

TANK 모형과 SWAT 모형을 이용한 한강유역의 자연유출량 산정 비교

Comparison of Natural Flow Estimates for the Han River Basin Using TANK and SWAT Models

김철겸* / 김남원**

Kim, Chul Gyum / Kim, Nam Won

Abstract

Two models, TANK and SWAT (Soil and Water Assessment Tool) were compared for simulating natural flows in the Paldang Dam upstream areas of the Han River basin in order to understand the limitations of TANK and to review the applicability and capability of SWAT. For comparison, simulation results from the previous research work were used. In the results for the calibrated watersheds (Chungju Dam and Soyonggang Dam), two models provided promising results for forecasting of daily flows with the Nash-Sutcliffe model efficiency of around 0.8. TANK simulated observations during some peak flood seasons better than SWAT, while it showed poor results during dry seasons, especially its simulations did not fall down under a certain value. It can be explained that TANK was calibrated for relatively larger flows than smaller ones. SWAT results showed a relatively good agreement with observed flows except some flood flows, and simulated inflows at the Paldang Dam considering discharges from upper dams coincided with observations with the model efficiency of around 0.9. This accounts for SWAT applicability with higher accuracy in predicting natural flows without dam operation or artificial water uses, and in assessing flow variations before and after dam development. Also, two model results were compared for other watersheds such as Pyeongchang-A, Dalcheon-B, Seomgang-B, Inbuk-A, Hangang-D, and Hongcheon-A to which calibrated TANK parameters were applied. The results were similar to the case of calibrated watersheds, that TANK simulated poor smaller flows except some flood flows and had same problem of keeping on over a certain value in dry seasons. This indicates that TANK application may have fatal uncertainties in estimating low flows used as an important index in water resources planning and management. Therefore, in order to reflect actually complex and complicated physical characteristics of Korean watersheds, and to manage efficiently water resources according to the land use and water use changes with urbanization or climate change in the future, it is necessary to utilize a physically based watershed model like SWAT rather than an existing conceptual lumped model like TANK.

Keywords : natural flow, TANK, SWAT, han river basin, watershed model

요 지

본 연구에서는 한강수계 팔당댐 상류의 자연유출량에 대해 기존의 연구 결과를 바탕으로 TANK 모형 결과와 SWAT 모형 결과를 비교함으로써, 기존 TANK 모형이 가지고 있는 한계 및 문제점을 현실적으로 제시하고, 향후 SWAT 모형의

* 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원환경연구본부 수자원연구실 수석연구원 (e-mail: cgkim@kict.re.kr)

Corresponding Author, Senior Researcher, Water Resources Research Division, Water Resources & Environmental Research Department, 283 Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea. Tel: 82-31-910-0545, Fax: 82-31-910-0250

** 한국건설기술연구원 수자원환경연구본부 수자원연구실 선임연구위원

Senior Research Fellow, Water Resources Research Division, Water Resources & Environmental Research Department, 283 Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

적용성 및 활용에 대해 검토하였다. TANK 모형의 매개변수 최적화가 이루어진 보정유역들(충주댐 및 소양강댐)의 모의결과를 볼 때 두 모형 모두 모형효율 0.8 이상의 높은 정도의 모의가 가능한 것으로 나타났으며, 침투유량이 발생하는 홍수기에는 TANK의 결과가 SWAT보다 관측치에 근접하는 것으로 나타났다. 그러나 TANK 모형의 경우 주로 평수기 이상의 유량을 대상으로 보정을 수행하여 갈수기에 관측유량과 많은 차이를 보였으며, 특히 일정 유량 이하로 모의되지 않는 한계를 나타내었다. 반면, SWAT 모형은 일부 홍수사상을 제외하고 대체로 관측치의 경향을 잘 따르고 있으며, 유역 최종 출구인 팔당댐(한강F)에서의 상류댐 방류량을 고려한 모의유입량이 실제 관측유입량과 잘 일치하는 것으로 나타나(모형효율 0.9 수준), 댐 방류량과 인위적인 용수 수요가 없는 상태의 자연유출량의 추정이나 댐 개발 전후에 따른 유량 변동 평가 등에 있어 매우 높은 신뢰성을 보장하는 것으로 판단되었다. 아울러, TANK 모형의 최적화된 매개변수를 전이시켜 이용하는 대상유역들(평창A, 달천B, 섬강B, 인북A, 한강D, 홍천A)에 대한 결과를 SWAT 모형 결과와 비교할 때, 일부 홍수기를 제외하고는 평수기 이하에서 매우 불안정한 모의 결과를 나타내었으며, 보정유역들에 대한 결과와 마찬가지로 갈수기에 일정 유량 이하로 모의되지 않는 문제가 나타났다. 이는 수자원 계획 및 관리의 중요한 지표인 갈수량의 산정에 있어 TANK 모형의 적용에 많은 불확실성이 있음을 보여준다. 따라서 복잡 다양한 국내 유역의 특성을 보다 현실적으로 반영하고, 향후 유역내 도시화 등에 따른 토지이용 및 용수이용의 변화, 기후변화 등에 따른 수자원 계획 및 관리에 효율적으로 대처하기 위해서는 TANK와 같은 기존의 개념적 집중형 모형보다는 SWAT과 같은 물리적 기반의 유역모형 적용이 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 자연유출량, TANK, SWAT, 한강유역, 유역모형

1. 서 론

하천의 자연유출량이란 인위적인 용수수요가 전무한 상태 즉, 댐에 의한 저류 및 방류, 용수의 유입 및 유출, 취수 및 회귀, 인위적인 토지이용 변경에 따른 물 소모 등에 의한 유량 조절이 전혀 없는 자연상태에서의 유역에서 나타나는 하천유출량을 의미한다. 장기간의 자연유출량 산정은 합리적이고 효율적인 물이용계획 및 공급계획의 수립을 위한 필수적인 요소이자 용수사용허가를 위한 기준으로 사용되고 있다. 그러나 대부분의 유역에서 자연상태로 존재하는 경우는 거의 없기 때문에 모델링 방법을 이용하여 현재의 인위적인 영향을 배제하고 과거의 자연상태를 가정하여 자연유출량을 추정하는 연구가 많이 수행되어 왔다.

국내 자연유출량 산정과 관련된 연구서는 낙동강 본류의 하천구간에 대해 상하류 관측유량과 구간내의 인위적인 용수사용량 및 회귀량 등을 고려하여 자연유출량을 산정한 적이 있고(이동률 등, 1996), 전국의 9개 수위관측소 유역 및 7개 댐 유역 관측자료를 기반으로 지역회귀기법을 이용한 갈수량을 산정하여 기존의 비유량법과 비교한 사례가 있으며(조탁근 등, 2006), 이외 대부분의 연구들은 모델링 방법을 이용하여 왔다. 모델링 방법 중에서는 신명망 모형을 이용하거나(신현석과 박재범, 2001), SSARR 모형(맹승진 등, 2005), RRFs(류경식 등, 2006)을 이용한 일부 연구가 있었으며, 대부분은 TANK 및 SWAT을 이용하여 왔

다(김남원 등, 2006b; 김상단 등, 2007; 장경수 등, 2008; 강성규 등, 2008; 김영규 등, 2008; 이수형 등, 2009; 김남원과 신아현, 2011). 특히, SWAT은 최근에 그 적용이 많이 이루어지고 있다.

현재, 우리나라의 수자원 관리 및 계획의 근간이 되는 「수자원장기종합계획(2006~2020) 보고서」(건설교통부·한국수자원공사, 2006)에 의하면, ‘토양수분 저류구조 TANK 모형’을 이용하여 4대 권역의 각 중권역별 기준지점을 선정하고, 각 소유역의 38년간 일 강수량 자료를 수집, 정리 및 분석하여 이수계획 수립을 위한 장기간의 자연유출량을 산정하고 있다.

TANK 모형은 1961년 일본의 Sugawara에 의해 개발된 개념적 집중형 모형으로(Sugawara, 1972), 일반적으로 분포형 모형에 비해 모형의 구조가 간단하고, 유출 해석에 필요한 입력자료 및 매개변수의 수가 적기 때문에, 관측자료가 충분하지 않거나 미계측유역과 같이 기상 및 토양, 토지이용 등 유역의 물리적 특성에 대한 자료 수집이 곤란한 경우 또는 컴퓨터 성능이 고사양이 아니더라도 충분히 실용적으로 적용할 수 있는 장점이 있다. 그러나 한편으로 TANK 모형은 유역을 3~4단의 탱크 구조로 가정하고 관련된 매개변수의 최적화를 통해 유출 현상을 개념적으로 접근하여 해석하는 모델링 기법이기 때문에, 유역의 특성이 크게 변하지 않는다는 가정하에 최적 매개변수가 추정된 해당 유역에서의 유출량은 비교적 정확하게 모의하고 시간적으로 확장할 수 있으나, 도시화에 따른 토

지이용·식생 및 토양 특성의 변화, 기후 변화 등과 같은 유역내 수문환경의 변화에 따른 유출 변화 해석이 곤란하다는 단점이 있으며, 매개변수가 추정되지 않은 타 유역에 대한 유출 해석의 신뢰성 또한 장담할 수 없는 문제가 있다. 아울러 집중형 모형의 특성상 국내유역과 같이 복잡한 토지이용·토양 및 기후 특성 등을 충분히 고려할 수 없는 문제도 있다.

반면, 최근 국내외적으로 널리 적용되고 있는 SWAT 모형은 물리적 매개변수 기반의 유역규모의 연속모의모형으로서 1990년대 미국 농무성에서 개발되었으며(Arnold et al., 1993), 기후, 수문, 토양온도, 식생성장, 영양물질, 농약성분, 토지관리 등에 대한 모의기법을 모두 포함하고 있어, 자연적인 현상뿐만 아니라 유역의 인위적인 영향까지 모두 고려한 모델링이 가능한 장점을 가지고 있다. 아울러 컴퓨터 성능의 발전과 GIS 및 RS 기법의 활용, 그리고 국가 차원에서의 토지이용, 토양, 기상요소 등의 자료에 대한 체계적인 관측과 DB화 등으로 분포형 모델링에서 필요한 공간분포형 입력자료 및 매개변수들에 대한 수집도 원활하기 때문에, 과거에 비해 분포형 모델링의 사용에 어려움이 없으며, 오히려 분포형 모델링을 통해 얻어지는 방대한 시공간적인 수문자료의 활용과 여러 유역 특성에 대한 능동적인 모델링, 그리고 유역내 수문환경의 변화에 대해서도 충분히 신뢰성 있는 자료를 확보할 수 있다는 장점 때문에 유출 해석뿐만 아니라 수질해석 분야 등에서도 많은 연구와 함께 점차 실무에 적용이 되고 있는 상황이다.

그러나 최근의 수자원장기종합계획(2006~2020년) 수립과 같은 국가사업이나 2004년부터 수행하고 있는 국가 오염총량관리사업과 관련된 연구(김상단 등, 2007; 김재철과 김상단, 2007) 등에서도 알 수 있듯이, 여전히 많은 정책수립과 실무에서는 과거부터 사용하여 오던 TANK 모형이 주를 이루고 있어, 향후 대상유역에서의 물리적 환경 변화 및 유역내 공간적으로 다양한 특성을 반영한 수문순환의 해석에 많은 한계를 가지고 있다.

본 연구에서는 과거부터 오랫동안 국내 수자원 해석 및 계획에 폭넓게 활용되어 오고 있는 TANK 모형과 최근 유역의 수문·수질의 시공간적인 해석 및 관리, 그리고 미래 유역환경변화에 따른 영향 평가 등에 많이 적용되고 있는 SWAT 모형에 대해, 유역의 자연유출량 해석을 중심으로 기존 TANK 모형이 가지고 있는 한계 및 문제점을 현실적으로 제시하고, SWAT 모형의 적용성 및 활용에 대해 논의하고자 한다.

2. TANK와 SWAT 모형의 특징 및 적용 사례

모형의 비교를 위해 우선 두 모형이 가지고 있는 구조적 특징 및 적용사례 등을 검토하였다.

2.1 TANK 모형과 SWAT 모형의 특징

TANK 모형은 유역을 일련의 3~4단 저류탱크 형태로 개념화시켜 강우-유출 과정을 모형화한 것으로, 일반적으로 상부탱크에서 강우와 증발산 및 지표유출을 모의하고, 하부탱크에서 지하수유출 과정을 모의하며, 상부와 하부 및 중간탱크 사이의 물 이동을 통해 침투 및 중간유출 과정을 개념적으로 모의하는 방법을 취하고 있다.

각 탱크는 2~3개의 유출공으로 구성되어 있으며, Sugawara (1972)는 일본의 유역에 4단 TANK 모형이 적합하고, 대유역의 경우에는 4~5개의 탱크가 적합하다고 제안하기도 하였다(박승우, 1993). 그러나 탱크의 수가 많아질수록 보정하기 어려운 단점이 있어, 김현영과 박승우(1988)는 우리나라 중소하천에 적합한 3개의 탱크와 4개의 유출공을 사용한 수정모형을 제안하기도 하였다.

TANK 모형을 통한 정확한 유출모의를 위해서는 각 매개변수들에 대한 적정값의 추정, 즉 최적화 과정이 필요한데, 김현영과 박승우(1988)는 유역면적 및 토지이용면적 등을 이용하여 수정3단 TANK 모형의 각 매개변수에 대한 지역화를 수행한 바 있으며, 허유만 등(1993)은 동일 모형에 대해 하천연장과 형상계수를 추가하여 지역화에 대한 추가분석을 수행한 바 있다(이상호 등, 2003). 지역최적화 및 전역최적화기법을 통해 추정된 매개변수와 유역특성인자들의 회귀식을 도출하여 지역화를 시도한 연구도 수행되었다(이상호와 강신욱, 2007).

한편 많은 매개변수의 효율적인 추정을 위해서 단순시행착오법의 이용(서영제, 1997)부터, Rosenbrock의 회전좌표법(rotating coordinate method) 중 제약조건알고리즘을 이용한 방법(박승우, 1993), Kalman filter의 상태공간모형에 의한 방법(이관수 등, 1995), Hill 알고리즘을 이용한 방법(이상호, 1988), Powell 알고리즘을 이용한 방법(배덕호 등, 2003; 정일원 등, 2007), SCE-UA(Shuffled Complex Evolution-University of Arizona) 전역최적화기법(이상호 등, 2003; 강신욱 등, 2004), 실수코딩유전알고리즘(Real-Coded Genetic Algorithm, RCGA)을 이용한 방법(박헛님과 조원철, 2006), 4가지 목적함수를 이용하는 다목적 유전자알고리즘을 이용한 방법(구보영 등, 2007; 김태순 등, 2007), 직접탐색알고리즘을 이용한 방법(김운중 등, 2002) 등에 이르기까지 많은 자동보정기법들

이 활용되어 왔다.

TANK 모형이 개념적 매개변수로 구성된 집중형 모형인데 반해, SWAT 모형은 DEM, 토지이용, 토양, 기상요소 등 물리적 기반의 공간분포형 입력자료 및 매개변수로 구성된 모형으로서, 유역내 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리상태에 따른 물과 유사 및 화학물질의 거동을 예측할 수 있는 특징이 있다(Neitsch et al., 2001).

또한, 분포형 모형의 특성상 대부분의 매개변수가 유역의 물리적 특성이나 관측치로부터 얻어지기 때문에 미계측 유역에 대해 보정이 없이도 적용할 수 있는 특징이 있다. 그러나, 현실적으로 유역에서 실측 또는 관련자료로부터 얻을 수 있는 매개변수의 값이 제한적이거나, 자료가 없는 경우 또는 일부 값은 단위유역별로 대푯값을 이용하는 경우도 있으며, 일부 수문현상은 개념적인 수식을 통해 모의되고 있기 때문에 보다 정교한 수문해석을 위해서 보정기법이 적용되고 있다.

SWAT 모형에 대한 보정기법으로는 시행착오법이나 SCE-UA 자동기법 등이 많이 활용되고 있으나, 대부분의 매개변수들이 물리적인 특성에 근거하고 있기 때문에 보정에 의한 유출 개선 효과는 개념적 모형에 비해 상대적으로 크지 않다. 따라서 유출해석의 정확성을 높이기 위해, 기존 SWAT 모형이 가지고 있는 한계 및 문제점을 해

결하고, 국내유역에서의 지표수-지하수 연계해석, 산림지역·농업지역·도시지역·하천에서의 물순환해석을 개선시킨 SWAT-K 모형이 개발되어 활용되고 있다(한국건설기술연구원, 2007).

Table 1은 TANK와 SWAT의 주요 수문성분 및 입력자료의 특성을 간단히 비교한 것으로, 앞서 기술한 바와 같이 강우량과 증발산량을 입력자료로 이용하여 일련의 탱크구조에 의해 개념적으로 강우-유출 해석을 수행하는 TANK 모형과 달리, SWAT 모형은 공간분포형 입력자료 및 물리적 기반의 매개변수를 이용하여 강우, 증발산, 침투, 유출 등을 해석하고 있다. 따라서 정확한 입력자료 및 매개변수만 구축된다면, 유역내 여러 지점들에 대한 시간적 공간적인 확장 해석이 가능하며, 매개변수 추정이 어려운 미계측유역에 대해서도 입력자료의 구축만으로도 유출 해석에 충분한 신뢰성을 확보할 수 있다는 장점이 있다.

2.2 TANK 모형과 SWAT 모형의 적용 사례

국내에서는 1980년대 후반 김현영과 박승우(1986, 1988)가 TANK 모형의 매개변수 추정 및 일유출량 산정을 수행하면서, 초기 4단 TANK를 3단으로 수정하는 한편, 1990년대 초반 수정모형에 대한 쉘프로그램을 구축하여 중소하천의 일유출량 추정에 활용한 바 있다(박승우, 1993;

Table 1. Hydrological Components and Input Data Characteristics of TANK and SWAT

	TANK	SWAT
Main input	Precipitation, evapotranspiration	DEM, land use (vegetation DB), soil type (soil DB), precipitation, temperature, wind speed, humidity, and radiation
Parameter	Conceptual	Semi-distributed (based on physical characteristics)
Potential evapotranspiration	Use calculated data outside of model	Calculated by several methods included in the model
Actual evapotranspiration	Estimated from potential ET by multiplying proper coefficient	Estimated from potential ET and available soil moisture content
Landuse	Not considered	Distributed landuse
Soil	Not considered	Distributed soil type
Infiltration	Estimated by conceptual equation	Estimated by considering infiltration characteristics of each soil layer in soil profile
Groundwater	Estimated by conceptual equation	Estimated by considering evapotranspiration, lateral flow, infiltration, percolation, and soil moisture content of each soil layer
Artificial water use	Can be considered by conceptually	Actual water use and movement can be considered

허유만 등, 1993). 이후에도 이관수 등(1995), 서영제(1997), 김운중 등(2002), 배덕호 등(2003), 성윤경 등(2004), 강신욱 등(2004), 정일원 등(2007), 구보영 등(2007), 김태순 등(2007), 이상호와 강신욱(2007) 등에 의해 지속적으로 매개변수 추정 및 최적화 등에 관한 연구가 진행되어 왔으며, 이동률과 김형섭(1999), 김병식 등(1999) 등에 의해 갈수관리에 활용된 바 있고, 이상호(1998)는 홍수모의에도 적용한 바 있다. 또한, 적설 및 융설 모의를 포함하여 대규모 댐상류 지역에서의 일유입량 모의에 적용하기도 하였다(이상호 등, 2003). 아울러 수정된 3단 탱크(김현영과 박승우, 1988)에서 최하단 탱크의 침투공을 없애고 최상단 탱크에 차단저류를 나타내는 탱크를 추가시킨 모형(임상준, 2000), 맥동 응답함수를 조합한 3단 탱크모형(한국수자원공사, 2001), 초기 4단의 탱크에 토양수분 저류 구조를 추가시킨 모형(강신욱 등, 2004; 건설교통부·한국수자원공사, 2006), PRMS 모형과의 결합을 통한 혼합유출모형(심석구 등, 2009) 등 일부 개선된 형태의 TANK 모형이 현재까지 사용되고 있는 상황이며, 우리나라 수자원장기종합계획(2006~2020년)의 자연유출량 산정을 위한 기본모형으로 TANK 모형이 사용되고 있어, 유출 해석뿐만 아니라 국내 수자원 계획 및 관리에 있어 광범위하게 적용되고 있다고 할 수 있다.

SWAT 모형의 국내 적용은 1990년 후반 이후 김지훈 등(1998)과 권명준 등(2003)이 북한천 유역 적용을 통한 유출 및 수질 모의, Kim et al. (2003)이 용담댐과 보청천 유역에 대한 유출 모의 적용성 평가, 김남원 등(2005, 2006c)과 정일문 등(2007)이 지하수 함양량 추정, 정은성 등(2006)이 안양천 유역의 수질 모의, 문종필과 김태철(2006)이 갑천 유역의 수질 모의, 김남원 등(2006a)이 충주댐 유역을 대상으로 융설 영향 평가, 김남원 등(2007a)이 충주댐 유역에서의 갈수량 거동 평가, 김남원 등(2007c)이 한강유역의 다목적댐 운영에 따른 유황 영향 분석, 김철겸 등(2007)이 충주댐 상류의 유사 거동 특성 분석, 김철겸과 김남원(2008)이 충주댐 유역의 오염부하량 특성 평가, 김남원 등(2008a)이 설마천 유역의 물수지 해석, 김남원 등(2008b)이 모형을 이용한 유출곡선지수(CN) 산정방안 제시, 박윤식 등(2008)이 토양유실량 산정, 이정은 등(2008)이 지하수 개발가능량 평가, 허성구 등(2008a)이 토지피복도에 따른 예측 오류 평가, 허성구 등(2008b)이 SWAT ArcView GIS Extension Patch의 적용 효과 분석, 김철겸과 김남원(2009a, 2009b)이 충주댐 유역에서의 연속오염부하곡선 유도 및 유달 특성 평가 등 국내 여러 유역에 대한 적용성 검토와 함께 유출 및 수질 해석에 관한 연구가 활발히 수행되어 왔다.

한편으로는 기존 SWAT을 기반으로, 도시지역의 관망 및 도로 건물 등 불포화특성을 고려할 수 있는 SWAT-SWMM 결합모형의 개발(김남원과 원유승, 2004a, 2004b), 국내산림식생을 고려한 증발산 알고리즘의 개선(김철겸과 김남원, 2004), 지표수와 지하수의 완전연동해석을 위한 SWAT-MODFLOW 결합모형 개발(김남원 등, 2004a, 2004b; Kim et al., 2008), 하도추적 방법의 개선(김남원 등, 2007b; Kim and Lee, 2010), SWAT 지형인자 추출과정의 오류 개선(김종건 등, 2008), 시간가중평균법을 이용한 CN 산정방법의 개선(Kim and Lee, 2008) 등 기존 모형이 가지고 있는 오류 및 한계점을 극복하고 외국과는 다른 국내 유역의 수문학적 특성을 잘 반영할 수 있는 SWAT-K 개발에 관한 연구가 한국건설기술연구원을 중심으로 수행되어 왔다.

3. 자연유출량 산정

본 연구에서 자연유출량 산정을 위한 대상유역은 한강수계의 팔당댐 상류이며, TANK 모형의 결과는 수자원장기종합계획(2006~2020) 수립시 국토해양부 수자원단위지도의 중권역별로 구분하여 산정된 자연유출량(상류 지역을 포함하지 않은 해당 중권역에서 발생하는 유출량)이고, SWAT 모형의 결과는 한강수계관리위원회에서 수행한 하천유지가능유하량 산정 과업(한강수계관리위원회·국립환경과학원 한강물환경연구소, 2007)에서 계산한 것으로 수질오염총량관리 단위유역 말단에서의 자연유출량 및 모의유량(해당 단위유역과 상류 지역의 유출량이 합산된 유출량) 결과이다.

3.1 TANK 모형을 이용한 자연유출량 산정

2006년 발간된 수자원장기종합계획(2006~2020) 보고서에 의하면, '토양수분 저류구조 탱크모형'을 이용하여 4대 권역의 각 중권역별 기준지점을 선정하고, 각 소유역의 38년간 일 강수량 자료를 수집, 정리 및 분석하여 이수 계획 수립을 위한 장기간의 자연유출량을 산정하고 있다. 모형의 보정과 검증을 위해서 현재 운영중인 댐 지점들과 일부 본류 하천 지점들의 유출량 자료를 수집하여 비교 분석하여, SCE-UA 알고리즘에 의해 매개변수 최적화를 수행하고, 해당기간의 면적평균 강수량과 유역증발량을 이용하여 대상유역에 대한 매개변수를 추정하고 있다.

입력자료로서 증발산량은 대상유역별 강수량과 유출량의 관계로부터 잠재증발산량과 실제증발산량 사이의 계수를 추정하여 적용함으로써, 유역증발산량을 산정하고

있다. 소유역별 면적평균 강수량은 세분된 소유역별 강우 관측소의 일 강수량 자료를 기반으로 티센법을 사용하여 산정하고, 장기간의 소유역별 자연유출량은 추정된 매개변수와 면적평균 강수량, 증발산량을 이용하여 산정하고 있다.

한강수계의 경우 6개 대상유역들에 대해 매개변수를 추정한 후, 4개 대상유역에 대해 이를 검증하고, 이를 기준으로 나머지 유역들의 매개변수는 6개 대상유역들의 강수량과 수문지질도 등을 이용하여 전이가능한 중권역을 선정하여 적용하고 있다. Table 2는 TANK 모형 매개변수 추정을 위해 선정한 6개 대상유역들과 보정기간, 그리고 각 대상유역별로 보정된 매개변수 값을 확장 적용시킨 중권역들이다.

3.2 SWAT 모형을 이용한 자연유출량 산정

2007년 수행한 하천유지가능유하량 산정 과업에서는 SWAT 모형의 하도추적 부분을 국내 유역 특성에 맞도록 개선시킨 SWAT-K 모형(김남원 등, 2007b)을 이용하여 자연유출량을 산정하고 있다. 한강수계 팔당댐 상류를 대상으로 수치고도모형(Digital Elevation Model; DEM), 토지이용도, 토지피복도, 토양도, 기상자료 등 유역의 공

간적인 물리적 특성을 적용하여 소양강댐 상류, 충주댐 상류, 팔당댐 상류 등 크게 3개 유역으로 구분하여 유출량에 대한 매개변수 추정을 실시하였다. 팔당댐 상류에 대해서는 화천댐, 소양강댐, 충주댐에 대해 실측방류량을 적용하고, 춘천댐, 의암댐, 청평댐에 대해 목표방류량 개념에 의해 저수지 모의를 수행하여 댐 운영이 고려된 상태에서의 팔당댐 유입량을 추정하고 관측유입량과 비교하여 모형의 적용성을 검토하였다. 각 유역별 보정결과를 기반으로 인위적인 저류시설물인 댐이 없는 자연상태에서의 하천유출량을 자연유출량이라 가정하여 1986~2005년에 대해 수질오염총량관리 단위유역별로 일단위의 자연유출량을 산정하였다.

4. 모형 결과 비교 및 고찰

4.1 비교 방법

비교를 위해 먼저 두 모형의 보정유역인 소양강댐과 충주댐을 중심으로 관측치와의 적합성을 검토하였으며, 아래의 Table 3과 같이 두 모형의 유역 경계도를 기준으로 동일한 출구점을 갖는 공통 소유역을 찾아 TANK와 SWAT 모형의 결과를 비교하였다. 이 때 TANK 모형의

Table 2. Calibrated Watersheds for TANK Model

Calibrated watershed outlet	Drainage area (km ²)	Data period	Calibration period	Subbasins using calibrated parameter values
Soyanggang Dam	2,703	1974~2003	1991~1998	1011, 1012, 1013, 1015, 1018, 1019, 1301
Chungju Dam	6,648	1986~2003	1995~2002	1001, 1002, 1003, 1005, 1007, 1016, 1017, 1302, 1303
Hoengseong Dam	209	2000~2003	2001~2003	1006
Goesan Dam	671	1988~2003	1995~2002	1004, 1101, 1201, 1202
Hwacheon Dam	3,901	1967~2003	1993~2000	1008, 1009, 1010, 1020, 1021, 1022, 1023, 1024
Hongcheon	874	1982~2001	1983~1989	1014

Table 3. Common Watersheds for Comparison of TANK and SWAT Results

TMDL unit watershed	Subbasins of Water Resources Unit Map	Drainage area (km ²)
Pyeongchang-A	1002	1,773
Dalcheon-B	1004	1,614
Seomgang-B	1006	1,491
Inbuk-A	1011	931
Hangang-D	1001~1005	8,844
Hangang-F	1001~1017	23,757
Hongcheon-A	1014	1,566

결과는 상류 유역을 고려하지 않은 해당권역에 대한 자연 유출량이므로, SWAT 모형의 결과 및 관측유량과의 비교를 위해 상류 유역의 자연유출량을 모두 합산하여 비교하였다.

4.2 보정 유역에 대한 비교

수자원장기종합계획 보고서(건설교통부·한국수자원공사, 2006) 및 하천유지가능유하량 산정 과업 보고서(한강수계관리위원회·국립환경과학원 한강물환경연구소, 2007)에서는 충주댐과 소양강댐 상류는 모두 인위적인 용수 수요량이 많지 않기 때문에 거의 자연유출량에 가깝다고 판단하여 관측 및 모의되는 유입량을 자연유출량으로 가정하고 있다.

4.2.1 충주댐

Fig. 1은 충주댐 유역에 대해 TANK 모형의 보정기간(1995~2002년) 중 2000~2002년 동안의 월별 유입량을 SWAT 모형의 모의값 및 관측유입량과 비교한 것으로, 주로 갈수기에는 SWAT 모형의 결과가 관측치와 잘 일치하며, 첨두유량이 발생하는 홍수기에는 TANK 모형의 결과가 보다 더 관측치에 근접하는 것으로 나타났다. 이는 각 모형의 보정에 있어서 갈수기와 홍수기 중 어디에 초점을 맞추었는지의 차이로 판단된다.

Fig. 2는 전 모의기간(1986~2005년)을 대상으로 유휴곡선을 도출하여 비교한 것이다. 초과확률 80% 구간까지 TANK 모형의 결과가 관측치와 잘 일치하고 있으나, 이

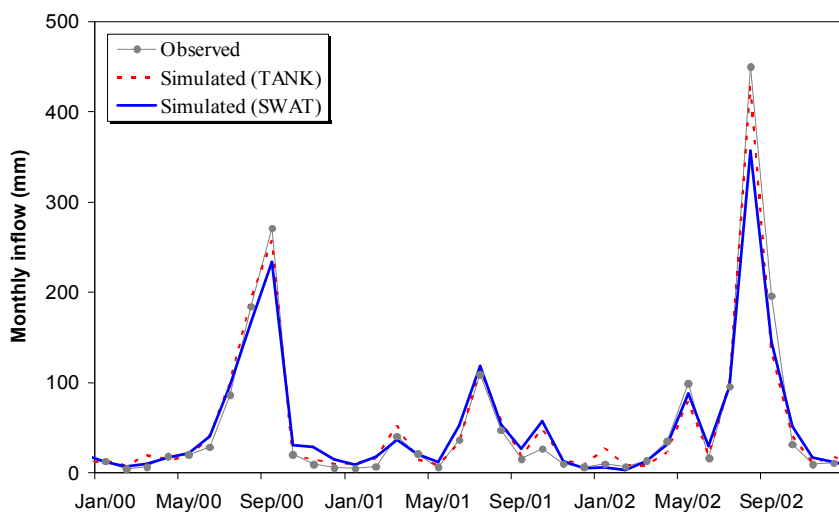


Fig. 1. Monthly Inflows at the Chungju Dam (2000~2002)

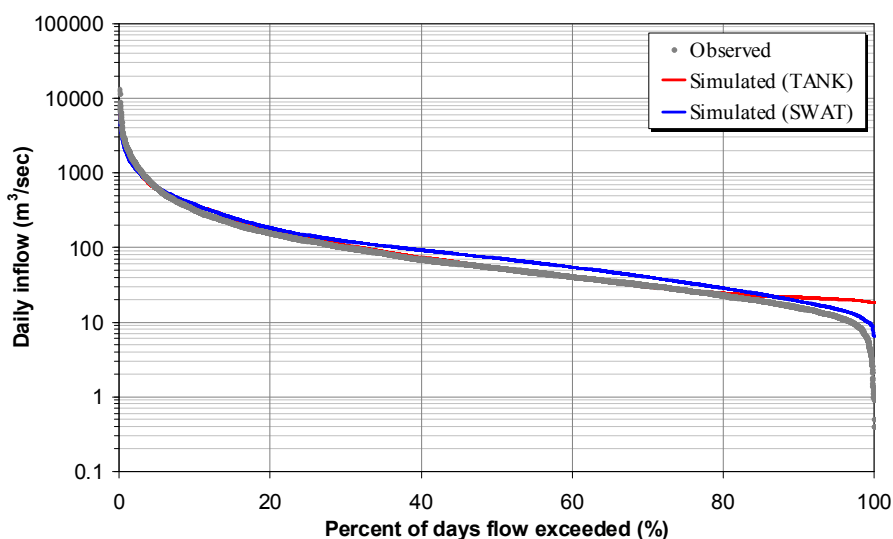


Fig. 2. Observed and Simulated Flow Duration Curves for the Chungju Dam Inflows

후 구간에서는 관측치의 경향과 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 특히, 최저유량이 18 m³/s 이하로 모의되지 않는 경향을 보임에 따라 갈수기에는 모의 정확성에 문제가 있음을 알 수 있다.

좀 더 객관적인 비교를 위해 Table 4와 같이 일별 자료를 이용하여 통계치 분석을 수행하였다. 전반적인 결과는 TANK 모형이 약간 좋은 것으로 나타났으나, 그 차이가 미미하며, 특히 앞서 살펴본 바와 같이 갈수기 모의에 있어 TANK 모형이 가지는 한계로 인해 SWAT 보다 모의 능력이 우수하다고 판단하기 어려운 상황이다.

4.2.2 소양강댐

충주댐 유역에 대한 결과와 마찬가지로 Fig. 3은 소양강댐 유역에 대해 TANK 모형의 보정기간(1991~1998년) 중 1996~1998년에 대한 월별 모의유량을 SWAT 모

형의 유입량 및 관측유입량과 비교한 것이다. 시기별로 차이가 있으나, 일부 홍수기를 제외하고는 전반적으로 SWAT 모형에 의한 결과가 크게 나타나고 있으며, 관측치와의 차이는 두 모형 모두 홍수기를 제외하고는 크지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 4는 전 모의기간(1986~2005년)을 대상으로 한 유허곡선이다.

전반적으로 SWAT 모형의 결과가 관측치의 유허곡선과 비슷한 형태를 취하고 있으며, TANK 모형 결과는 충주댐 유역의 결과와 마찬가지로 갈수기에 최저유량이 약 11.9m³/s 이하로 모의되지 않는 경향을 보여, 갈수기 모의 정확성에 문제가 있음을 알 수 있었다.

Table 5는 좀 더 객관적인 비교를 위해 통계치를 산정해 비교한 결과이다.

충주댐 결과와 마찬가지로 두 모형간의 두드러진 차이

Table 4. Statistics of TANK and SWAT Results for the Chungju Dam Inflows

Period	Average annual inflow (mm)			RB (%)		MAE (m ³ /s)		RMSE (m ³ /s)		NSE	
	Obs.	TANK	SWAT	TANK	SWAT	TANK	SWAT	TANK	SWAT	TANK	SWAT
Calibration (1995~2002)	741	745	733	0.5	1.1	52.7	58.0	193.9	223.0	0.86	0.82
Others (1986~1994, 2003~2005)	851	834	855	2.0	0.5	60.7	69.6	238.0	254.7	0.79	0.76
Total (1986~2005)	807	799	806	1.1	0.1	57.5	64.9	221.4	242.5	0.82	0.78

RB, relative bias; MAE, mean absolute error; RMSE, root mean square error; NSE, Nash and Sutcliffe (1970) model efficiency

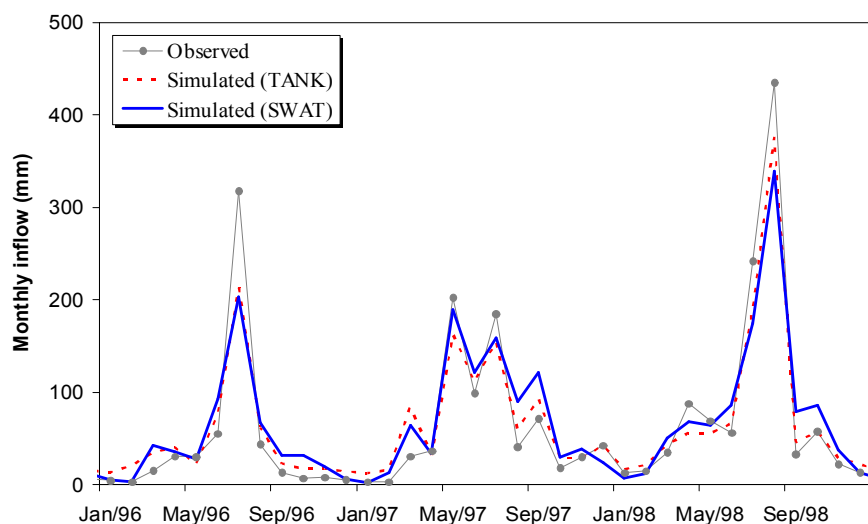


Fig. 3. Monthly Inflows at the Soygang Dam (1996~1998)

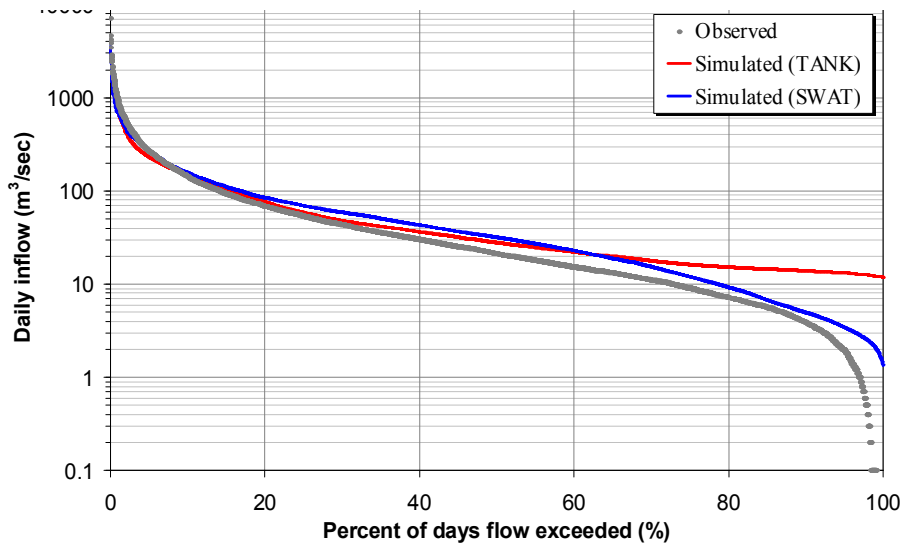


Fig. 4. Observed and Simulated Flow Duration Curves for the Soygangang Dam Inflows

Table 5. Statistics of TANK and SWAT Results for the Soygangang Dam Inflows

Period	Average annual inflow (mm)			RB (%)		MAE (m³/s)		RMSE (m³/s)		NSE	
	Obs.	TANK	SWAT	TANK	SWAT	TANK	SWAT	TANK	SWAT	TANK	SWAT
Calibration (1991~1998)	772	744	775	3.6	0.5	27.6	28.9	84.5	80.0	0.81	0.83
Others (1986~1990, 1999~2005)	888	851	886	4.2	0.2	30.9	35.1	112.3	112.6	0.79	0.79
Total (1986~2005)	842	808	842	4.0	0.0	29.6	32.6	102.1	100.8	0.79	0.80

RB, relative bias; MAE, mean absolute error; RMSE, root mean square error; NSE, Nash and Sutcliffe (1970) model efficiency

는 나타나지 않았지만, 전반적으로 SWAT 모형의 결과가 약간 좋은 것으로 나타났고, 앞서 살펴본 바와 같이 갈수기 TANK 모형의 모의 한계로 인해, 상대적으로 SWAT 모형의 모의결과가 비교적 관측치와 잘 일치한다고 볼 수 있다.

4.3 기타 유역에 대한 비교

수자원장기종합계획(2006~2020)에서는 보정유역에 대해 TANK 모형의 각 매개변수를 최적화시킨 후, 각각의 중권역으로 매개변수를 확장 전이시켜 유출을 모의하고 있다. 따라서 전이된 유역을 중심으로 TANK 모형 및 SWAT 모형의 자연유출량 모의결과를 비교하였다. 비교 유역은 Table 3에 제시된 것과 같이, TANK와 SWAT의 공통 최종 출구인 한강F(중권역1001~1017), 평창A(중권역1002), 달천B(중권역1004), 섬강B(중권역1006), 인북A

(중권역1011), 한강D(중권역1001~1005), 홍천A(중권역1014)이다.

4.3.1 한강F(중권역1001~1017)

한강F는 팔당댐을 출구로 하는 상류 유역 전체에서 발생된 유량이 유입되는 지점으로서, Fig. 5는 2000~2005년의 기간에 대해 팔당댐으로 유입되는 관측유량과 상류 댐 영향을 고려한 SWAT 모형의 모의유량, 그리고 TANK 모형으로부터 산정되는 자연유출량을 비교한 것이다. 댐 영향으로 인하여 관측유량과 SWAT 모형의 모의유량이 매우 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 이와 비교해 TANK에 의한 자연유출량은 갈수기에는 작게, 그리고 홍수기에는 크게 산정되는 결과를 보였다.

Table 6은 관측유량과 SWAT 모의유량간의 통계치를

산정한 것으로서, 대부분 매우 높은 상관성 및 모의 효율을 나타내어, SWAT 모형에 의한 모의 신뢰성이 매우 높다는 것을 알 수 있다. 따라서 SWAT 모형을 이용하여 댐 운영 및 인위적인 용수수요를 배제한 상태의 유량, 즉 자연유출량에 대한 산정 결과 또한 매우 높은 정확성을 보장한다고 판단할 수 있다.

Fig. 6은 SWAT 모형과 TANK 모형의 일별 자연유출량을

을 비교한 것이며, Fig. 7은 1987~2005년의 자료를 이용하여 도출한 유허곡선이다. Figs. 6 and Fig. 7에서 알 수 있듯이 홍수기와 갈수기 모두 TANK 모형의 값이 다소 크게 나타났으며, 특히 갈수기에는 TANK의 최저유량이 약 63 m³/s 이하로는 모의되지 않는 현상을 나타내고 있어, 앞의 충주댐 및 소양강댐에 대한 분석결과와 마찬가지로 TANK 모형의 갈수기 모의에 문제가 있음을 파악할 수 있다.

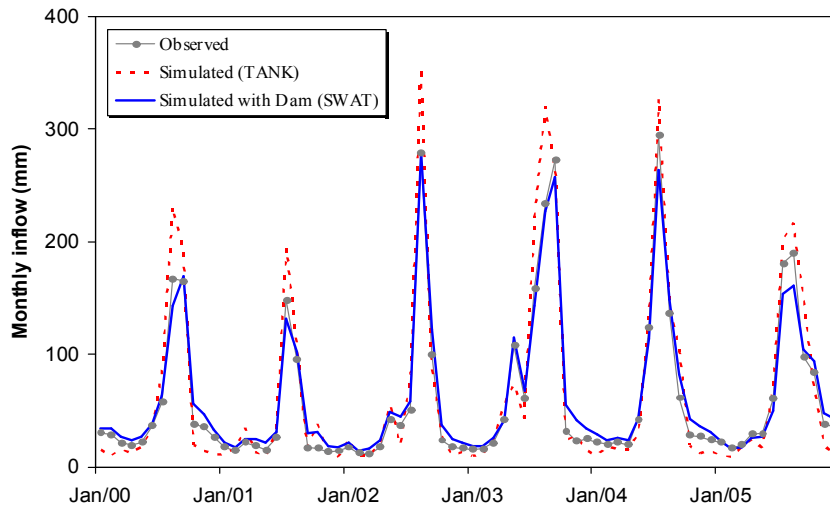


Fig. 5. Monthly inflows at the Paldang Dam (Hangang-F)

Table 6. Statistics of SWAT Result for the Paldang Dam Inflows

Period (year)	Average annual inflow (mm)		RB (%)	MAE (m ³ /s)	RMSE (m ³ /s)	NSE
	Obs.	SWAT				
1987~2005	777	774	0.3	137	377.6	0.89

RB, relative bias; MAE, mean absolute error; RMSE, root mean square error; NSE, Nash and Sutcliffe (1970) model efficiency

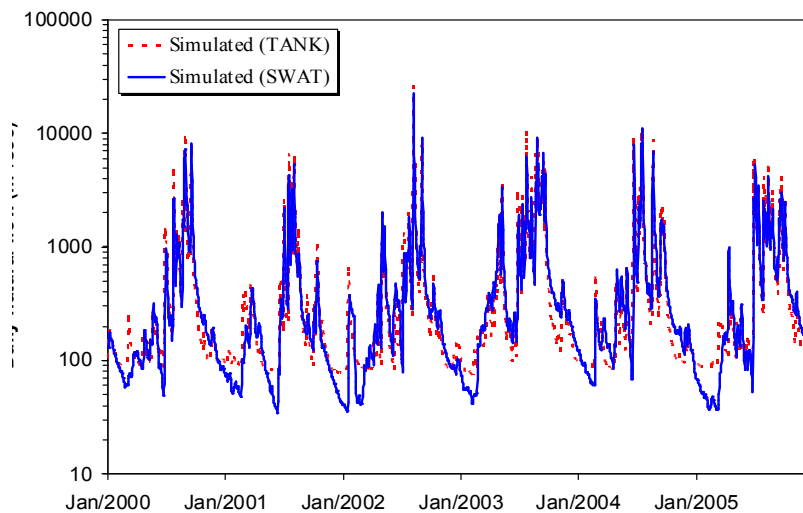


Fig. 6. Natural inflows at the Paldang Dam (Hangang-F)

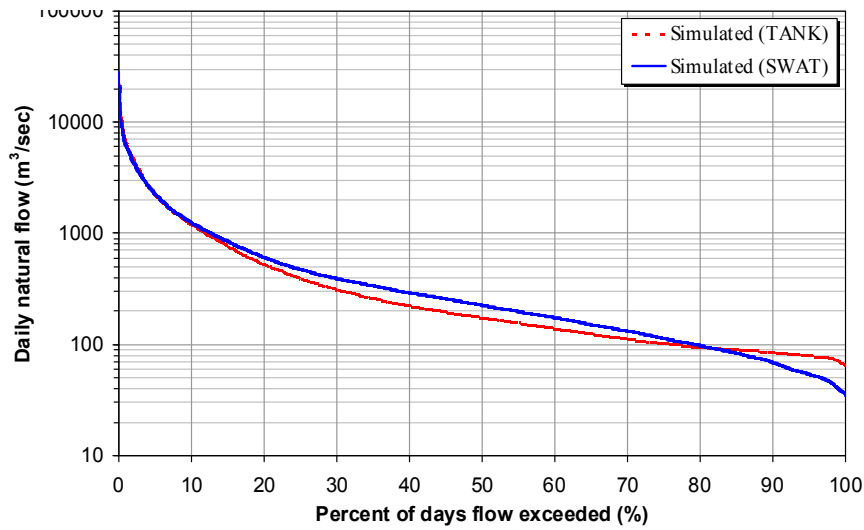


Fig. 7. Flow Duration Curves from TANK and SWAT Simulations for the Paldang Dam Natural Inflows

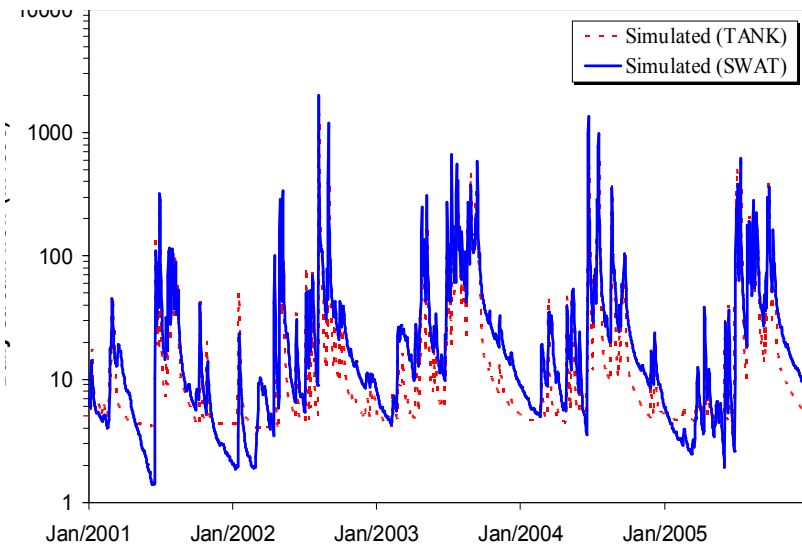


Fig. 8. Simulated Natural Flows at the Dalcheon-B

4.3.2 달천B(중권역1004)

Fig. 8은 달천B(중권역1004)에 대해 2001~2005년의 TANK와 SWAT 모형의 모의결과를 비교한 것이고, Fig. 9는 모의자료(1987~2005년)를 이용하여 도출한 각 모형의 유황곡선을 나타낸 것이다. 홍수기 유량에 대해서는 두 모형의 결과가 잘 일치하고 있으나, 갈수기 부분에서는 TANK 모형의 최저유량이 약 $3.5\text{m}^3/\text{s}$ 아래로는 모의되지 않는 현상을 나타내고 있다.

4.3.3 섬강B(중권역1006)

Fig. 10은 섬강B(중권역1006)에 대해 2001~2005년의

TANK와 SWAT 모형의 결과를 비교한 것이고, Fig. 11은 모의자료(1987~2005년)를 이용하여 도출한 각 모형의 유황곡선을 나타낸 것이다.

대체로 SWAT과 TANK 모형의 결과치가 많은 차이를 보이고, 전반적으로 홍수기 및 갈수기 모두 TANK 모형의 결과치가 크게 나타났으며, 특히 갈수기에는 다른 지점에서와 마찬가지로 TANK 모형의 최저유량이 $5\text{m}^3/\text{s}$ 아래로는 모의되지 않는 현상을 나타내었다.

이밖에 TANK 모형의 매개변수 전이를 통해 적용되고 있는 평창A(중권역1002), 인북A(중권역1011), 한강D(중권역1001~1005), 홍천A(중권역1014) 지점에 대한 비교에서도 갈수기에 TANK 모형의 모의유출량이 일정값(평

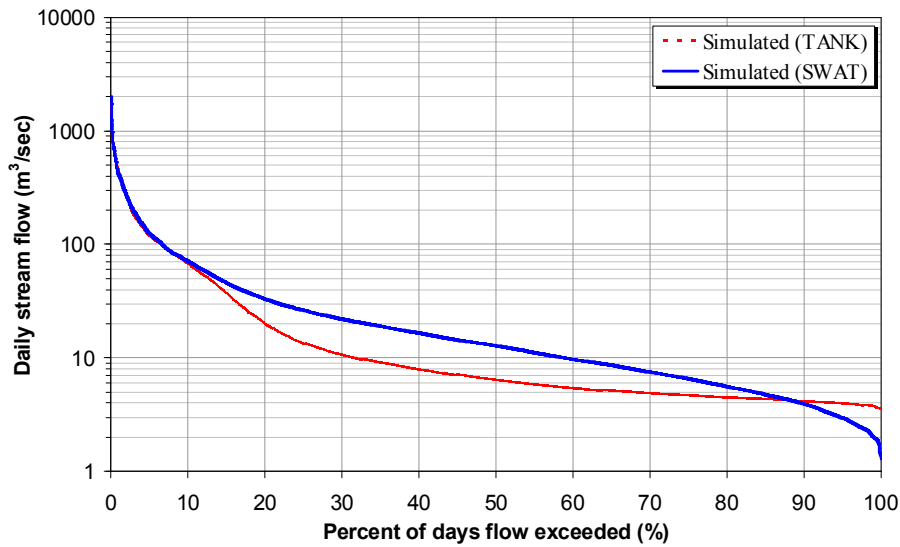


Fig. 9. Flow Duration Curves for the Dalcheon-B Natural Flows

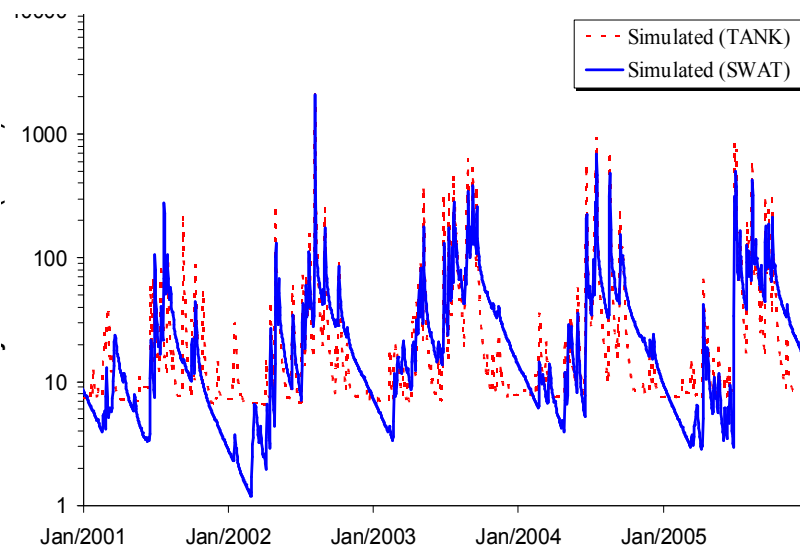


Fig. 10. Simulated Natural Flows at the Seomgang-B

창A는 $4 \text{ m}^3/\text{s}$, 인북A는 $3.2 \text{ m}^3/\text{s}$, 한강D는 $24 \text{ m}^3/\text{s}$, 홍천 A는 $3.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 이하로 모의되지 않는 현상이 나타났다. 이러한 현상은 타 연구에서도 나타난 바 있다. 이수형 등 (2009)이 발표한 낙동강수계 내성천의 지류인 서천유역에 대한 SWAT과 TANK 모형의 비교에서 갈수시 및 무강우시에 TANK 모형의 결과가 특정값 이하로 모의되지 않는 것으로 나타났으며, 장경수 등(2008)이 SWAT과 TANK 모형에 MODSIM을 결합시켜 합천댐 상류의 유출량을 비교한 연구에서도 갈수기에 TANK 모형의 최저 유량이 상대적으로 크게 유지되는 것으로 나타났다.

5. 결론

앞서 살펴본 바와 같이, TANK 모형은 개념적 집중형 모형이며, 이에 반해 SWAT 모형은 공간분포형 물리적 입력자료 및 매개변수를 기반으로 하는 준분포형 모형이라고 볼 수 있다. 따라서 TANK 모형은 반드시 대상유역에 대한 매개변수 최적화 작업이 선행되어야 대상유역에 대한 모의 정확성을 보장받을 수 있으며, 설령 최적화 및 지역화가 이루어졌다 하더라도 도시화 및 용수 이용의 변화, 토지이용의 변화, 기후변화 등과 같은 물리적 특성의 변화로 인해 유량이 변동되는 영향을 평가하기 곤란한 한

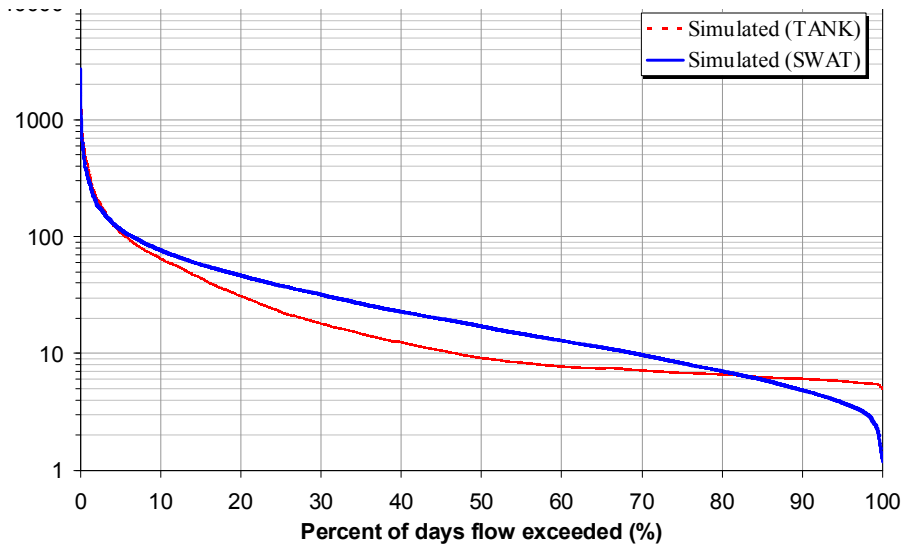


Fig. 11. Flow Duration Curves for the Seomgang-B Natural Flows

계가 있다. 반면, SWAT 모형은 대부분의 입력자료 및 매개변수가 유역의 물리적 특성을 기반으로 구축되기 때문에 정확한 입력자료 및 매개변수가 구축된다는 가정하에 특별히 매개변수 최적화 과정을 거치지 않더라도 충분히 신뢰성 높은 모의유량을 산정할 수 있으며, 유역내 공간적인 다양한 특성 및 향후 유역 환경의 변화에 따른 수문학적 영향 평가에도 능동적으로 대처할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

본 연구결과에서도 알 수 있듯이, TANK 모형의 매개변수 최적화가 이루어진 충주댐 및 소양댐의 결과를 볼 때 일부 갈수기를 제외하고는 상당히 높은 정도의 모의가 가능한 것으로 나타났다. 그러나 주로 평수기 이상의 유량을 대상으로 보정을 수행하여 갈수기에 관측유량과 많은 차이를 보이고 있으며, 특히 일정 유량 이하로 모의되지 않는 한계를 나타내었다. 최적화된 매개변수를 전이시켜 이용하는 대상유역들(평창A, 달천B, 섬강B, 인북A, 한강D, 한강F, 홍천A)에 대한 결과는 보정유역(충주댐 및 소양강댐)에 비해 정확도가 떨어지는 것으로 나타났는데, 일부 홍수기를 제외하고는 평수기 이하에서 매우 불안정한 모의 결과를 나타내었으며, 특히 갈수기에는 모든 유역들에서 일정 유량 이하로 모의되지 않는 문제가 나타났다. 따라서 TANK 모형의 모의 정확성을 높이기 위해서는 해당 유역에 대한 매개변수 최적화 과정이 필요하며, 전이된 유역에 대한 결과값의 활용에 대해서는 심사숙고해야 할 것으로 판단된다. 반면 SWAT 모형은 충주댐, 소양강댐에 대한 모의에서 매우 안정적인 결과를 보였으며, 특히 유역 최종 출구인 한강F(팔당댐)에서는 상류측 충주

댐과 소양강댐을 고려한 모의유량이 실제 관측유입량과 잘 일치하는 결과를 보여 인위적인 용수 수요가 없는 상태의 유량, 즉 자연유출량의 추정 및 댐 개발 전후에 따른 유량 변동 영향 평가 등에 있어 매우 높은 신뢰성을 보장한다고 볼 수 있다.

따라서 기존의 TANK와 같은 개념적 집중형 모형이 갖고 있는 문제와 한계를 벗어나, 공간분포형 물리적 기반의 SWAT 모형을 통해, 복잡다양한 국내 유역의 특성을 보다 현실적으로 반영할 수 있고, 향후 유역내 도시화 등에 따른 토지이용 및 용수 이용의 변화, 기후변화 등에 따른 수자원 계획 및 관리에 효율적으로 대처할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

21세기 프론티어 연구사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 3단계 연구사업(과제번호 2-2-3)과 건설교통기술평가원의 지역기술혁신사업 “제주형 물순환 해석 및 수자원 관리 기반구축 연구” 사업의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 강성규, 이동률, 문장원, 최시중(2008). “금강유역의 유황 특성 변동 분석.” **한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 429-434.
- 강신욱, 이동률, 이상호(2004). “토양수분 저류구조를 가진

- 탱크모형의 보정에 관한 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제2호, pp. 133-144.
- 건설교통부·한국수자원공사(2006). 수자원장기종합계획 (2006~2020) 보고서.
- 구보영, 김태순, 정일원, 배덕호(2007). “다목적 유전자알고리즘을 이용한 Tank 모형 매개변수 최적화(II): 선호적 순서화의 적용.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제9호, pp. 687-696.
- 권명준, 권순국, 홍성구(2003). “농촌유역 하천의 수질예측을 위한 SWAT모형과 WASP모형의 연계운영.” **한국농공학회지**, 한국농공학회, 제45권, 제2호, pp. 116-125.
- 김남원, 신아현(2011). “영산강 유역의 댐 운영에 따른 유역 유출 변화 분석.” **한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, p. 400.
- 김남원, 원유승(2004a). “SWAT-SWMM 결합모형의 개발 (I) 모형의 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제7호, pp. 589-598.
- 김남원, 원유승(2004b). “SWAT-SWMM 결합모형의 개발 (II) 모형의 특징 및 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제7호, pp. 599-612.
- 김남원, 이병주, 이정은(2006a). “SWAT을 활용한 충주댐 유역의 용설 영향 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제10호, pp. 833-844.
- 김남원, 이병주, 이정은(2007a). “공간모의유량을 이용한 갈수량 거동 특성에 관한 연구.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제4B호, pp. 431-440.
- 김남원, 이정우, 이병주, 이정은(2007b). “비선형 저류방정식을 이용한 일 단위 하도추적법.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제5B호, pp. 533-542.
- 김남원, 이정은, 원유승(2006b). “한강유역의 자연유량 산정.” **한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 799-803.
- 김남원, 이정은, 이병주(2007c). “한강유역의 다목적댐 운영에 따른 유황변동 특성 분석 및 평가.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제1B호, pp. 53-63.
- 김남원, 이지은, 정일문, 김동필(2008a). “SWAT-K 모형을 이용한 설마천 유역의 수문성분 해석.” **한국환경과학회지**, 한국환경과학회, 제17권, 제2호, pp. 1363-1372.
- 김남원, 이진원, 이정우, 이정은(2008b). “SWAT 모형을 이용한 충주댐 유역의 유출곡선지수 산정 방안.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제12호, pp. 1231-1244.
- 김남원, 정일문, 원유승(2004a). “완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형(I) 모형의 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제6호, pp. 499-506.
- 김남원, 정일문, 원유승(2004b). “완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형(II) 모형의 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제6호, pp. 499-506.
- 김남원, 정일문, 원유승(2005). “시공간적 변동성을 고려한 지하수 함양량의 추정 방안.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제7호, pp. 517-526.
- 김남원, 정일문, 원유승, 이정우, 이병주(2006c). “시공간적 변동성을 고려한 무심천 유역의 지하수 함양량 추정.” **한국지하수토양환경학회지**, 한국지하수토양환경학회, 제11권, 제5호, pp. 9-19.
- 김병식, 강경석, 서병하(1999). “일 강우량의 모의 발생을 통한 갈수량 계열의 산정 및 빈도분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제32권, 제3호, pp. 265-279.
- 김상단, 김재철, 강두기, 신현석(2007). “TANK 모형을 이용한 오염총량관리 목적 낙동강 유황 분석.” **한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 1048-1052.
- 김영규, 최계운, 함명수, 김남원(2008). “한강 팔당하류의 갈수시 댐 용수공급 가능유하량 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제11호, pp. 1143-1152.
- 김윤중, 김민환, 전일권(2002). “감수곡선을 이용한 탱크 모형과 매개변수 자동보정에 의한 유출 해석.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제22권, 제6-B호, pp. 777-784.
- 김재철, 김상단(2007). “오염총량관리 유황측정자료를 이용한 낙동강 유역 유황분석.” **수질보전 한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제23권, 제3호, pp. 332-338.
- 김종진, 박윤식, 김남원, 정일문, 장원석, 박준호, 문종필, 임경재(2008). “저해상도 DEM 사용으로 인한 SWAT 지형 인자 추출 오류 개선 모듈 개발 및 평가.” **수질보전 한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제24권, 제4호, pp. 488-498.
- 김지훈, 홍성구, 권순국(1998). “지리정보시스템을 이용한 SWAT 모형의 적용.” **한국농공학회지**, 한국농공학회, 제40권, 제4호, pp. 67-76.
- 김철겸, 김남원(2004). “산림 식생에 따른 유역 물수지 영향 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제9호, pp. 737-744.
- 김철겸, 김남원(2008). “충주댐 유역의 오염원에 따른 오염 부하량 발생 특성.” **수질보전 한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제24권, 제4호, pp. 465-472.

- 김철겸, 김남원(2009a). “물리적 기반의 유역모형을 이용한 오염물질 유달 특성 규명.” **수질보전 한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제25권, 제2호, pp. 256-267.
- 김철겸, 김남원(2009b). “환경부 8일 간격 유량·수질 관측자료와 분포형 모형을 이용한 연속오염부하곡선의 유도.” **수질보전 한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제25권, 제1호, pp. 125-135.
- 김철겸, 이정은, 김남원(2007). “충주댐 상류유역의 유사 발생에 대한 시공간적인 특성.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제11호, pp. 887-897.
- 김태순, 정일권, 구보영, 배덕효(2007). “다목적 유전자알고리즘을 이용한 Tank 모형 매개변수 최적화(I): 방법론과 모형구축.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제9호, pp. 677-685.
- 김현영, 박승우(1986). “유역특성에 따른 탱크모형 매개변수의 변화.” **한국농공학회지**, 한국농공학회, 제28권, 제2호, pp. 42-52.
- 김현영, 박승우(1988). “관개용저수지의 일별유입량과 방류량의 모의발생.” **한국농공학회지**, 한국농공학회, 제30권, 제1호, pp. 50-62.
- 류경식, 황만하, 고익환(2006). “RRFS 모형을 이용한 자연유량산정.” **한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 1777-1781.
- 맹승진, 이순혁, 류경식, 송기현(2005). “강우-유출모형에 의한 낙동강수계 일유출모의와 분석.” **한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 619-622.
- 문종필, 김태철(2006). “갑천유역의 영양염류 유달부하량 산정을 위한 SWAT2000 모형의 적용성 평가.” **한국농공학회논문집**, 한국농공학회, 제48권, 제6호, pp. 89-100.
- 박승우(1993). “Tank모형 헬프프로그램을 이용한 중소하천의 일유출량 추정.” **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제26권, 제3호, pp. 47-61.
- 박윤식, 김종진, 허성구, 김남원, 안재훈, 박준호, 김기성, 임경재(2008). “SWAT과 SATEEC 모형을 이용한 토양유실량 비교.” **한국농공학회논문집**, 한국농공학회, 제50권, 제1호, pp. 3-12.
- 박햇님, 조원철(2006). “개념적 강우-침투 과정을 고려한 탱크 모형의 유도.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제1호, pp. 47-57.
- 배덕효, 정일원, 강태호, 노준우(2003). “유출성분을 고려한 Tank 모형의 매개변수 자동추정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제3호, pp. 423-436.
- 서영제(1997). “탱크모형의 매개변수 검정에 관한 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제4호, pp. 327-334.
- 성운경, 김상현, 김현준, 김남원(2004). “다양한 목적함수와 최적화 방법을 달리한 SIMHYD와 TANK 모형의 적용성 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제2호, pp. 121-131.
- 신현석, 박재범(2001). “신경망 모형을 이용한 낙동강 유역 주요지점 자연유량 산정.” **대한토목학회 정기학술대회논문집**, 대한토목학회, pp. 1745-1748.
- 심석구, 구보영, 안태진(2009). “유전자 알고리즘을 적용한 혼합유출모형의 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제3호, pp. 201-212.
- 이관수, 이영석, 정일광(1995). “탱크모형의 매개변수 추정을 위한 상태공간모형의 결정.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제28권, 제2호, pp. 125-135.
- 이동률, 김현준, 김형섭(1996). “자연유출량 산정 및 평가(낙동강의 본류를 중심으로).” **한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 354-359.
- 이동률, 김형섭(1999). “낙동강 갈수관리를 위한 의사결정지원시스템.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제19권, 제II-4호, pp. 455-465.
- 이상호(1998). “탱크모형의 유출공 승수 변화를 고려한 홍수모의.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제31권, 제1호, pp. 3-12.
- 이상호, 강신욱(2007). “유역특성인자를 이용한 수정탱크모형 매개변수의 지역화.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제4B호, pp. 379-385.
- 이상호, 안태진, 윤병만, 심명필(2003). “적설 및 융설 모의를 포함한 탱크모형의 소양강댐 및 충주댐에 대한 적용.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제5호, pp. 851-861.
- 이수형, 박기범, 이도훈, 이효진(2009). “중소하천 유역의 자연유량 산정비교.” **대한토목학회 정기학술대회논문집**, 대한토목학회, pp. 3414-3417.
- 이정은, 김남원, 정일문, 이정우(2008). “유역수문모형과 빈도해석을 이용한 충주댐 상류유역 지하수 개발가능량의 평가.” **자원환경지질**, 대한자원환경지질학회, 제41권, 제4호, pp. 443-451.
- 임상준(2000). 농업유역의 논 관개수량 추정 모형의 개발. 박사학위논문, 서울대학교.
- 장경수, 지홍기, 이순탁(2008). “SWAT와 TANK 모형에 MODSIM을 결합시킨 물수지 모델구축.” **한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 1305-

1309.

정일문, 김남원, 이정우(2007). “유역 유출과정과 지하수위 변동을 고려한 분포형 지하수 함양량 산정방안.” **한국지하수토양환경학회지**, 한국지하수토양환경학회, 제12권, 제5호, pp. 19-32.

정일문, 구보영, 배덕효(2007). “Tank 모형의 4번째 저류탱크의 유출 불확실성 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제3호, pp. 237-249.

정은성, 이길성, 신문주(2006). “SWAT 모형과 EMC 산정 결과를 이용한 안양천의 수량 및 수질 특성.” **수질보전 한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제22권, 제4호, pp. 648-657.

조탁근, 김영오, 이길성(2006). “국내 갈수량 산정에 대한 재고.” **한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 829-833.

한강수계관리위원회·국립환경과학원 한강물환경연구소 (2007). 유역내 하천유지 가능 유하량 해석. 한강수계 2006년도 환경기초조사사업.

한국건설기술연구원(2007). 수자원의지속적확보기술개발 사업: 지표수 수문성분 해석시스템 개발. 과학기술부.

한국수자원공사(2001). 수문자료 빈도분석 및 일 유출 모의 시스템 구축.

허성구, 김기성, 김남원, 안재훈, 박상현, 유동선, 최중대, 임경재(2008a). “토지피복도 정확도에 따른 SWAT 예측 오류 평가.” **수질보전 한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제24권, 제6호, pp. 690-700.

허성구, 김남원, 박윤식, 김종건, 김성준, 안재훈, 김기성, 임경재(2008b). “SWAT ArcView GIS Extension Patch 를 이용한 소유역 분할에 따른 수문 및 유사 거동에 미치는 영향 평가.” **수질보전 한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제24권, 제2호, pp. 147-155.

허유만, 박승우, 임상준(1993). “중소유역의 일별 용수수급 해석을 위한 하천망모형의 개발(I): 중소유역의 일유출량 추

정.” **한국농공학회지**, 한국농공학회, 제35권, 제1호, pp. 40-49.

Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bernhardt, G. (1993). “A comprehensive surface-groundwater flow model.” *Journal of Hydrology*, Vol. 142, pp. 47-69.

Kim, C., Kim, H., Jang, C., and Kim, N. (2003). “Runoff estimation from two mid-size watersheds using SWAT model.” *Water Engineering Research*, KWRA, Vol. 4, No. 4, pp. 193-202.

Kim, N.W., and Lee, J. (2008). “Temporally weighted average curve number method for daily runoff simulation.” *Hydrological Processes*, Vol. 22, No. 16, pp. 4936-4948.

Kim, N.W., and Lee, J. (2010). “Enhancement of the channel routing module in SWAT.” *Hydrological Processes*, Vol. 24, No. 1, pp. 96-107.

Kim, N.W., Chung, I.M., Won, Y.S., and Arnold, J.G. (2008). “Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model.” *Journal of Hydrology*, Vol. 356, pp. 1-16.

Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). “River flow forecasting through conceptual models.” *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2001). Soil and Water Assessment Tool; The theoretical documentation (Version 2000). U.S. Agricultural Research Service.

Sugawara, M. (1972). “Method of rainfall-runoff analysis.” Kyouritsu Shuppan Co., Ltd., Tokyo, Japan (in Japanese).

논문번호: 11-126	접수: 2011.11.23
수정일자: 2011.12.30/2012.01.12	심사완료: 2012.01.12