



Application of the GSSHA model for the long-term simulation of discharge and water quality at the Peace dam

Jang, Suk Hwan^a · Oh, Kyoung Doo^{b*} · Jo, Jun Won^c

^aProfessor, Department of Civil Engineering, Daejin University, Pocheon, Korea

^bProfessor, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Military Academy, Seoul, Korea

^cPh.D Course student, Department of Civil and Environmental Engineering, Daejin University, Pocheon, Korea

Paper number: 20-008

Received: 6 February 2020; Revised: 20 March 2020; Accepted: 20 March 2020

Abstract

It is usually not easy to simulate the hydrologic cycle or water quality for ungaged watersheds, especially for long-term simulation. In this paper we evaluated the applicability of GSSHA, a process-based distributed hydrologic model, for the long-term discharge and water quality simulation for the ungaged Peace dam watershed. From the comparative analysis of the simulated discharge and water quality series with measured ones, we concluded that with its overall fair performance on simulating hydrograph patterns of the peak discharges and base flows for major storms the GSSHA model showed some possibility to be used as a watershed model even with its overestimation of peak discharges for small storms and different trends of simulated water quality from measured ones for some periods.

Keywords: GSSHA, Peace dam, Distributed model, Base flow, Water quality

평화의댐 장기 유출과 수질 모의를 위한 GSSHA 모형의 적용

장석환^a · 오경두^{b*} · 조준원^c

^a대전대학교 건설시스템공학과 교수, ^b육군사관학교 토목환경학과 교수, ^c대전대학교, 토목환경공학과 박사과정

요 지

미계측 유역의 수문순환이나 수질을 모의하는 것은 매우 어려운 것이 현실이며 특히 장기간에 걸쳐 모의를 해야 하는 경우에는 더욱 그러하다. 본 연구에서는 미계측 유역인 평화의댐 유역을 대상으로 물리적인 과정 기반의 분포형 수문 모형 GSSHA의 장기 유출과 수질 모의에 대한 적용성을 검토하였다. 분포형 유역 모형 GSSHA를 평화의댐 유역에 적용하여 유량과 수질 모의치를 실측치와 비교한 결과 소규모 호우로부터의 첨두유량을 과대하게 모의하거나 실측된 수질 자료와 일부 구간에서 다른 경향성을 보이는 등 일부 불일치하는 사항들이 나타났으나 모의된 주요 호우의 첨두 유량과 기저유출의 전반적인 수문곡선 형태는 비교적 양호한 것으로 나타나 실무에서의 적용 가능성이 있는 것으로 판단하였다.

핵심용어: GSSHA, 평화의댐, 분포형 모형, 기저유출, 수질

1. 서 론

한강유역은 우리나라에서 가장 큰 유역일 뿐만 아니라 가장 많은 인구가 살고 있으며 수도 서울을 비롯한 많은 도시에 용수를 공급하고 처리된 하수를 배제하는 중요한 기능을 담당하

고 있다. 또한 한강유역은 다른 대규모 유역과 달리 남북공유 하천인 북한강과 임진강을 지류로 두고 있다. 남북공유하천의 대표적인 결과물로 널리 인식되고 있는 평화의댐은 북한강 상류에 위치한 홍수전용댐으로 치수 효과에 대한 논란뿐만 아니라 정치사회적인 파장이 적지 않았던 댐이기도 하다.

북한은 그동안 남북공유하천인 북한강과 임진강에 임남댐과 황강댐을 비롯한 많은 댐들을 건설하여 왔고 이로 인하여 북한강과 임진강에 수량과 수질, 수생태계를 포함한 수문생태

*Corresponding Author. Tel: +82-2-2197-2952
E-mail: okd0629@hanmail.net (K. D. Oh)

학적인 변화가 일어나고 있다. 화천댐과 군남저수지를 비롯한 유량관측시설과 수질관측지점에서 수량이 감소하고 수질이 악화되는 경향이 확인되고 있다. 임남댐 건설 후 화천댐 유입량은 지속적으로 감소해왔으며 최대 60%까지 북한강의 유입량이 감소하는 것으로 보고되고 있다(K-water Institute, 2013).

이와 같이 변화하는 수자원공급 여건 하에서 미래의 기상변화까지 반영하여 유역으로부터 공급 가능한 수자원의 양과 수질을 사전에 결정하여 대비하려는 노력은 지속가능한 사회를 위해 당연한 일이라 할 것이다. 그러나 이를 위해서는 기후와 유역 특성의 변화가 초래할 수문학적 변화와 그에 따른 수질과 수생태계의 변화를 예측할 수 있는 도구가 필요한데 최근 들어 유역의 수문순환과 수질변화를 모의할 수 있는 유역 모형이 강력한 의사결정지원 도구로 떠오르고 있다(Kim *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2009; Park *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2018).

일례로 K-water Institute (2013)는 북한강 최상류지점부터 의암댐까지를 4개의 소유역으로 분할하여 임남댐 유무와 기후변화에 따른 유출량의 변화를 예측한 바 있다. 이를 위하여 SWAT 모형을 적용하였는데 모형 입력자료와 강수자료의 불확실성으로 인한 어려움을 겪은 것으로 기술하고 있다.

SWAT 모형은 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 준분포형 모형으로서 수문학적으로 동일한 반응을 보일 것으로 판단되는 소유역(HRU)을 기반으로 강우유출과 수질을 모의한다(Kim *et al.*, 2005). 강우와 기상자료를 비롯한 입력자료는 수문기상학적으로 볼 때 매우 긴 시간에 해당하는 일 단위로 입력되어지며 이에 따라 유역의 수문학적인 반응을 계산하는 복잡하고 섬세한 과정에 많은 경험적인 요인들이 관여하게 되며 그 대신 복잡한 수문학적 계산이 매우 단순하게 된다. 이와 같은 경험적인 매개변수들에 의한 계산 과정의 단순화는 수년 이상의 장기적인 유출을 모의할 경우에 다른 모형들이 따라오기 어려운 장점이 되기도 한다. 그러나 경험적인 매개변수들을 보정할 실측자료가 없는 미계측 유역에 적용하기에는 매우 어려운 문제점이 발생하게 되는데 앞서 기술한 K-water Institute의 어려움도 이와 같은 맥락에서 발생한 것으로 보인다.

한편, 분포형 유역 모형은 물리적인 인자와 과정을 기반으로 수문순환과정을 모의하기 때문에 도시화 등 유역의 물리적 특성이 달라질 때 그 영향을 잘 모의할 수 있으며 실측 가능한 물리적 자료들을 바탕으로 미계측 유역에도 적용가능한 장점이 있다(Chang *et al.*, 2006). 그러나 준분포형 모형 SWAT이 국내에서 널리 사용되는 것과는 달리 분포형 유역 모형은 경안천 유역의 물순환 분석(Chang *et al.*, 2005)과 경안천 유역에 내린 단일 강우사상에 대해 GSSHA 모형을 이용하여 단기

간 동안 유출을 모의한 경우(Chang *et al.*, 2006), 설마천 시험 유역에서의 토양수분 모의에 GSSHA 모형을 적용한 경우(Chang *et al.*, 2007), 미계측 유역인 임진강 유역에 대해 수문레이더와 자체 개발한 분포형 유역 모형을 이용하여 홍수량을 모의한 경우(Park and Hur, 2009), K-DRUM 분포형 유역 모형과 MODFLOW 지하수 모형을 연계하여 기저유출 모의를 개선시킨 연구(Hur *et al.*, 2018) 외에 국내에 적용된 사례가 많지 않다. 이것은 Chang *et al.* (2006)이 지적한 바와 같이 분포형 유역 모형의 입력자료 구축과 모형의 구동에 많은 시간과 노력이 소요되는 단점이 있기 때문이다.

그러나 최근 들어서 GUI 기반의 사용자 인터페이스가 획기적으로 발전하면서 입력자료 구축의 어려움이 많이 해소되고 있으며 국내에서도 MPI 기법을 이용한 병렬화 처리 기법의 채택 등 분포형 유역 모형의 계산 시간을 단축하려는 노력이 있었지만(Chung *et al.*, 2010) 분포형 유역 모형의 실무 적용은 여전히 미미한 상태에 놓여 있다. 그리고 분포형 유역 모형을 이용하여 유역으로부터의 유출량을 모의한 연구들은 다수 있었지만 수질까지 연계하여 모의한 경우는 거의 없었다.

그런데 앞으로는 강우유출과 더불어 수질을 동시에 연계하여 모의할 수 있는 유역 모형에 대한 수요가 더욱 증가할 것으로 예상된다. 이에 본 연구에서는 강우와 유역에 대한 정보가 부족하여 사실상 미계측 유역에 해당하지만 유량과 수질 모의 결과에 대한 보정과 검정이 가능한 평화의댐을 대상으로 분포형 모형 GSSHA의 장기 유출과 수질 모의에 대한 적용 가능성을 검토하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 대상유역

평화의댐은 북한강 상류 접경지역에 위치하고 있어서 남북교류와 군사안보적인 측면에서의 중요성뿐만 아니라 한강 하류부의 수량과 수질에 영향을 미칠 수 있는 중요한 댐이다. 유역면적이 3,227 km²인 평화의댐 유역은 대부분 북한지역에 포함되어 있다. 그리고 2003년 유역면적 2,394 km²의 임남댐이 완공된 이후로는 자체 유역이 834 km²로 감소하여 유량 감소와 이로 인한 수질 악화의 우려가 깊어지고 있다.

그동안 홍수전용댐인 평화의댐 유역에 대해서는 단기간에 발생하는 집중호우 또는 임남댐의 붕괴와 같은 극한 상황에서의 홍수유출이나 평화의댐 저류가 하류부 댐 운영에 미치는 영향 등을 중심으로 연구가 이루어져 왔다(Jun *et al.*, 1993; Yoo *et al.*, 2001). 그러나 앞으로 기후변화와 남북교류의 진전

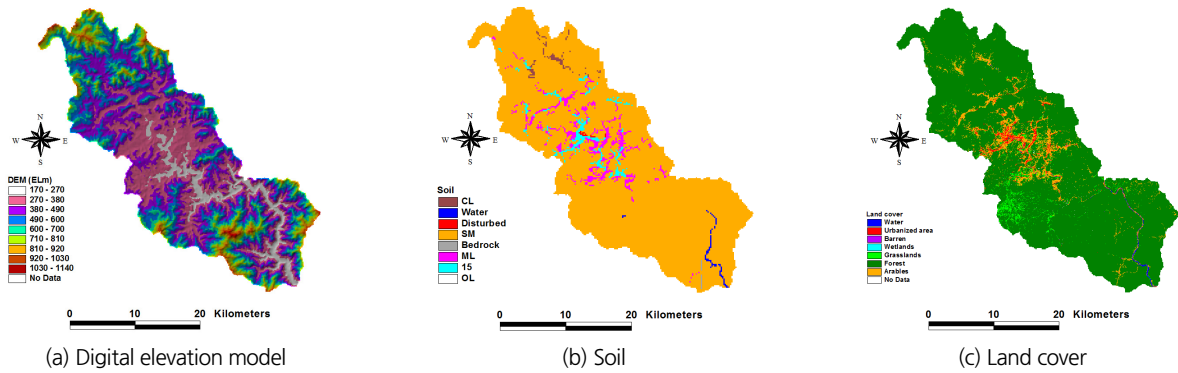


Fig. 1. Study site: the Peace dam watershed

에 따라서는 수량뿐만 아니라 환경과 생태계에 관련한 여러 가지 문제들이 제기 될 수 있는 중요한 유역이다.

본 연구에서는 사실상 미세측 유역에 해당하는 평화의댐 유역의 장기 유출과 수질 모의에 대한 적용 가능성을 검토하여 분포형 유역 모형의 연구와 실무 적용에 대한 관심을 제고하는 계기로 삼고자 하였다.

연구 대상유역인 평화의댐 유역의 지형과 토양 그리고 토지피복은 Fig. 1과 같다.

유역면적은 834 km²로 유역출구점인 평화의댐은 38°12'50.4"N, 127°50'48.48"E에 위치하고 있다. 유역의 토양은 모래가 섞인 실트질 토양(SM)이 92%를 차지하고 있으며 그 외에 무기질 실트 토양(ML) 4%, 유기질 실트 토양(OL) 2% 등이 분포하고 있다. 토지피복은 산림이 90%를 차지하고 있으며 그 외에 농경지 7%, 초지 2%, 시가화건조지역(도시화된 지역) 1% 등으로 구성되어 있다. 유역을 흐르는 하천은 북한강의 제1지류 중의 하나인 금성천이다.

2.2 GSSHA 모형에 의한 강우유출 및 수질 해석

GSSHA (Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis) 모형은 물리적 과정을 기반으로 한 격자체계의 다차원 분포형 수문·수질 모형이다. 이 모형은 그 전신이라고 할 수 있는 CASC2D 모형에 비해 다음과 같은 세 가지 수문학적 기능이 개선되었다. 첫 번째로 비포화대(vadose zone)의 토양 수분을 모의할 수 있는 기능을 네 가지로 확충하였다(Downer and Ogden, 2006). 본 연구에서는 그중에서도 비교적 적용이 단순하면서도 비강우기에 토양 공극의 수분이 빠져나가서 토양의 침투능이 회복되는 과정을 효율적으로 모의할 수 있는 GAR (Green and Ampt with Redistribution) 침투 모형을 채택하였다.

두 번째는 토양의 비포화대와 지하수 대수층 간의 연동 기

능이다. 중력의 작용과 모세관 현상에 의해 토양 비포화대의 수분은 수직 방향으로 유동하여 지하수 수위에 영향을 미치게 된다. 지하수 흐름은 수심방향으로 적분된 2차원 자유수면 지하수 방정식에 의해 모의된다. 하천을 나타내는 1차원 하도망이 모의에 포함될 경우 지하수 대수층과 하도 사이에 Darcy 법칙에 의해 양방향으로의 흐름을 반영할 수 있으며 지하수위가 지표면까지 상승하여 지표면으로 흘러나오는 삼출(exfiltration)도 모의할 수 있다.

세 번째는 증발산량 계산 기능의 보완인데 본 연구와 같이 유역으로부터의 장기 유출을 모의할 경우에 증발산량 계산은 매우 중요한 요소가 된다. 잠재증발산량(PET)은 나지에 대한 Deardorff 방법이나 식생을 고려한 Penman-Monteith 방법에 의해 계산한다. 실제 증발산량(AET)은 Eq. (1)에 의해 계산된다.

$$AET = PET \left[\frac{\theta - \theta_w}{0.75(\theta_s - \theta_w)} \right]^P \quad (1)$$

여기서, θ 는 토양의 함수비, θ_s 는 토양의 포화함수비, θ_w 는 식생이 사용할 수 있는 최소 함수비이다. 그리고 P 는 지역의 특성을 반영하는 매개변수로 현재는 모형에서 1.0으로 고정되어 있다. 식생의 엽면 기공 저항(canopy resistance)이 계절별로 달라지는 것을 반영하여 성수기인 여름에 증발산이 활발하고 그 외의 계절에는 증발산이 감소하는 것을 반영할 수 있다.

GSSHA 모형이 CASC2D 모형과 크게 차이나는 점은 유역 내에 분포하는 점오염원과 비점오염원에 대한 수질 모의 기능이다. 점오염원은 하도망을 통하여 유입되는 형태로 모의된다. 한편, 유역에 분포하는 비점오염물질은 토지피복 유형에 따라 지표면이나 지표면에서 일정 깊이까지의 혼합층(mixing layer)에 분포하는 것으로 가정하여 모의할 수 있다. 이때 토

양 입자와 간극수에 분포하는 오염물질의 비율은 화학적인 분포계수(K_d) ($m^3 \cdot kg^{-1}$)와 토양의 수분함량에 따라 Eq. (2)에 의해 계산된다.

$$f_d = \frac{1}{\theta + K_d(1-\theta)\rho_s} \quad (2)$$

여기서, f_d 는 토양층 간극수에 녹아 있는 오염물질의 비율이고 ρ_s 는 건조한 토양의 밀도($kg \cdot m^{-3}$)이다. 지표면에 고인 물과 토양층에 있는 오염물질 간 농도차이에 따라 Eq. (3)에 의해 양 방향으로 물질교환율 F 를 계산할 수 있다.

$$F = (C_{ponded} - C_{soil})KA \quad (3)$$

여기서, C_{ponded} 와 C_{soil} 은 각각 지표면에 고인 물과 토양 간극수의 오염물질 농도이며 K 는 물질전달계수($m \cdot s^{-1}$), A 는 계산 격자 셀의 면적(m^2)이다.

강우자료는 Fig. 2와 같이 기상청 기상자료개방포털에서 무인자동관측소(Automatic Weather Station)인 마현관측소(위도: 38.2747°, 경도: 127.553°)와 임남관측소(위도: 38.2806°,

경도: 127.8647°)의 2017년과 2018년 시강우량을 다운로드 받아 이용했으며 티센 방법에 의해 유역 내에 공간적으로 분포시켰다. 2017년 마현관측소와 임남관측소에 내린 강우량은 각각 1,106.5 mm와 1,173.5 mm였고 2018년은 1,333.5 mm와 1,243.0 mm였다.

기온과 대기압, 상대습도, 풍속, 운량 등의 기상자료는 북춘천관측소의 시자료를 다운로드 받아 이용하였다(Figs. 3~7). 모형의 보정과 검정을 위한 평화의댐 지점에서의 유량자료는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 화천댐 일유량에 유역 면적비를 적용하여 구하였다. 평화의댐 지점 유량도 제공되지만 자료의 신뢰성이 낮은 것으로 판단하였다. 임남댐 건설 이후 임남댐 상류로부터의 자연유출량은 사실상 없는 상태이기 때문에 임남댐 상류부의 자연유출량은 배제하여 모의하였다. 수질은 부영양화를 일으키는 주원인 물질인 총질소(TN)와 총인(TP)을 모의하였으며 모형 보정과 검정을 위한 자료는 환경부 물환경정보시스템에서 2017년과 2018년 평화의댐 1 지점의 수질 측정 자료를 다운로드 받아 이용하였다.

본 연구에서는 Downer and Ogden (2004)이 GSSHA 모형의 보정과 검정에 사용했던 자료분리테스트기법(sample-split test)을 채택하여 모형의 보정과 검정을 수행하였다. 2017년

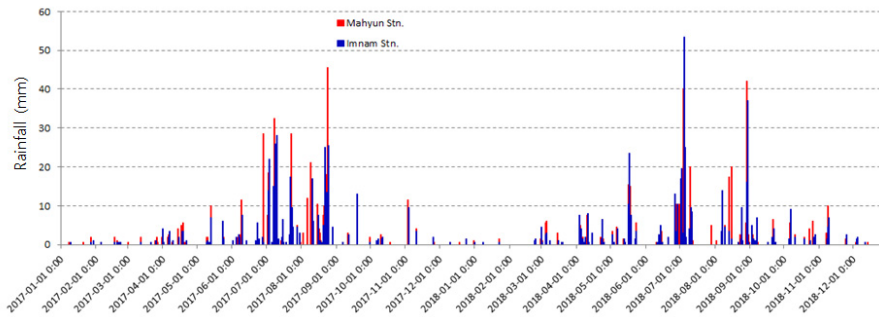


Fig. 2. Hourly rainfall data at the Mahyun and Imnam AWS

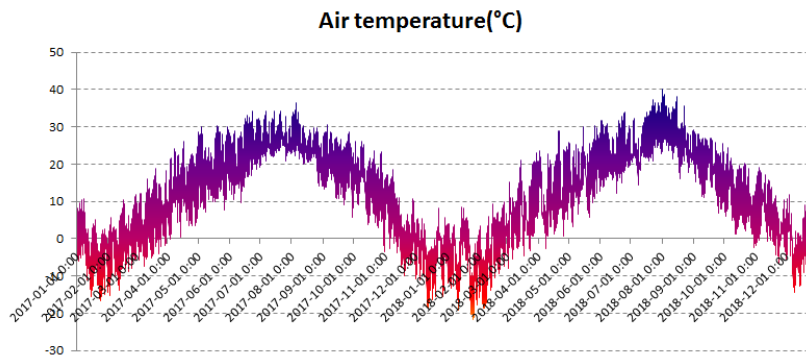


Fig. 3. Hourly air temperature at the Bukchoonchun weather station

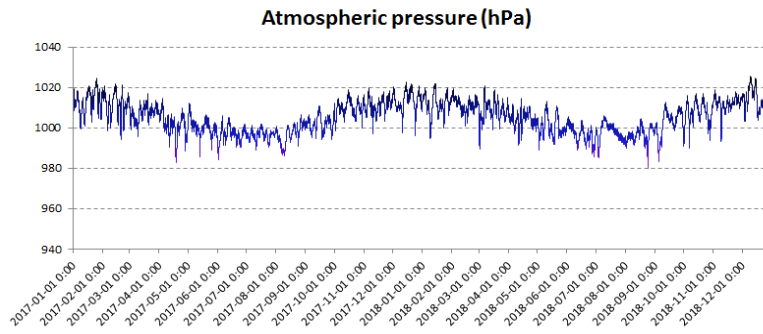


Fig. 4. Hourly atmospheric pressure at the Bukchoonchun weather station

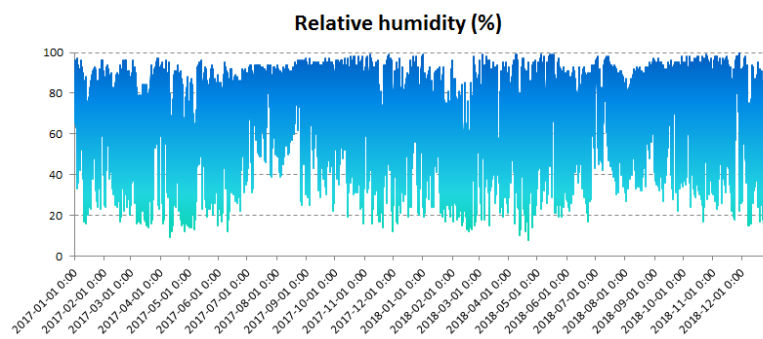


Fig. 5. Hourly relative humidity at the Bukchoonchun weather station

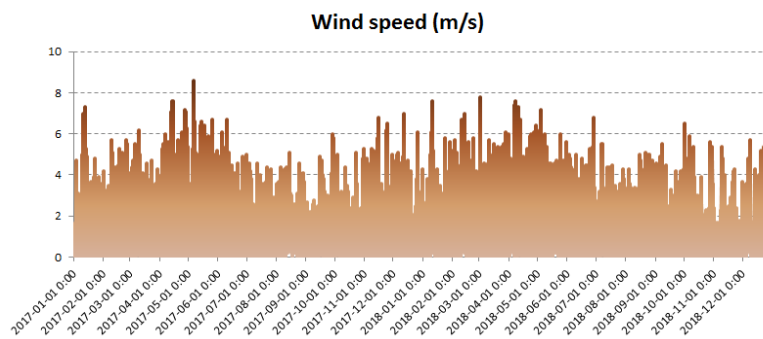


Fig. 6. Hourly wind speed at the Bukchoonchun weather station

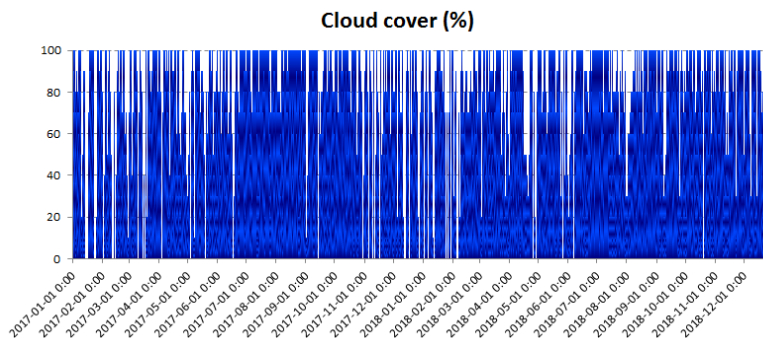


Fig. 7. Hourly cloud cover at the Bukchoonchun weather station

기간을 모형의 매개변수 보정에 사용하고 2017년부터 2018년까지 전체 기간을 검정에 사용하는 방식이다. 이때 2017년은 보정과 검정과정에서 중복되는데 2017년에 초기조건으로 부여한 지하수위와 토양 수분 등이 모의가 진행되면서 점차 유역의 지하수위와 토양 수분 분포에 수렴하여 2018년에 대한 모의를 수행하는데 도움을 주게 된다.

Table 1은 GSSHA 모형의 보정을 통하여 최종 결정한 GAR 침투모형의 토양 침투능 관련 매개변수들이며, Table 2는 지하수 유동에 관한 매개변수이고 Tables 3 and 4는 토지피복유형에 따른 비점오염물질인 총질소(TN)와 총인(TP) 거동 관련 매개변수들이다. GSSHA 모형에는 매개변수 최적화 기능이 있으나 아직까지 만족스러운 단계에는 이르지 못한 것으로 보여 본 연구에서는 시행착오법에 의해 매개변수 보정을 수행하였다.

최종 구축된 평화의댐 유역 GSSHA 모형은 Fig. 8과 같다. 계산 셀은 가로와 세로가 1,500 m 인 정사각형으로 총 370개의 셀로 구성하였다. 계산 셀의 수가 많아지면 장기 유출 해석과 같이 오랜 기간에 대해 모의하는 경우 계산 시간이 비현실적으로 길어지기 때문에 계산 결과가 적절한 범위 내에 있다

Table 1. Infiltration parameter values from Peace dam watershed calibration

| Parameter | Soil types | | |
|---|------------|--------|--------|
| | SM | ML/OL | Clay |
| Hydraulic conductivity (cm · hr ⁻¹) | 3.006 | 0.282 | 0.091 |
| Capillary head (cm) | 11.010 | 20.880 | 31.630 |
| Porosity (-) | 0.453 | 0.464 | 0.475 |
| Pore distribution index (-) | 0.378 | 0.242 | 0.165 |
| Residual saturation (-) | 0.041 | 0.075 | 0.090 |
| Field capacity (-) | 0.207 | 0.318 | 0.396 |
| Wilting point (-) | 0.095 | 0.197 | 0.272 |

Table 2. Groundwater parameter values from Peace dam watershed calibration

| Parameter | Soil types | | |
|---|------------|-------|------|
| | SM | ML/OL | Clay |
| Hydraulic conductivity (cm · hr ⁻¹) | 15.63 | 8.75 | 2.19 |
| Porosity (-) | 0.45 | 0.46 | 0.48 |

Table 3. TN parameter values from Peace dam watershed calibration

| Parameter | Land covers | | | | |
|---|-------------|----------|----------|-----------|----------|
| | Urban | Arable | Forest | Grassland | Barren |
| Dispersion (m ² · s ⁻¹) | 1.00E-03 | 1.00E-03 | 1.00E-03 | 1.00E-03 | 1.00E-03 |
| Decay (day ⁻¹) | 3.80E-03 | 3.80E-03 | 3.80E-03 | 3.80E-03 | 3.80E-03 |
| Uptake (m · day ⁻¹) | 7.90E-05 | 7.90E-05 | 7.90E-05 | 7.90E-05 | 7.90E-05 |
| Soil concentration (mg · kg ⁻¹) | 5.31E+03 | 6.40E+03 | 1.86E+03 | 2.70E+03 | 1.65E+03 |
| Groundwater concentration (mg · L ⁻¹) | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| Initial concentration (mg · L ⁻¹) | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| Soil water distribution (L · kg ⁻¹) | 2.42E+01 | 2.42E+01 | 2.42E+01 | 2.42E+01 | 2.42E+01 |
| Solubility (mg · L ⁻¹) | 1.50E+03 | 1.50E+03 | 1.50E+03 | 1.50E+03 | 1.50E+03 |

Table 4. TP parameter values from Peace dam watershed calibration

| Parameter | Land covers | | | | |
|---|-------------|----------|----------|-----------|----------|
| | Urban | Arable | Forest | Grassland | Barren |
| Dispersion (m ² · s ⁻¹) | 1.00E-03 | 1.00E-03 | 1.00E-03 | 1.00E-03 | 1.00E-03 |
| Decay (day ⁻¹) | 2.60E-03 | 2.60E-03 | 2.60E-03 | 2.60E-03 | 2.60E-03 |
| Uptake (m · day ⁻¹) | 5.30E-05 | 5.30E-05 | 5.30E-05 | 5.30E-05 | 5.30E-05 |
| Soil concentration (mg · kg ⁻¹) | 2.10E+02 | 3.20E+02 | 6.75E+01 | 1.13E+02 | 5.25E+01 |
| Groundwater concentration (mg · L ⁻¹) | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| Initial concentration (mg · L ⁻¹) | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| Soil water distribution (L · kg ⁻¹) | 1.35E+02 | 1.35E+02 | 1.35E+02 | 1.35E+02 | 1.35E+02 |
| Solubility (mg · L ⁻¹) | 2.00E+02 | 2.00E+02 | 2.00E+02 | 2.00E+02 | 2.00E+02 |

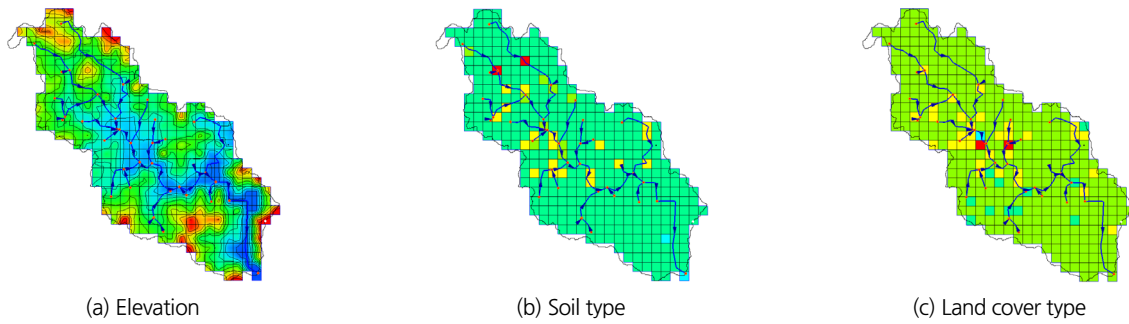


Fig. 8. GSSHA model for the Peace dam watershed

면 계산 셀의 수를 최소화하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 유량 모의 결과가 안정적으로 수렴하는 범위 내에서 격자의 크기를 점차 늘려가면서 적절한 격자의 크기를 시행착오법으로 구하였다. 모형의 실행 시간은 HP Z800 워크스테이션 (24GB RAM, Intel Xeon 3.07-3.06GHz Dual Processors)에서 2시간 정도 소요되었다.

3. 연구결과 및 토의

3.1 평화의댐 강우유출 해석 결과

2017년 실측 자료에 대해 보정된 매개변수를 이용하여 2017년부터 2018년까지 2년 동안 연속하여 평화의댐 지점의 유입량을 모의한 결과는 Fig. 9와 같다. GSSHA 모형은 수문학적 반응이 빠른 지표면 유출은 초 단위로 모의하고 증발산은 한 시간 단위로 모의하는데 최종 모의 결과는 초 단위부터 일 단위까지 지정하여 출력할 수 있다. 본 연구에서는 실측 일 유량자료와 비교하기 위하여 모의 결과를 1일 간격으로 출력하였다.

평화의댐 지점에 대해 모의된 최대 유입량은 2018년 8월 31일 발생한 $782.4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 이며 2년간에 걸친 총 유입량은 12.7억 톤으로 연평균 6.4억 톤 정도이다. 평화의댐 유역에 2년간 내린 강우량이 약 19.6억 톤이므로 모의된 유량계열의 평균 유출률은 0.65 정도로 비교적 적절한 범위에 있는 것으로 보인다. 한편, 화천댐에서 측정된 유량으로부터 면적비에 의해 구한 평화의댐 실측 유량계열의 총 유입량은 14.5억 톤으로 연평균 7.3억 톤 정도인데 평균 유출율은 0.74 정도로서 다소 높은 것으로 보인다.

GSSHA 모형에 의한 평화의댐 유입량의 시계열 모의치와 측정치를 비교하여 Fig. 10에 제시하였다.

모의된 유입량계열은 주요 호우에 대한 침투유량의 크기와 그 발생 시기 그리고 기저유출의 형태 등 전체적인 수문곡선의 형태가 측정치와 비교적 잘 일치하는 것으로 보인다. 그러나

최대 유량이 측정치 보다 과대하게 모의되었고 특히 2017년과 2018년에 발생하는 여러 개의 작은 규모 호우에 대해 침투유량을 측정치 보다 과대하게 모의하는 경향을 보이고 있다.

이것은 GSSHA 모형의 매개변수 보정이 불완전한데 기인할 가능성도 있지만 일 유량이라는 자료 측정의 스케일(scale) 때문에 홍수의 침투유량을 실제 보다 과소하게 평가하고 있을 가능성도 배제할 수 없다. 예를 들어 홍수의 지속기간이 수 시간인 작은 규모의 홍수일 경우에 침투유량의 크기에 비해 화천댐으로의 총 유입량은 상대적으로 작을 수 있다. 이 경우 이 홍수가 발생한 날에 대한 일 평균 유량은 홍수의 침투유량에 비해 매우 작게 나타날 수 있다.

평화의댐 지점에서의 장기 유량 모의 결과가 통계적으로 적절한지를 평가하기 위하여 Moriasi *et al.* (2015)이 제시한 NSE (Nash-Sutcliffe efficiency)와 PBIAS (percent bias) 지표표를 검토하였다(Table 5). 두 지표 모두 장기 유량계열의 평가에 적합한데 NSE는 모의치계열과 측정치계열간의 경향성이 어느 정도 일치하는지를 평가하는 반면에 PBIAS는 모의치와 측정치간의 오차 정도를 평가하는 지표이다.

일반적으로 일 유량계열에 대해 NSE가 0.0 보다 작으면 unacceptable, 0.50 이상이면 satisfactory, 0.7 이상은 good으로 평가한다. PBIAS는 $\pm 30\%$ 보다 크면 unacceptable, 10에서 15% 범위는 satisfactory, 5에서 10%는 good으로 평가한다 (Moriasi *et al.*, 2015).

평화의댐 지점에 대해 모의된 유량계열을 살펴보면 매개변수 보정 기간인 2017년은 경향성은 좋은데 오차는 큰 것으로 나타났다. 모형의 검증 기간인 2018년은 경향성은 떨어지지만 오차는 매우 만족할만한 수준으로 나타났다. 특히 2018년 경향성이 크게 떨어진 것은 여러 차례 발생한 소규모 호우의 침투유량을 측정치 보다 과대하게 모의한 때문으로 보여 추후 이에 대한 원인 규명과 이를 개선하기 위한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

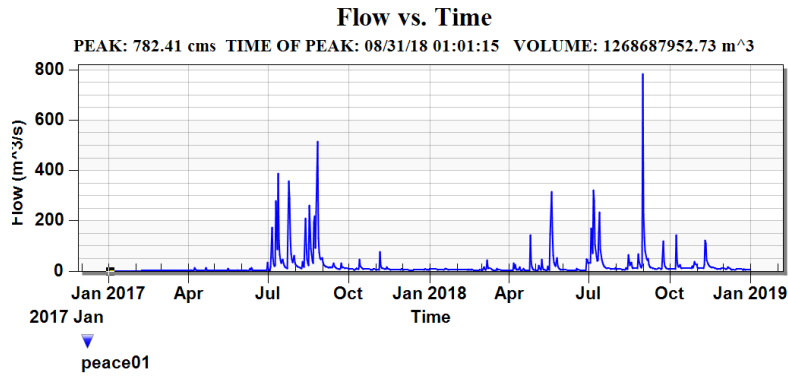


Fig. 9. Simulated discharge hydrograph at the Peace dam

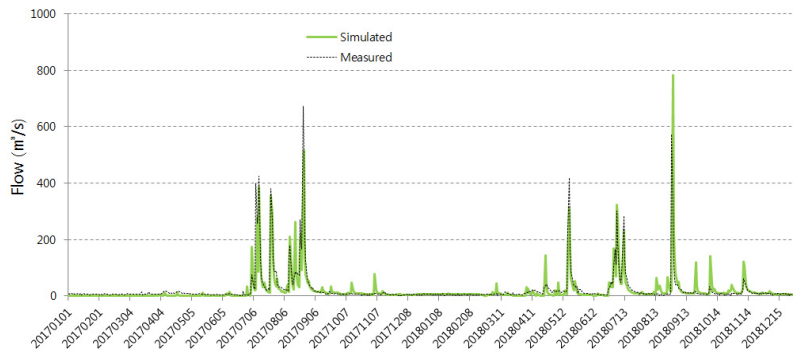


Fig. 10. Simulated and measured inflow series at the Peace dam

Table 5. Statistical performance evaluation for simulated flow series at the Peace dam

| Simulation period | Performance evaluation criteria | | Remarks |
|-------------------|---------------------------------|-------|-----------------------------|
| | NSE | PBIAS | |
| Year 2017 | 0.75 | 25 | good / acceptable |
| Year 2018 | 0.30 | 2 | acceptable / very good |
| Years 2017~2018 | 0.58 | 12 | satisfactory / satisfactory |

3.2 평화의댐 수질 해석 결과

2017년을 대상으로 보정된 매개변수를 이용하여 2017년부터 2018년까지 2년 동안 평화의댐 지점에 대해 총질소(TN)와 총인(TP)을 모의한 결과는 Figs. 11 and 12와 같다.

Figs. 11 and 12에서 총질소와 총인의 모의치가 최초 한 달 정도 영으로 유지되다가 2017년 7월 초까지 비정상적으로 크게 진동하는 것은 수질 모의를 위해 부여한 초기조건 때문에 발생하는 해의 일시적인 불안정 현상으로 추정되며 7월 이후로는 정상적인 거동을 보이고 있다. 2016년 6월부터 6개월 정도 모의 기간을 추가로 연장하면 2017년부터는 보다 안정적인 해를 구할 수도 있었으나 분석기간이 길어지면 모의된 유량의 변동 상태를 실측치와 시각적으로 비교하는데 어려움이

있을 뿐만 아니라 초기조건에 따라 진동하는 해의 상태도 논문에서 제시하고자 하는 중요한 연구 결과라고 판단하여 모의 기간의 연장은 시도하지 않았다.

Fig. 12를 살펴보면 2018년 9월부터 12월까지 총인의 모의치가 실측치와 다른 경향성을 보이고 있다. 이 기간 동안 실측치는 감소해가는 반면에 모의치는 증가하는 경향을 보이고 있다. 그런데 2017년과 2018년 실측된 총인 자료를 비교해보면 2017년 9월에 매우 낮았던 총인 농도는 11월까지 급격하게 증가한 후 12월에는 큰 변동이 없는 추세를 보인 반면에 2018년은 9월에는 상당히 높은 농도 상태였다가 12월까지 지속적으로 감소해가는 추세를 보이고 있어서 실측 자료 간에도 매우 다른 경향성을 보이고 있다. 이 부분은 추후 원인 규명을

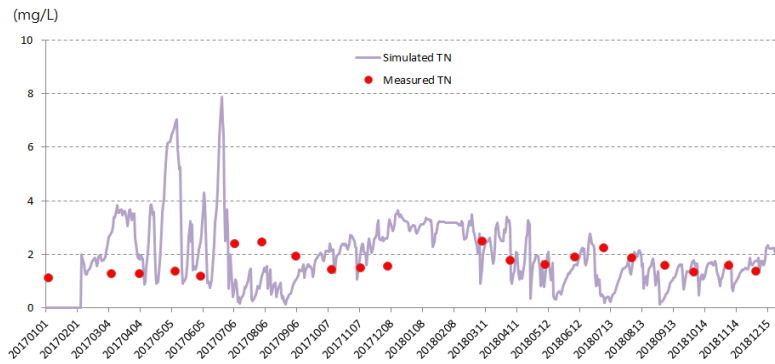


Fig. 11. Simulated and measured TN at the Peace dam

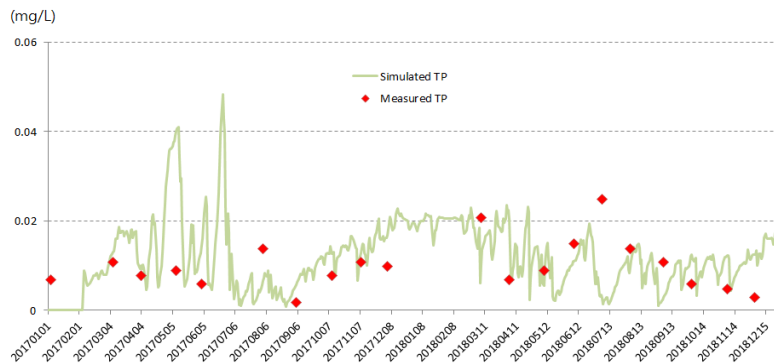


Fig. 12. Simulated and measured TP at the Peace dam

Table 6. Statistical performance evaluation for simulated contaminant series at the Peace dam

(Unit: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

| Simulation period | Mean of TN | | Mean of TP | | Remarks |
|-------------------|------------|----------|------------|----------|---------|
| | Simulated | Measured | Simulated | Measured | |
| Year 2017 | 1.97 | 1.78 | 0.012 | 0.009 | |
| Year 2018 | 1.78 | 1.78 | 0.012 | 0.012 | |
| Years 2017~2018 | 1.83 | 1.78 | 0.012 | 0.011 | |

위한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

평화의댐 1 지점 수질측정자료는 월 1회 측정된 자료가 사용하는데 2017년 2월과 2018년 1월, 2월은 결측되었다. 수질측정자료는 비연속측정(*grab sampling*)인 반면에 수질 모의치는 연속된 자료이기 때문에 NSE나 PBIAS에 의한 평가가 제한된다. 이에 따라 본 연구에서는 일정 기간별로 수질측정치와 모의치의 평균값을 비교하였다(Table 6). 이때 모의 초기의 해가 비정상적으로 영인 상태를 유지하다가 진동한 구간인 2017년 1월부터 7월까지지는 제외하고 분석하였다.

평화의댐 지점에 대해 모의된 총질소와 총인은 평균값에 있어서는 측정자료와 비교할 때 만족할만한 수준으로 판단된

다. 그러나 월 1회 측정된 자료로는 강우유출 등에 따라 큰 폭으로 변동할 수 있는 수질변화 양상을 적절히 반영하기 어렵기 때문에 수질 변화의 경향성 등을 세밀하게 비교 평가하는 것이 불가능하다. 추후 연속 측정된 자료와의 비교를 통한 추가적인 검토가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 북한강 상류에 위치한 미계측 유역인 평화의댐 유역을 대상으로 유역 유출과 수질 모의를 통하여 분포

형 유역 모형인 GSSHA 모형의 적용 가능성을 검토하였다. 이를 위하여 평화의댐 유역에 대한 수치표고모형(DEM)과 토양, 토지피복 주제도를 이용하여 GSSHA 모형의 매개변수를 추출하였고 2017년 강우와 기상, 유량, 수질 자료 등을 이용하여 매개변수의 보정을 수행하였다. 보정된 매개변수를 이용하여 2017년부터 2018년까지 2년 동안에 대한 강우유출과 수질을 모의하여 측정된 자료와 비교 평가하였다. 이를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 모의된 유량계열은 주요 호우에 대해 첨두유량 크기와 그 발생 시기 그리고 기저유출의 형태 등 전체적인 수문곡선의 형태가 측정치와 비교적 잘 일치하는 것으로 판단된다. 그러나 최대 유량이 측정치 보다 과대하게 모의되고 있으며 특히 2017년과 2018년에 발생한 여러 개의 작은 규모 호우에 대해 첨두유량을 측정치 보다 과대하게 모의하는 경향을 보이고 있다. 이는 매개변수 보정이 불완전하기 때문일 수도 있지만 일 유량이라는 자료 측정의 스케일(scale) 때문에 홍수의 첨두유량이 실제 보다 과소하게 평가되고 있을 가능성도 배제할 수 없어 추후 이에 대한 원인 규명과 개선을 위한 연구가 필요할 것으로 사료된다.
- 2) 평화의댐 지점에 대해 모의된 유량 시계열 자료가 통계적으로 적정한지를 평가하기 위하여 NSE와 PBIAS 지표를 검토한 결과 모의된 시기에 따라 경향성과 오차의 만족도에 차이가 있었으며 특히 2018년에는 경향성을 판단하는 NSE가 상당히 낮게 나타났는데 이는 여러 차례 발생한 소규모 호우의 첨두유량을 측정치 보다 과대하게 모의한 때문으로 판단된다.
- 3) 모의된 총질소와 총인의 평균값은 측정자료와 비교할 때 어느 정도 만족할만한 수준으로 판단되나 월 1회 측정된 자료로는 수질변화 양상을 검토하기 어렵기 때문에 모의치의 신뢰성을 판단하기에는 시기상조로 보이며 추후 연속 측정된 자료와의 비교를 통한 추가적인 검토가 필요할 것으로 사료된다.
- 4) 분포형 유역 모형 GSSHA를 평화의댐 유역에 적용하여 유량과 수질 모의치를 실측치와 비교한 결과 소규모 호우로부터의 첨두유량을 측정치 보다 과대하게 모의하거나 실측된 수질 자료와 일부 구간에서 다른 경향성을 보이는 등 일부 실측치와 불일치하는 사항들이 나타났으나 모의된 주요 호우의 첨두유량과 그 발생 시기 그리고 기저유출의 형태 등 전반적인 수문곡선은 비교적 양호한 것으로 나타나 실무에서의 적용 가능성이 있는 것으로 판단하였다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2017R1E1A1A01075118).

References

- Chang, C.H., Kim, H.J., Noh, S.J., and Kim, C.G. (2005). "The water cycle analysis of Kyeongancheon-watershed by using GSSHA." *proceedings of Korea Water Resources Association, KWRA*, pp. 75-79.
- Chang, C.H., Kim, H.J., Noh, S.J., and Kim, C.G. (2006). "Long-term runoff simulation of Kyeongan-cheon watershed by using GSSHA." *proceedings of Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, pp. 1064-1067.
- Chang, C.H., Kim, H.J., Kim, S.H., and Noh, S.J. (2007). "Simulation of soil moisture in hill-slope area using GSSHA model." *proceedings of Korea Water Resources Association, KWRA*, pp. 1614-1618.
- Chung, S.Y., Park, J.H., Hur, Y.T., and Jung, K.S. (2010). "Application of MPI technique for distributed rainfall-runoff model." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 43, No. 8, pp. 747-755.
- Downer, C.W., and Ogden, F.L. (2004). "GSSHA: Model to simulate diverse stream flow producing processes." *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE*, Vol. 9, No. 3, pp. 161-174.
- Downer, C.W., and Ogden, F.L. (2006). *Gridded surface subsurface hydrologic analysis (GSSHA) user's manual*, ERDC/CHL SR-06-1, U.S. Army Corps of Engineers.
- Hur, Y.T., Park, G.Y., Park, J.H., and Kim, H.S. (2018). "Improvement of the long-term discharge simulation linked with K-DRUM and MODFLOW." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, KOSHAM*, Vol. 18, No. 7, pp. 555-562.
- Jun, B.H., Shin, H.S., Lee, J.C., and Yoon, Y.N. (1993). "Influence of the Peace-dam construction on the flood discharge and flood stage of the Hwachun dam." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 26, No. 1, pp. 93-101.
- K-water Institute (2013). *A study of water quality improvement and algae occurrence mitigation at the downstream reach considering to the Innam dam of DMZ upstream and Soyangdam located in the north Hanriver*.
- Kim, B.K., Kim, B.S., and Kwon, H.H. (2009). "Impact assessment of agricultural reservoir on streamflow simulation using semi-distributed hydrologic model." *Journal of Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, Vol. 29, No. 1B, pp. 11-22.
- Kim, C.G., and Kim, N.W. (2004). "Assessment of forest vegetation effect on water balance in a watershed." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 37, No. 9, pp.

737-744.

- Kim, N.W., Lee, J.E., and Won, Y.S. (2005). "Application of SWAT model on Soyang dam basin." *proceedings of Korea Water Resources Association*, KWRA, pp. 628-632.
- Kim, W.J., Jung, C.G., Kim, J.U., and Kim, S.J. (2018). "Water shortage assessment by applying future climate change for boryeong dam using SWAT." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 51, No. 12, pp. 1195-1205.
- Moriasi, D.N., Gitau, M.W., Pai, N., and Daggupati, P. (2015). "Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria." *Transactions of the ASABE*, ASABE, Vol. 58, No. 6, pp. 1763-1785.
- Park, J.H., and Hur, Y.T. (2009). "Flood runoff simulation using physical based distributed model for Imjin-River basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 1, pp. 51-60.
- Park, J.T., Jang, Y.J., and Seo, D.I. (2017). "Water quality prediction of inflow of the Yongdam Dam basin and its reservoir using SWAT and CE-QUAL-W2 models in series to climate change scenarios." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 50, No. 10, pp. 703-714.
- Yoo, J.H., Park C.K., and Cho, H.S. (2001). "Identification of expanding the usability of the water resources in Hwacheon dam system due to the flood surcharging effects of Peace dam." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 34, No. 6, pp. 617-625.