 신안 소유역은 2.79%, 창촌 소유역은 2.49%로 모의 유출량이 더 크게 나타났다. 연 유출량에 대한 기저유출의 비율은 수평직선분리법을 통해 각 연도별로 기저유출을 분리하였으며, 연 유출량에 대한 기저유출율을 산정하였다. 각 소유역이 남강댐 상류에 위치함에도 불구하고 실측 유출량은 큰 차이를 보이고 있으며, 산청과 신안지점의 일부 자료구간에서 특이하게 낮은 기저유출을 보이고 있다. 각 소유역의 실측자료와 모의자료의 기저유출차이는 -12.13 ~ 16.05%로 큰 차이는 나타나진 않았지만, 각 연도별로 비교하였을 때는 큰 차이가 있었다.

여름철 (6, 7, 8월)의 실측 유출량과 모의 유출량을 비교한 결과 산청 소유역에서는 6.73%, 신안 소유역은 7.00%, 창촌 소유역은 2.40%의 차이를 나타냈으며, 겨울철 (12, 1, 2월)의 유출량을 비교한 결과 산청 소유역에서는 6.28%, 신안 소유역은 -12.29%, 창촌 소유역은 -0.12%의 차이를 나타냈다. 95p의 평균 유출량을 비교한 결과 산청 소유역에서는 -3.84%, 신안 소유

Table 5 Observed and simulated annual mean runoff and model performance results for validation period

Station	Year	Rainfall (mm)	Observed data		Simulated data		R^2	RMSE (mm/day)	NSE	RMAE (mm/day)
			Runoff (mm)	Runoff rate (%)	Runoff (mm)	Runoff rate (%)				
San cheong	2009	1,169	470.5	40.2	466.0	39.9	0.82	0.99	0.80	0.28
	2010	2,190	781.5	35.7	1,005.9	45.9	0.57	3.61	0.47	0.71
	2011	2,013	657.1	32.6	945.9	47.0	0.73	3.50	0.53	0.63
	2012	1,914	1,032.0	53.9	861.5	45.0	0.76	4.15	0.73	0.70
	2013	1,254	594.9	47.5	474.3	37.8	0.74	3.38	0.60	0.42
	2014	1,539	617.5	40.1	668.1	43.4	0.72	2.31	0.72	0.44
	Mean	1,680	692.3	41.7	737.0	43.2	0.72	2.99	0.64	0.53
Shinan	2009	1,169	422.3	36.1	502.5	43.0	0.76	1.64	0.77	0.27
	2010	2,190	1,085.0	49.6	1,059.1	48.4	0.66	5.39	0.64	0.84
	2011	2,013	724.2	36.0	996.2	49.5	0.43	8.11	0.42	0.99
	2012	1,914	818.9	42.8	906.3	47.3	0.80	3.70	0.78	0.58
	2013	1,254	605.2	48.3	498.5	39.8	0.76	3.65	0.63	0.45
	2014	1,539	770.8	50.1	688.1	44.7	0.75	4.79	0.65	0.64
	Mean	1,680	737.8	43.8	775.1	45.4	0.69	4.55	0.65	0.63
Chang chon	2009	1,169	927.7	79.4	734.0	62.8	0.69	2.80	0.63	0.29
	2010	2,190	1,575.4	72.0	1,681.3	76.8	0.48	7.37	0.49	0.70
	2011	2,013	1,759.4	87.4	1,629.5	80.9	0.58	10.04	0.55	0.85
	2012	1,914	1,424.5	74.4	1,468.9	76.7	0.75	4.39	0.75	0.58
	2013	1,254	672.8	53.7	772.8	61.6	0.67	2.20	0.68	0.33
	2014	1,539	1,031.7	67.0	1,222.1	79.4	0.76	3.05	0.75	0.46
	Mean	1,680	1,231.9	72.3	1,251.4	73.1	0.65	4.97	0.64	0.54

역은 -7.72 %, 창춘 소유역은 2.49 %의 차이를 나타냈으며, 90p의 평균 유출량을 비교한 결과 산청 소유역에서는 4.49 %, 신안

소유역은 2.11 %, 창춘 소유역은 10.92 %의 차이를 나타냈다. 50p의 평균 유출량을 비교한 결과 산청 소유역에서는 11.54 %,

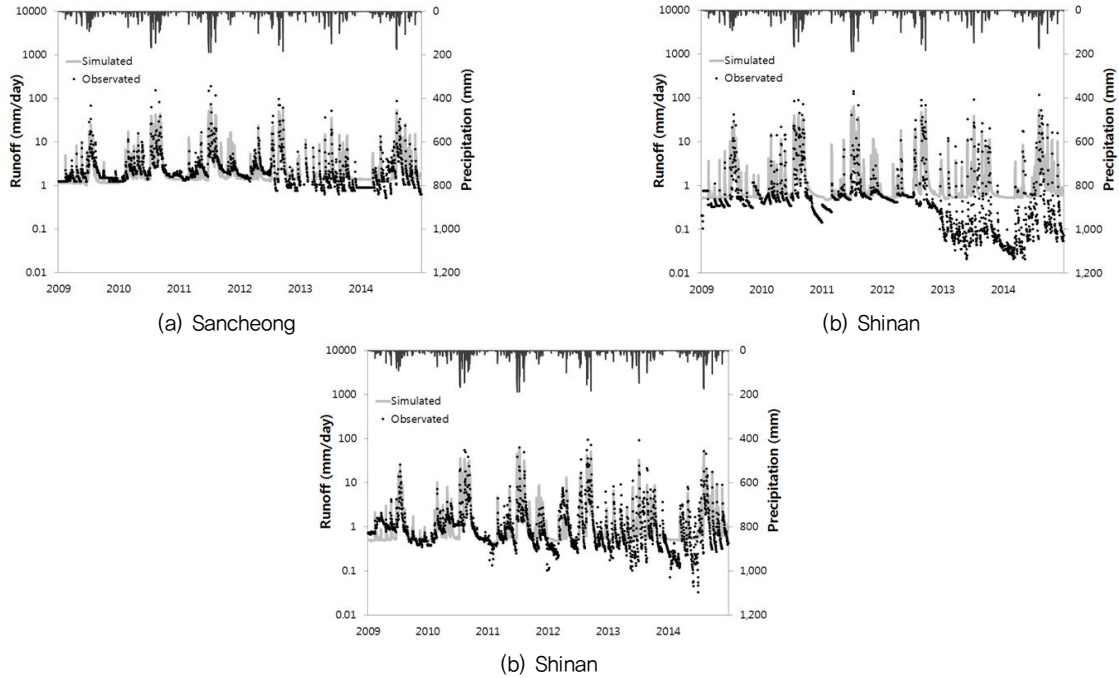


Fig. 4 Observed and simulated daily flow for the validation period

Table 6 Summary of daily runoff statistics for three stations

Statistics	Observed data			Simulated data		
	Sancheong	Shinan	Changchon	Sancheong	Shinan	Changchon
Annual mean (mm)	690.8	738.1	1,093.2	716.6 (3.73)*	758.7 (2.79)*	1,120.4 (2.49)*
Annual mean baseflow (mm)	141.81 (23.35)**	143.43 (23.55)**	251.48 (25.19)**	137.91 (22.13)**	150.83 (22.78)**	262.21 (26.43)**
Total of summer flow (mm)	123.83	132.02	176.76	132.76 (6.73)*	141.96 (7.00)*	181.10 (2.40)*
Total of winter flow (mm)	17.32	22.38	41.25	18.48 (6.28)*	19.93 (-12.29)*	41.20 (-0.12)*
95p, mean of highest 5% (mm)	18.68	21.78	22.34	17.99 (-3.84)*	20.22 (-7.72)*	22.91 (2.49)*
90p, mean of highest 10% (mm)	11.49	13.01	14.27	12.03 (4.49)*	13.29 (2.11)*	16.02 (10.92)*
50p, total of lowest 50% (mm)	0.46	0.49	1.22	0.52 (11.54)*	0.55 (10.91)*	1.16 (-5.17)*
Variance	28.3	46.8	50.5	20.3	25.7	29.9
Standard deviation	5.32	6.84	7.10	4.50	5.07	5.46
CV (Coeff. of variation)	2.81	3.38	2.37	2.30	2.44	1.77

* : Change (%)

** : Rate of baseflow for annual runoff

신안 소유역은 10.91 %, 창촌 소유역은 -5.17 %의 차이를 나타냈다. 각 소유역의 분산범위는 실측 유출량이 28.3 ~ 50.5, 모의 유출량은 20.3 ~ 29.9로 나타났으며, 표준편차는 실측 유출량이 5.32 ~ 7.10, 모의 유출량은 4.50 ~ 5.46으로 나타났다. 이는 모의 유출량 보다 실측 유출량이 상대적으로 평균값에서 많이 벗어나 있는 것을 나타낸다. 유출량의 변동정도를 분석하기 위해 평균 (mean)을 표준편차 (standard deviation)로 나누어 표시한 변동계수 (CV, coefficient of variation)는 실측 유출량이 2.81 ~ 3.38, 모의 유출량은 1.77 ~ 2.44로 모의 유출량 보다 실측 유출량이 상대적으로 많이 변동하는 것을 나타냈다. 유출량은 창촌 소유역이 가장 큰 반면에 변동계수는 산청, 신안 소유역이 크게 나타났다. 이는 2013년 이후의 실측 유출 그래프를 보면 저유량이 다른 년도에 비해 평균 이하로 더 감소한 것이 원인으로 판단된다.

Fig. 5는 각 소유역의 월별 유출량 변화를 나타내고 있으며, 월별 실측 유출량과 모의 유출량을 나타내고 있다. 창촌 소유역이 다른 소유역과 비교하여 상대적으로 모든 월에서 큰 유출량을 나타내고 있다. Fig. 6는 각 소유역의 실측 유출량과 모의 유출량을 유량초과확률곡선 (flow exceedance probability curve)을 통해 비교하였다. 유량초과확률곡선은 유량자료의 크기에 따라 동일 또는 초과된 유량에 대한 시간의 비율을 결정하여 초과확률을 산정한다. 초과확률은 유량값에 따라 도시되며, 전체 자료 범위에 대한 평균 유량 특성을 곡선에 반영한다. 유량초과확률곡선을 비교한 결과 창촌 소유역이 다른 소유역에 비해 상대적으로 큰 유출량을 나타내고 있으며, 산청과 신안 소유역은 비슷한 유출 특성을 나타냈다. 토양특성의 경우 산청은 사양토가 72.43 %로 크게 나타났다, 신안은 식양토 64.29 %, 사양토 28 %, 창촌은 식양토 50.3 %, 사양토 44.1 %로 나타났으며, 창촌의 경우 유역 내의 식양토 비율은 50 % 이나 토지이용의 면적 비율 중 산지가 상대적으로 많으며 평균 경사가 다른 유역에 비해 높게 나타났다. 이는 Kim et al. (1997)의 연구에서 토양과 관련된 지표면 유출 요인으로는 경사도와 경사 길이, 그리고 토양의 구조, 표면상태, 수분함량 등을 들 수 있으며, 평균 경사도와 식양토의 비율이 큰 창촌 소유역이 상대적으로 유출량이 큰 것으로 판단되었다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 남강댐 유역을 대상으로 SWAT 모형을 적용하여 남강댐 상류 소유역인 산청, 신안, 창촌의 유출량을 산정하고 실측자료와 모의자료의 비교 및 분석하여 적용성을 평가하였다. SWAT 모형의 입력자료인 수치고도, 토지피복도, 토양도를 ArcGIS를 통해 구축하고 산청 기상관측소의 2000 ~ 2014년까지 기상자료를 수집하였다. 구축된 입력자료를 기반으로 각 소유

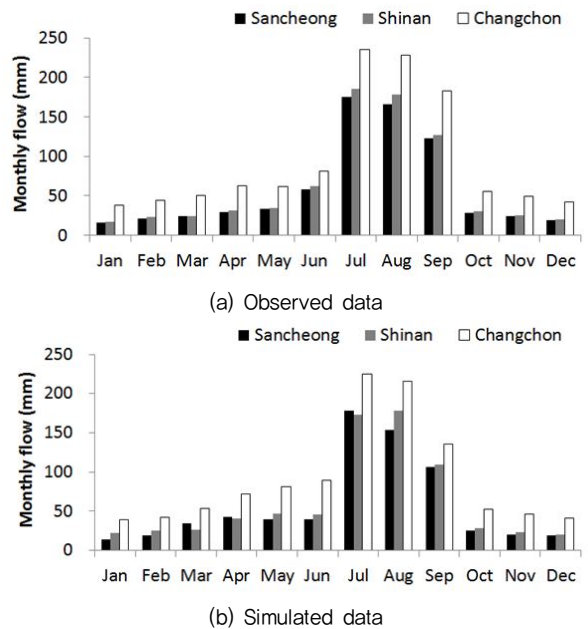


Fig. 5 Observed and simulated monthly mean flow for three stations

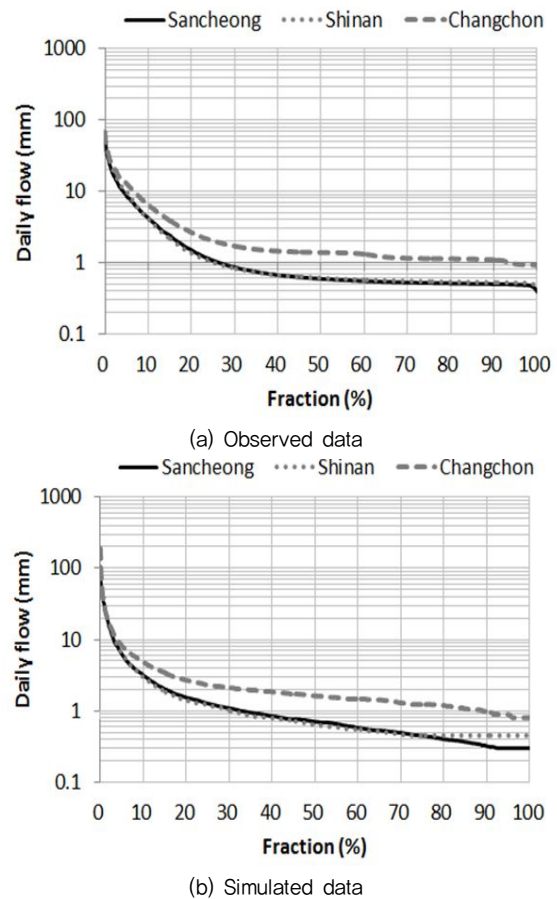


Fig. 6 Observed and simulated flow exceedance probability curves for three stations

역의 유출량을 산정하고 모형의 정확도를 높이기 위해 매개변수 보정을 실시하였으며, 보정방법은 시행착오법을 사용하였다. 보정기간(2003 ~ 2008년)과 검증기간(2009 ~ 2014년)을 나누어 실측자료와 모의자료를 비교하였으며, 적합성을 평가하기 위해 R^2 , RMSE, NSE, RMAE를 산정하여 오차를 분석하였다.

실측자료와 모의자료를 비교한 결과 산청 소유역의 실측 연평균 유출량은 690.8 mm이며, 모의 유출량은 716.6 mm로 나타나 +3.6 % 오차를 나타내었고, 평균 R^2 는 0.68, RMSE는 3.0 mm/day, NSE는 0.56, RMAE는 0.52 mm/day로 나타났다. 신안 소유역의 실측 연평균 유출량은 738.1 mm이며, 모의 유출량은 758.7 mm로 나타나 2.7 %의 오차를 나타내었고, 평균 R^2 는 0.69, RMSE는 3.86 mm/day, NSE는 0.57, RMAE는 0.58 mm/day로 나타났다. 창촌 소유역의 실측 연평균 유출량은 1,093.2 mm이며, 모의 유출량은 1,120.4 mm로 나타나 +2.4 %의 오차를 나타내었고, 평균 R^2 는 0.70, RMSE는 3.74 mm/day, NSE는 0.62, RMAE는 0.44 mm/day로 나타났다. 각 소유역의 유출량 산정결과를 종합하면 연평균 유출량의 오차가 $\pm 5\%$ 이내이며, 평균 R^2 는 0.69, RMSE는 3.53 mm/day, NSE는 0.58, RMAE는 0.51 mm/day로 나타나 유출량이 비교적 높은 일치도를 나타내는 것으로 판단된다.

각 소유역의 수문 통계(연 평균, 연 유출량에 대한 기저유출율, 여름철과 겨울철, 그리고 95, 90, 50p)를 산정하여 각 소유역별 유출특성을 비교, 분석한 결과 상대적으로 창촌 소유역의 유출량이 크게 나타났으며, 신안, 산청 소유역 순으로 유출량이 크게 나타났다. 특히 창촌 소유역은 여름철과 겨울철의 유출량이 다른 소유역보다 크게 나타났다. 또한 실측 유출량과 모의 유출량의 수문 통계를 비교한 결과 $\pm 15\%$ 이하의 차이만을 나타냈다. 기저유출율의 경우 실측자료와 모의자료의 기저유출차이는 -12.13 ~ 16.05 %로 큰 차이는 나타나진 않았지만, 산정할 때 사용된 수평 직선분리법은 사용이 용이하지만 연구자의 주관성이 반영할 수 있어 총 유출에 대한 기저유출의 기여가 상대적으로 큰 장기유출 모의에서는 신뢰도가 떨어진다(Jung et al., 2007). 따라서 기저 유출에 대한 정량적 평가가 필요하며, 유량자료의 범위, 퍼진정도, 그리고 변동을 알아보기 위해 분산, 표준편차, 변동계수(CV)를 산정하여 분석한 결과 모의 유출량 보다 실측 유출량이 상대적으로 많이 변동하는 것을 나타냈다. 평균 유량 특성을 알아보기 위해 유량초과확률곡선을 산정하여 비교한 결과 창촌 소유역이 다른 소유역에 비해 상대적으로 큰 유출량을 나타내고 있으며, 산청과 신안 소유역은 비슷한 유출량 및 유출 특성을 나타냈다.

본 논문에서는 SWAT 모형을 이용하여 남강댐 상류 소유역의 유출량을 산정하고 각 소유역별 실측자료와 모의자료를 비교하였으며, 다양한 모형의 평가지표 및 유출 특성 통계를 통해 적용성을 평가하였다. 향후 융설효과(봄철 토양내의 동결된 물이 녹

아 흘러나오는 것)를 고려하고 실측자료의 기저유출 부분의 편차를 보정하기 위한 방안을 개선할 필요가 있을 것으로 생각된다.

사 사

This work was supported by the Gyeongsang National University Fund for Professors on Sabbatical Leave, 2014

REFERENCES

- Green, W. H. and G. A. Ampt, 1911. Studies on soil physics, 1. the flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences* 4: 11-24.
- Jung, J. Y., B. S. Kang, and Y. K. Cha, 2007. Separation of baseflow using antecedent recession requirement and estimation of representative unit hydrograph by the Nash model. *Proceedings of Korea Water Resources Association* 1762-1767 (in Korean).
- Jung, Y. H., C. G. Jung, S. W. Jung, J. Y. Park, and S. J. Kim, 2012. Estimation of upstream ungauged watershed streamflow using downstream discharge data. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(6): 169-176 (in Korean).
- Kang, M. S., S. K. Yang, W. Y. Jung, and D. S. Kim, 2013. Characteristics of runoff on southern area of Jeju island, Korea. *Journal of environmental science international* 22(5): 591-597 (in Korean).
- Kim, K., J. H. Kim, C. K. Park, 1997. Pesticide runoff from soil surface by rainfall. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 16(3): 274-284 (in Korean).
- Kim, P. W., 2012. A Study on simulation on runoff and pollution load of Namgang-dam basin using SWAT model. Master's thesis, Gyeongnam University (in Korean).
- Kim, S. M., S. J. Kim, and S. M. Kim, 2012. A comparative study of unit hydrograph models for flood runoff estimation for the streamflow stations in Namgang-dam watershed. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(3): 65-74 (in Korean).
- Lee, J. M., Y. D. Kim, B. S. Kang, and H. S. Yi, 2012. Impact of climate change on runoff in Namgang dam watershed. *Journal of Korea Water Resources Association* 45(6): 517-529 (in Korean).
- Lee, Y. J., 2011. Application of SWAT for estimating daily inflow of Jinyang reservoir. Master's thesis, Changwon University (in Korean).
- Moon, J. P., and T. C. Kim, 2006. Streamflow estimation for subbasins of Gap stream watershed by using SWAT2000 model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 48(5):

- 29-38 (in Korean).
11. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, and J. R. Williams Grassland, 2009. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Soil and Water Research Laboratory-Agricultural Research Service Blackland Research Center-Texas AgriLife Research.
 12. Park, J. Y., M. J. Park, S. R. Ahn, and S. J. Kim, 2009. Watershed modeling for assessing climate change impact on stream water quality of Chungju dam watershed. *Journal of Korea Water Resources Association* 42(10): 877-889 (in Korean).
 13. Soil Conservation Service. 1972. Section 4: Hydrology in national engineering handbook. SCS.