

CAT 모형의 침투해석방법별 전역최적화기법을 이용한 보령댐 유역의 유출 특성 변화 분석

박상현¹, 김현준^{1,2*}, 장철희²
¹과학기술연합대학원대학교, ²한국건설기술연구원

Analysis of Streamflow Characteristics of Boryeong-dam Watershed using Global Optimization Technique by Infiltration Methods of CAT

Sanghyun Park¹, Hyeonjun Kim^{1,2*}, Cheolhee Jang²

¹Smart City and Construction Engineering, University of Science and Technology

²Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building
Technology

요약 본 연구에서는 물리적 매개변수 기반의 물 순환 해석 모형인 CAT(Catchment hydrologic cycle Assessment Tool)의 침투해석 방법별 유역 유출 특성의 변화를 분석하였다. 연구대상 유역은 충남지역에 위치한 보령댐 유역으로 최근 몇 년간 심각한 가뭄으로 인해 피해를 입은 바 있으며 금강 하류에서 보령댐 상류를 잇는 도수로를 설치하는 등의 노력을 통하여 현재는 안정을 찾은 상태이다. 이상 기후로 인해 발생하는 잦은 가뭄에 대응하기 위해서는 유역 내 수문 환경 특성 인자들의 상호작용 규명을 통한 정도 높은 물 순환 해석이 필수적이다. 본 연구에서는 토양 침투 관련 매개변수가 유역 유출 특성에 미치는 영향을 CAT에서 제공하는 Rainfall Excess, Green&Ampt 및 Horton 등의 침투 해석 방법별로 분석하였으며 각 침투 해석 방법별 토양 관련 주요 매개변수들의 연도별 변동을 비교하기 위해 CAT과 연계된 매개변수 최적화 및 불확실성 분석 패키지인 PEST(Model-Independent Parameter ESTimation) 내의 전역최적화기법(SCEUA-P)을 이용하여 매개변수 보정을 실시하였다. 또한 매개변수 최적화 수행 시에 각 연도별로 최적화한 결과를 매년 적용하는 경우와 전체 모의기간에 대해 최적화한 결과를 전 기간에 적용하는 경우, 그리고 각 연도별 최적화한 결과의 평균값을 전체 모의기간에 적용하는 세 가지 경우에 대한 유출 특성의 변화를 침투 해석 방법별로 비교 및 분석하였다.

Abstract In this study, the changes of the streamflow characteristics of the watershed were analysed depending on the infiltration methods of CAT. The study area, Boryeong-dam watershed located in Chungcheongnam-do area, has been suffered from severe drought in recent years and stabilized regarding on the storage rate through efforts such as constructing a channel connecting the upstream of Boryeong-dam from the downstream of the Geum river. In this study, the effects of soil infiltration parameters on the watershed streamflow characteristics were analyzed by the infiltration methods of CAT such as Rainfall Excess, Green&Ampt and Horton. And the parameter calibrations were conducted by SCEUA-P, a global optimization technique module of the PEST, the package for parameter optimization and uncertainty analysis, to compare the yearly variations of soil parameters for infiltration methods of CAT. In addition, the streamflow characteristics were analyzed for three infiltration methods by applying three different scenarios, such as applying calibrated parameters for every years to simulate the model for each years, applying calibrated parameters for the entire period to simulate the model for entire period, and applying the average value of yearly calibrated parameters to simulate the model for entire period.

Keywords : CAT, Boryeong-dam, Global optimization technique, Parameter optimization, Infiltration

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음. (과제번호 18AWMP-B083066-05)

*Corresponding Author : Hyeonjun Kim(KICT, University of Science and Technology)

Tel: +82-31-910-0266 email: hjkim@kict.re.kr

Received November 20, 2018

Revised (1st December 21, 2018, 2nd January 3, 2019)

Accepted February 1, 2019

Published February 28, 2019

1. 서론

우리나라는 연강수량의 50% 이상이 장마기간 동안 집중되어 있고 국토의 대부분이 산으로 이루어져 있어 비가 내리면 단시간에 하천으로 흘러들어 하천의 유량변동이 매우 크며 연도별, 지역별, 계절별 강수량의 차이도 심하기 때문에 수자원 관리 측면에서 어려움을 겪고 있다[1]. 최근 우리나라에서는 크고 작은 가뭄들이 지속적으로 발생하고 있으며 2008년 이후로는 거의 매년 가뭄이 발생하고 있다[2]. 특히 2015년 우리나라 중부지방을 중심으로 발생한 가뭄으로 2015년 11월 보령댐의 저수율이 18.9%까지 낮아져 준공 이후 최저 저수율을 기록하였다. 이에 충남지역은 제한급수를 시행하고 금강에서 보령댐을 잇는 11.49km 길이의 도수로 시설을 긴급 설치하였다[3]. 2015년의 가뭄은 2014년 중부지방에서 강수량 부족으로 인해 발생했던 가뭄이 완전히 해소되지 않은 상태로 연이어 이어진 강수량 부족에 의해 발생한 것으로[4], 2016년 완공된 금강-보령댐 도수로를 통해 물을 공급 받아오면서 2018년 10월을 기준으로 저수율이 70%를 넘어서 현재는 완전히 해갈된 상태이다. 이에 장석환(2017)은 금강-보령댐의 도수로 시설을 운영하는 것이 금강 내 수위에 미치는 영향을 분석하였으며[5] 이상철(2016)은 금강-보령댐 도수로 건설이 충남지역의 가뭄 극복에 미친 효과에 대해 기술하였다[6]. 기후변화로 인한 극한 기후에 따라 발생하는 잦은 가뭄 현상은 체계적이고 효과적인 수자원 관리를 통하여 해결해 나아가야 하며, 유역 내 수문환경 특성인자들의 상호작용 규명을 통한 정도 높은 유출 변화 분석이 필수적이다. 특히 강우-유출 모형을 통한 정확한 침투량의 산정은 매우 중요하며, 이는 침투량이 강우사상에 따라서 적게는 유출량의 30%에서 많게는 100%까지 차지할 수 있기 때문이다[7]. 구영민(2017)은 침투량 산정을 위해 Curve number, Horton 및 Green&Ampt 침투 방법에 따른 매개변수를 보정하여 결과를 비교 분석하였고[8], 유주환(2006)은 Horton 침투해석방법을 이용하여 유역을 대표하는 매개변수의 최적치를 산정하였다[7]. 또한 정성원과 김승(1991)은 Green&Ampt 침투해석방법을 적용하여 침투량을 산정하는 유출모형을 구성하였으며[9], 최신우(2016)는 판교 시험유역을 대상으로 CAT에서 제공하는 세 가지 침투방법별로 유출에 대한 토양 매개변수의 민감도 및 단기 유출특성을 분석하였다[10].

그러나 기존의 연구는 대부분 침투해석방법별 유출특성의 변화나 최적화기법에 따른 매개변수 산정에 국한된 반면, 본 연구에서는 전역최적화기법인 SCEUA(Shuffled Complex Evolution, University of Arizona)[11]를 이용하여 매개변수 최적화를 실시하였으며, 각 침투해석방법별로 매개변수 최적화 수행 시에 각 연도별 최적화한 결과를 매년 적용하는 경우, 전체 기간에 대해 최적화한 결과를 전 기간에 적용하는 경우, 그리고 각 연도별 최적화한 결과의 평균값을 전체 모의기간에 적용하는 세 가지 경우에 대한 유출특성을 분석하였다. 또한 침투해석방법별 매개변수가 유출특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 각 매개변수의 연도별 변동 특성을 분석하였다.

2. 대상유역 및 모형 입력자료 구축

대상유역은 충청남도 보령시에 위치한 보령댐 유역으로 1998년 한국수자원공사가 충청남도 서북부 지역에 생활용수와 공업용수 등을 공급할 목적으로 건설한 다목적댐이다. 보령댐 유역의 유역면적은 163.7km², 유로연장은 22.3km이며, 유역평균경사는 40.19%이다. 유역면적의 약 80%는 산림으로 이루어져 있고 약 13%는 논, 나머지 약 7%는 도심지로 이루어져 있다. 유역 연평균 강수량은 약 1,244mm이며 유역 월평균기온은 영하 0.8℃에서 영상 25.5℃로 기온에 대한 계절변동이 매우 큰 것을 알 수 있다[12].

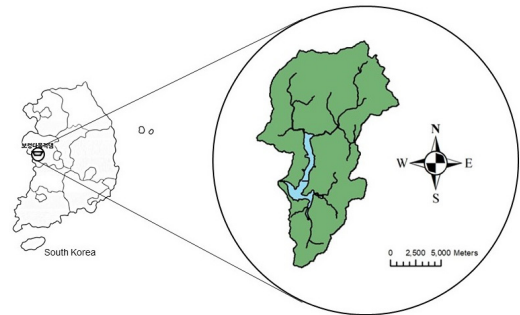


Fig. 1. Boryeong-dam watershed

연구기간은 2000년부터 2017년까지이며 모형 입력자료 구축을 위하여 총 18년간의 강우 및 유출에 대한 일자료를 수집하였다. 유역 내 강우량은 한국수자원공사의 도화담관측소 및 용암관측소의 자료를 사용하였으며, 기

상자료는 기상청에서 운영하고 있는 보령기상대의 기온, 습도, 일조시간 및 풍속 등의 일 자료를 수집하여 사용하였다. CAT 모형의 모의를 위해서는 토양 및 지하대수층 관련 물리적 매개변수의 입력이 필요하다. 따라서 농촌진흥청의 1:25,000 정밀토양도를 이용하여 토양 관련 매개변수 입력 자료를 구축하였으며, 지하대수층 입력 자료는 보령지역 지하수 기초조사 보고서[13]의 자료를 이용하였다. 또한 산림, 도시, 논 등으로 분류된 환경부 중분류 토지피복도를 이용하여 대상유역을 투수지역과 불투수지역으로 나누어 모형의 입력자료로 구축하였다. 또한 본 연구에서는 2016년 2월 이후로 금강-보령댐 도수로 운영을 통해 유역 내로 공급되는 외부유입량을 고려하기 위해 한국수자원공사로부터 자료를 수집하여 CAT 시스템을 구축하였다.

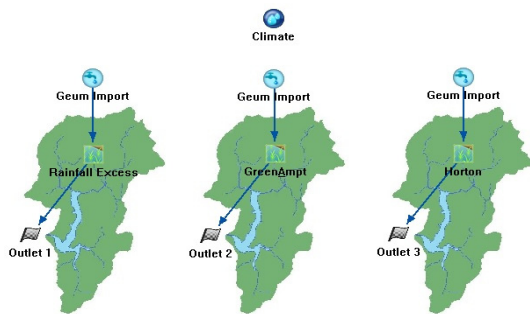


Fig. 2. CAT system configuration by infiltration methods

3. 연구방법

CAT 모형은 기존의 개념적 매개변수 기반의 집중형 수문모형과 물리적 매개변수 기반의 분포형 수문모형의 장단점을 보완하여 장·단기적 유역 물 순환의 변화 특성을 정량적으로 평가하기 위해 한국건설기술연구원에서 개발된 물 순환 해석 모형이다[14]. 기본적으로 링크-노드 방식의 모형으로 개발된 CAT 모형은 공간 단위별 침투, 증발 및 지하수 흐름을 모의할 수 있으며 물의 순환 과정을 투수역과 불투수역으로 구분한다. CAT모형에서는 투수역의 침투량 계산을 위한 침투해석방법으로 Rainfall Excess(Maidment, 1992) 방법[15], Green&Ampt(Green, W.H. and Ampt, G.A, 1911) 방법[16], Horton(Horton, 1933) 방법[17],을 제공한다. 본 연구에서는 CAT 모형과 연계된 매개변수 최적화 및 불확실성

분석 패키지인 PEST의 모듈인 SCEUA-P 전역최적화기법을 이용하여 침투해석방법별 매개변수의 변동특성을 알아보기 위해 각 침투해석방법별로 유출특성에 민감한 매개변수를 기존연구를 참고하여 Table 1과 같이 선정하였다[10]. Table 1에서 보는 바와 같이 Rainfall excess 침투방법의 경우는 토양수분율(Θ_s), 연직방향 투수계수(k_s), 사면방향 투수계수(k_{si})를 선정하였고, Green&Ampt 침투방법은 토양수분율(Θ_s), 연직방향 투수계수(k_s), 모세관흡인수두(PSI), Horton 침투방법은 토양의 초기침투능(f_0)과 중기침투능(f_c)을 선정하여 최적화를 수행하였다.

Table 1. Selected sensitive parameters for each infiltration methods

Rainfall Excess method		
Parameters for calibration	Θ_s	Saturated soil moisture
	k_s (mm/s)	Saturated vertical hydraulic conductivity
	k_{si} (mm/s)	Saturated horizontal hydraulic conductivity
Green&Ampt method		
Parameters for calibration	Θ_s	Saturated soil moisture
	k_s (mm/s)	Saturated hydraulic conductivity
	PSI (mm)	Wetting front soil suction head
Horton method		
Parameters for calibration	f_0 (mm/hr)	Maximum infiltration rate
	f_c (mm/hr)	Minimum infiltration rate

3.1 침투해석방법

본 연구에서는 침투해석방법별로 유역의 유출 특성을 비교 분석하기 위해 CAT에서 제공하는 Rainfall Excess, Green&Ampt, Horton 등 세 가지 침투해석방법을 사용하였다. Rainfall Excess 침투해석방법의 경우에는 연직방향과 사면방향 불포화투수계수를 사용하여 지하수층이 포화될 때까지 무조건 침투가 발생하는 것으로 가정하며, 강수량과 저류지에서의 초과량은 모두 지표면을 통과하여 토양함수량이 증가하는 것으로 계산한다. 또한 Green&Ampt 침투해석방법의 경우에는 토양의 물리적 특성값을 이용하여 침투량을 산정하며, Horton 침투해석방법의 경우에는 경험적 값을 이용하여 시간의 함수에 따른 침투능 곡선식으로 침투량을 산정한다[10,18].

3.2 매개변수 검·보정 시나리오

본 연구에서는 매개변수 최적화 수행 시에 최적화 결과의 검증에 위한 세 가지 시나리오에 대해 분석하여 비교하였다. 검증 방법에 따라 모의 시나리오를 SIM_(1), SIM_(2) 및 SIM_(3)로 구분하였으며, 각 시나리오별로 매개변수 보정기간과 모의기간을 달리 적용하여 검증방법에 따른 CAT 모형 성능의 차이를 확인하고자 하였다.

SIM_(1)은 2000년에서 2017년까지 총 18년에 대해 각 연도별로 보정한 매개변수를 각 연도별로 적용한 시나리오이다. 또한 SIM_(2)는 전 기간에 대해 보정한 매개변수를 전체 모의기간에 대해 적용한 시나리오이며, SIM_(3)는 각 연도별로 보정된 매개변수의 평균값을 전체 모의기간에 적용한 시나리오이다. 결과 분석을 위한 통계지표로는 NSE(Nash-Sutcliffe Efficiency), R²(Coefficient of determination) 및 RMSE(Root Mean Square Error)를 사용하였다.

Table 2. Scenarios depending on the period of calibration and verification

Scenarios	Calibration	Verification
SIM_(1)	Each years	Each years
SIM_(2)	Entire period	Entire period
SIM_(3)	Average of each years	Entire period

4. 결과 및 분석

2000년부터 2017년까지의 보령댐 유역의 강우량과 관측유출량 자료를 이용하여 물수지 분석을 수행한 결과 Fig. 3과 같이 2001년의 유출률은 35.85%, 2008년은 39.82%, 그리고 2015년은 36.01%로 다른 년도에 비해 매우 낮은 유출률을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 실제로 2001년, 2008년 및 2015년에는 우리나라 전역에 걸쳐 큰 가뭄이 발생하였으며[4] 본 연구의 대상유역인 보령댐 유역도 가뭄의 영향을 받았다는 것을 확인할 수 있었다.

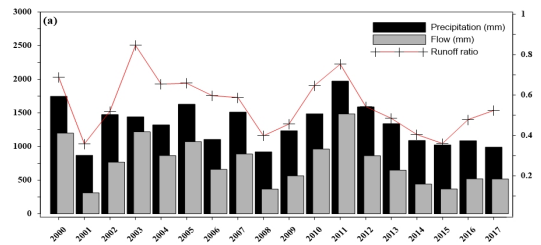


Fig. 3. Water balance of Boryeong-dam watershed

2000년~2017년 기간 동안 전역최적화기법을 적용하기 전의 침투해석방법별 CAT 모의 결과는 Table 3, 4, 5와 같다. Rainfall Excess 방법의 경우 NSE와 R²의 평균값은 각 0.695, 0.820이고, Green&Ampt 방법의 경우 NSE와 R²의 평균값은 각 0.630, 0.794이며, Horton 방법의 경우 NSE와 R²의 평균값은 각 0.697, 0.821로 나타났다. 각 침투방법별 입력 매개변수가 상이하므로 어느 방법의 모의 정확도가 높다고 판단하기는 어려우며 각 침투해석방법별 매개변수 검·보정을 통해 면밀히 살펴볼 필요가 있다.

Table 3. Results of Rainfall Excess infiltration method before calibration

	Before calibration of R.E.		
	NSE	RMSE	R ²
2000	0.929	0.439	0.931
2001	0.879	0.191	0.942
2002	0.827	0.334	0.854
2003	0.836	0.282	0.870
2004	0.831	0.384	0.839
2005	0.892	0.263	0.895
2006	0.881	0.213	0.891
2007	0.664	0.330	0.701
2008	0.834	0.180	0.847
2009	0.495	0.334	0.633
2010	0.462	0.557	0.633
2011	0.843	0.598	0.850
2012	0.768	0.291	0.895
2013	0.596	0.213	0.911
2014	0.315	0.191	0.666
2015	0.293	0.125	0.717
2016	0.841	0.149	0.915
2017	0.328	0.174	0.770
Average	0.695	0.291	0.820

Table 4. Results of Green&Ampt infiltration method before calibration

	Before calibration of G.A.		
	NSE	RMSE	R ²
2000	0.846	0.648	0.863
2001	0.831	0.226	0.968
2002	0.824	0.337	0.853
2003	0.791	0.318	0.815
2004	0.804	0.412	0.825
2005	0.826	0.334	0.852
2006	0.892	0.203	0.903
2007	0.561	0.377	0.639
2008	0.863	0.163	0.878
2009	0.405	0.362	0.615
2010	0.046	0.742	0.475
2011	0.836	0.611	0.849
2012	0.534	0.412	0.828
2013	0.522	0.231	0.786
2014	0.678	0.131	0.832
2015	0.311	0.123	0.716
2016	0.444	0.279	0.829
2017	0.329	0.174	0.767
Average	0.630	0.338	0.794

Table 5. Results of Horton infiltration method before calibration

	Before calibration of Ho.		
	NSE	RMSE	R ²
2000	0.929	0.929	0.931
2001	0.885	0.186	0.945
2002	0.833	0.329	0.858
2003	0.833	0.284	0.872
2004	0.833	0.382	0.842
2005	0.892	0.262	0.897
2006	0.883	0.211	0.894
2007	0.674	0.325	0.712
2008	0.842	0.176	0.851
2009	0.502	0.332	0.635
2010	0.462	0.557	0.635
2011	0.844	0.595	0.851
2012	0.770	0.290	0.896
2013	0.591	0.214	0.909
2014	0.324	0.189	0.658
2015	0.276	0.127	0.704
2016	0.838	0.151	0.912
2017	0.331	0.174	0.767
Average	0.697	0.317	0.821

Table 6, 7, 8은 전역최적화기법을 이용하여 각 연도 별로 최적화한 후 전체 모의기간에 대해 매년 검정한 SIM_(1)의 결과를 침투해석방법별로 정리한 것이다. NSE와 R² 값을 비교해보면 Rainfall Excess 방법의 경우 NSE와 R² 값의 평균이 각 0.877, 0.901, Green&Ampt 방법의 경우 NSE와 R² 값의 평균이 각 0.856, 0.890, 그리고 Horton 방법의 경우 NSE와 R² 값의 평균이 각 0.820, 0.873으로 나타나 Rainfall Excess 방법을 적용한 경우 정확도가 비교적 높게 나타났다.

Fig. 4, 5, 6, 7은 SIM_(1) 시나리오에 대한 관측값과 모의값의 1:1 비교 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 연구기간의 내의 관측유량에 비해 모의 유량이 대체로 과소 산정되었으며 이러한 경향은 모든 침투해석방법에서 확인할 수 있었다. 또한 2015년의 경우는 Rainfall Excess 방법의 경우 NSE와 R² 값이 각 0.523, 0.642, Green&Ampt 방법의 경우 NSE와 R² 값이 각 0.493, 0.645, 그리고 Horton 방법의 경우 NSE와 R² 값이 각 0.358, 0.604로 모의 정확도가 매우 낮게 나타났다. 이는 2014년부터 2015년에 걸쳐 연이어 발생한 강수량 부족에 따른 토양수분 감소가 유역 내 유출량의 급격한 저하를 야기한 것으로 판단된다.

Table 6. Results of Rainfall Excess infiltration method after calibration

	After calibration of R.E.		
	NSE	RMSE	R ²
2000	0.950	0.195	0.957
2001	0.974	0.047	0.975
2002	0.880	0.147	0.927
2003	0.853	0.141	0.901
2004	0.883	0.168	0.889
2005	0.929	0.112	0.933
2006	0.930	0.086	0.948
2007	0.877	0.105	0.879
2008	0.915	0.068	0.915
2009	0.882	0.085	0.883
2010	0.881	0.139	0.885
2011	0.941	0.193	0.947
2012	0.928	0.085	0.939
2013	0.857	0.067	0.900
2014	0.831	0.050	0.852
2015	0.523	0.054	0.642
2016	0.930	0.052	0.938
2017	0.828	0.047	0.914
Average	0.877	0.102	0.901

Table 7. Results of Green&Ampt infiltration method after calibration

	After calibration of G.A.		
	NSE	RMSE	R ²
2000	0.944	0.206	0.952
2001	0.976	0.045	0.977
2002	0.895	0.137	0.909
2003	0.861	0.137	0.887
2004	0.875	0.174	0.880
2005	0.930	0.112	0.934
2006	0.903	0.102	0.909
2007	0.879	0.104	0.880
2008	0.864	0.086	0.876
2009	0.876	0.087	0.877
2010	0.866	0.147	0.912
2011	0.891	0.263	0.892
2012	0.864	0.117	0.915
2013	0.799	0.079	0.886
2014	0.820	0.052	0.854
2015	0.493	0.056	0.645
2016	0.887	0.066	0.923
2017	0.782	0.052	0.915
Average	0.856	0.112	0.890

Table 8. Results of Horton infiltration method after calibration

	After calibration of Ho.		
	NSE	RMSE	R ²
2000	0.943	0.208	0.945
2001	0.971	0.050	0.975
2002	0.897	0.136	0.913
2003	0.833	0.150	0.907
2004	0.882	0.169	0.887
2005	0.932	0.110	0.936
2006	0.875	0.115	0.896
2007	0.801	0.134	0.805
2008	0.922	0.065	0.925
2009	0.664	0.144	0.723
2010	0.829	0.166	0.858
2011	0.882	0.274	0.885
2012	0.876	0.113	0.930
2013	0.754	0.088	0.900
2014	0.732	0.063	0.787
2015	0.358	0.063	0.604
2016	0.890	0.066	0.927
2017	0.717	0.060	0.910
Average	0.820	0.121	0.873

SIM_(1)의 침투해석방법별 결과를 정리하면 Table 9. (a)와 같으며 Table 9. (b), (c)와 같이 SIM_(2), SIM_(3)의 결과와 비교하였다. 그 결과 전 기간에 대해 최적화한 결과를 전체 모의기간에 대해 검증한 SIM_(2)의 NSE가 0.868로 세 가지 시나리오 중 가장 높은 정확도를 나타냈으며, SIM_(1)은 NSE가 0.851, SIM_(3)은 NSE가 0.808로 SIM_(2), SIM(1), SIM_(3)의 순서로 높은 정확도를 나타내는 것을 확인하였다. RMSE의 경우 SIM_(2)는 0.035, SIM_(3)는 0.078, SIM_(1)은 0.001의 순서로 낮은 오차를 나타냈다. 또한 R²값의 경우 SIM_(1)이 0.888,, SIM_(2)는 0.871, SIM_(3)는 0.826로 나타나 SIM(1), SIM(2), SIM(3)의 순서로 높은 정확도를 나타냈다.

Table 9. Results of scenarios depending on the period of calibration and verification
(a) SIM_(1) (b) SIM_(2) (c) SIM_(3)

(a)

	SIM_(1)		
	NSE	RMSE	R ²
RE	0.877	0.102	0.901
GA	0.856	0.112	0.890
HO	0.820	0.121	0.873
Average	0.851	0.112	0.888

(b)

	SIM_(2)		
	NSE	RMSE	R ²
RE	0.868	0.035	0.870
GA	0.868	0.035	0.871
HO	0.869	0.034	0.872
Average	0.868	0.035	0.871

(c)

	SIM_(3)		
	NSE	RMSE	R ²
RE	0.736	0.093	0.779
GA	0.845	0.071	0.847
HO	0.844	0.071	0.851
Average	0.808	0.078	0.826

지금까지 매개변수 검·보정 시나리오에 따라 전역최적화기법을 이용한 침투해석방법별 유출특성의 변화를 살펴보았다. 이와 함께 본 연구에서는 각 침투해석방법별 매개변수가 유출특성에 미치는 영향을 상세히 알아보기 위해서 각 매개변수의 연도별 변동특성을 분석하였다.

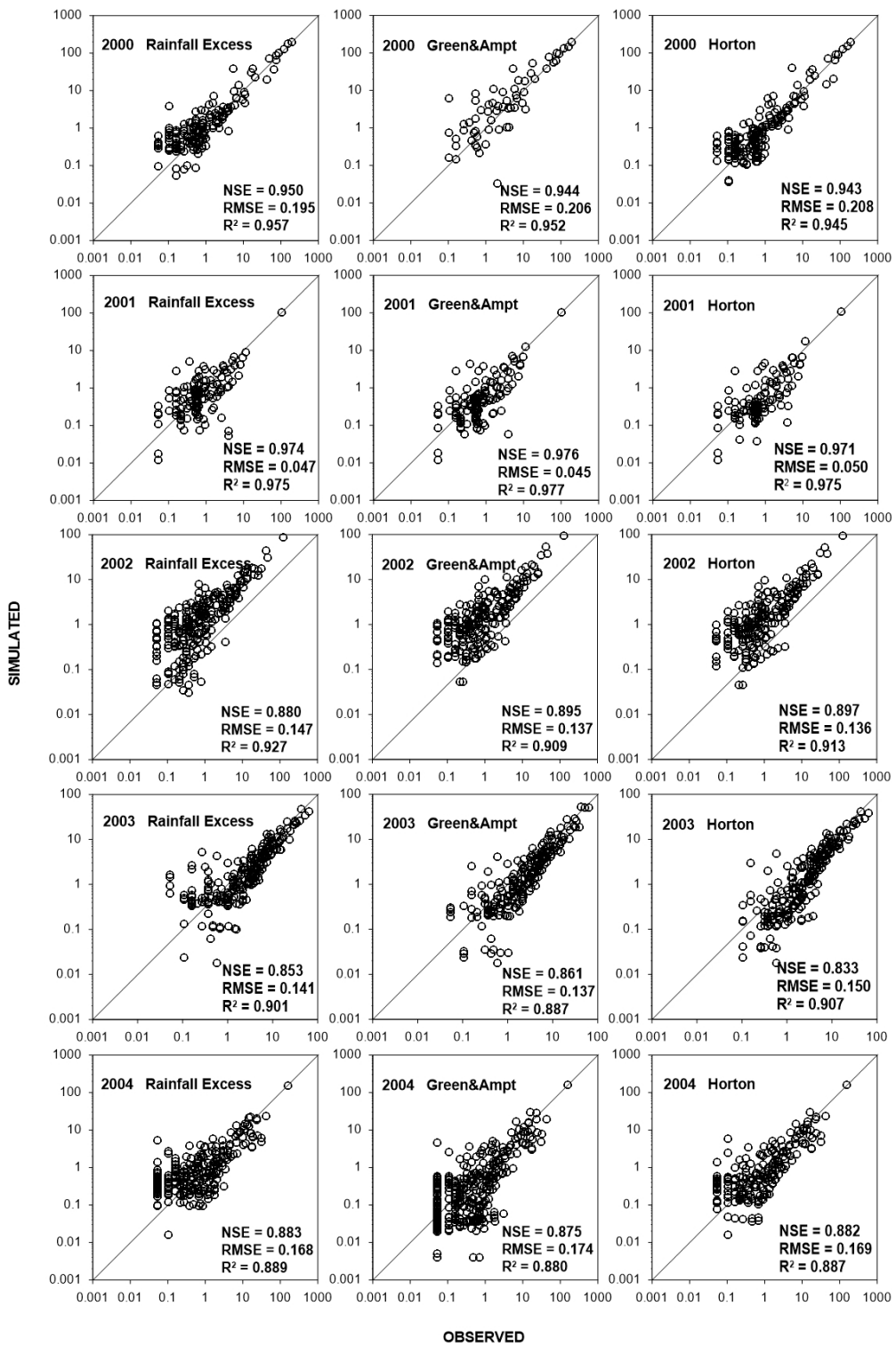


Fig. 4. CAT simulation for 2000-2004 of SIM₁(1)

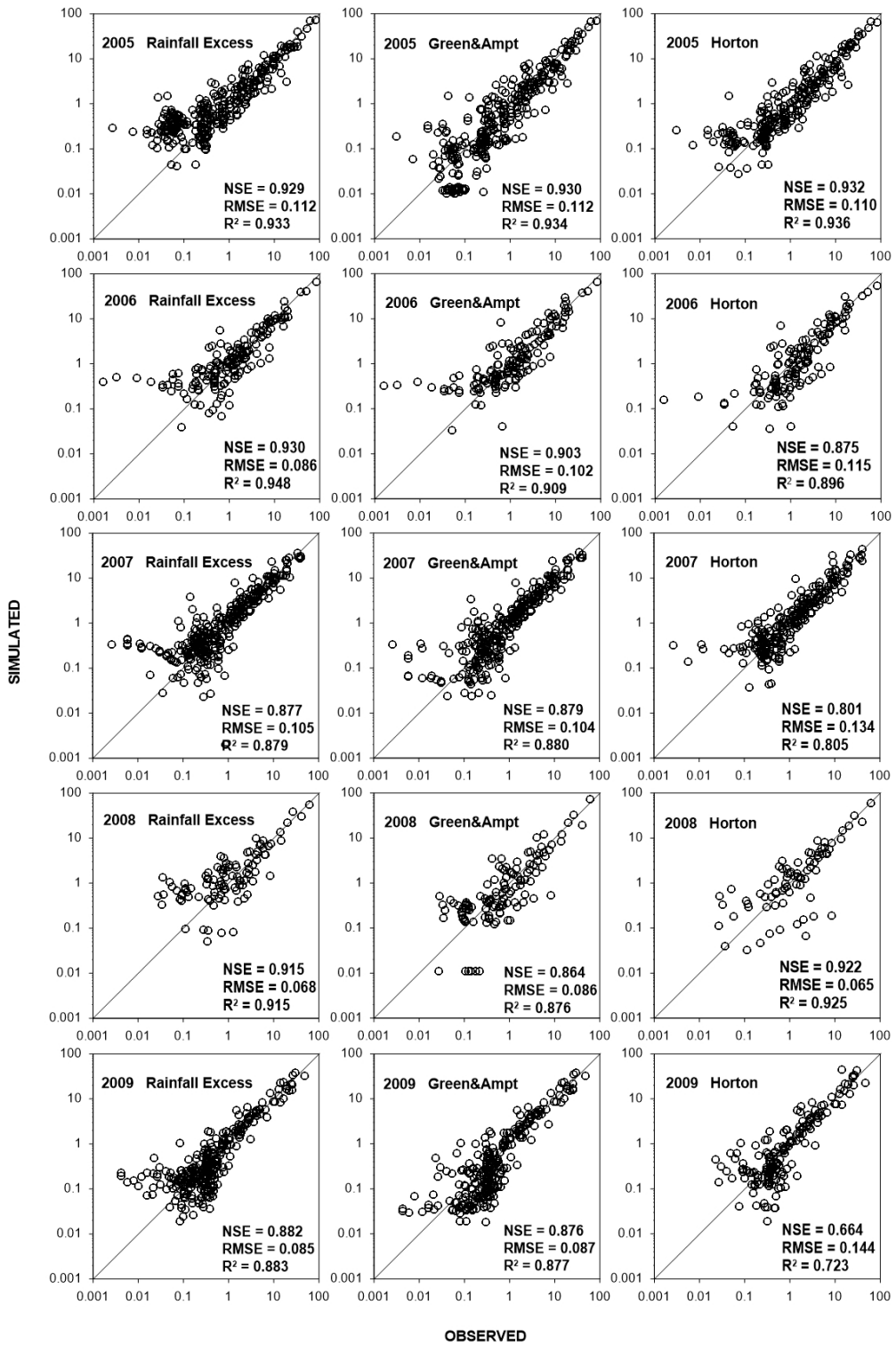


Fig. 5. CAT simulation for 2005-2009 of SIM_1)

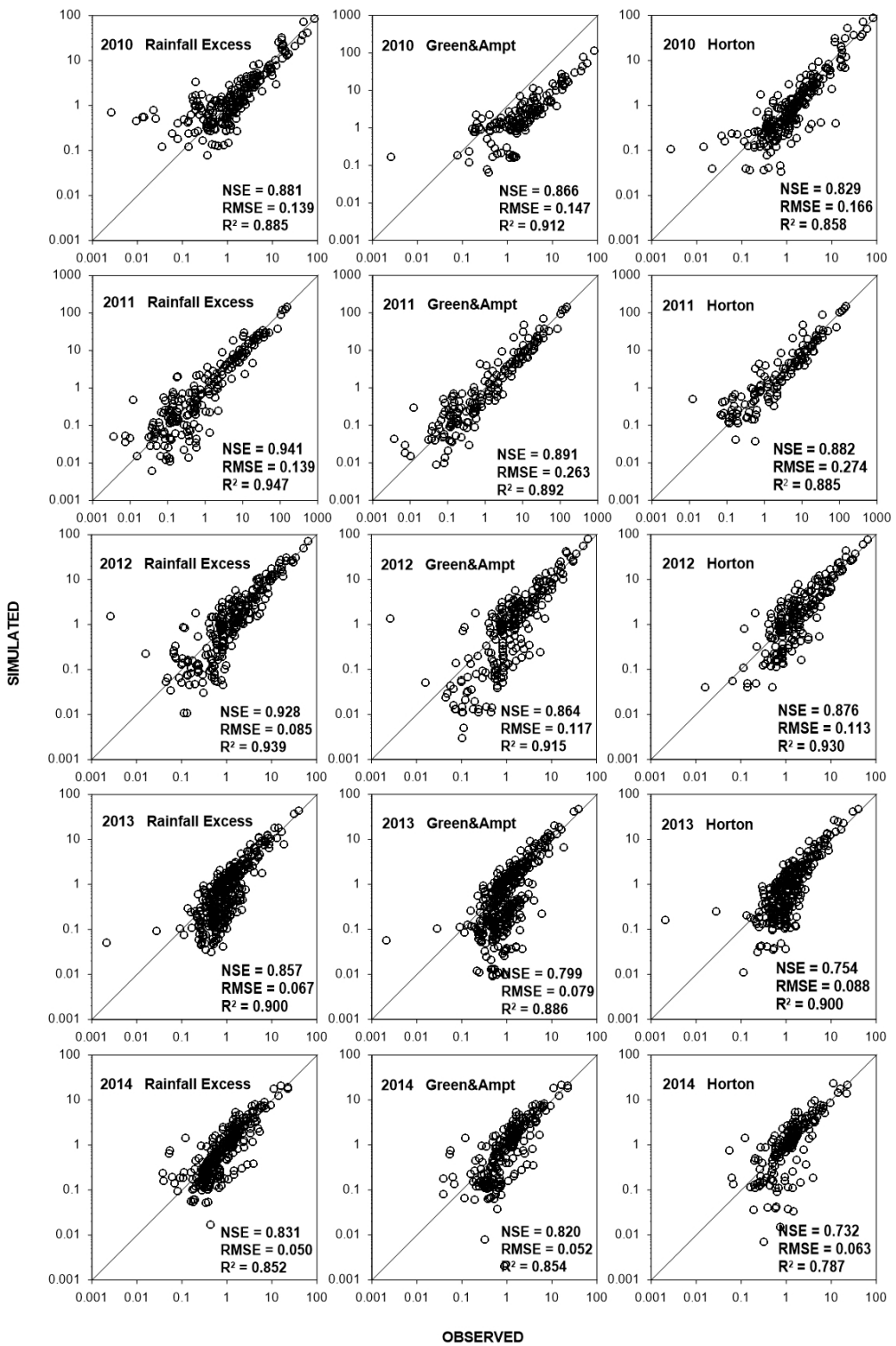


Fig. 6. CAT simulation for 2010-2014 of SIM_(1)

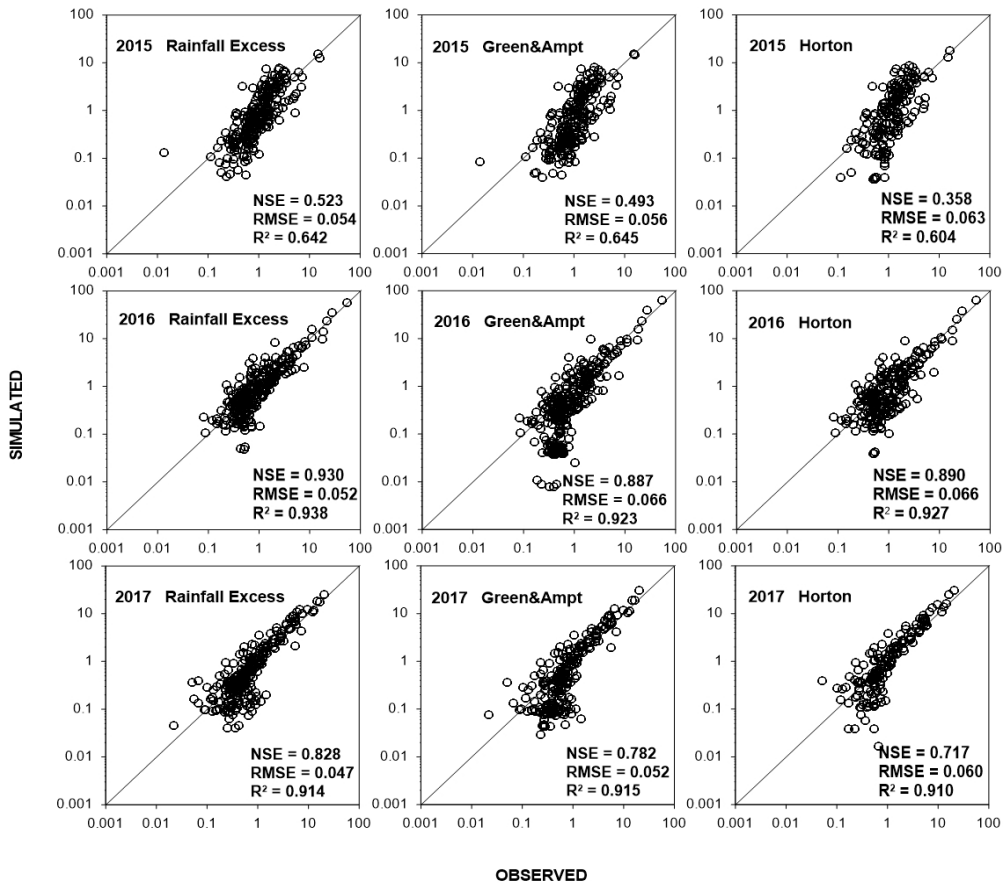


Fig. 7. CAT simulation for 2015-2017 of SIM_(1)



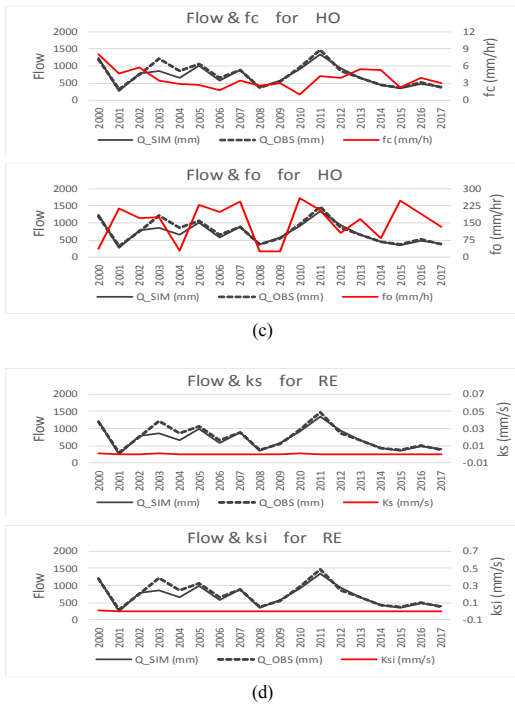


Fig. 8. Yearly variations of calibrated parameters
 (a) Rainfall Excess method before applying average value of Θ_s (b) Green&Ampt method (c) Horton method (d) Rainfall Excess method after applying average value of Θ_s

Fig. 8은 2000년 ~ 2017년까지 매개변수 감·보정 시나리오에 따라 분석된 침투관련 매개변수들의 연도별 변화를 나타낸 것으로 각 침투해석방법별 매개변수 변화에 따른 유출특성의 변화를 비교하기 위해 관측유량과 모의 유량을 함께 살펴보았다.

Fig. 8. (a)에서 보는 바와 같이 Rainfall Excess 침투해석방법에서는 2003년의 K_s 와 K_{si} 가 0.05mm/s, 0.27mm/s, 2015년의 K_s 와 K_{si} 가 0.035mm/s, 0.045mm/s로 다른 연도에 비해 매우 높게 나타났다. 이러한 결과는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 유출률이 낮게 나타난 2003년, 2015년의 결과와 일치하며 동일한 연도의 Θ_s 가 다른 연도에 비해 높게 나타난 결과와 관계가 있는 것으로 판단되어, 연도별 Θ_s 의 평균값을 고정시킨 후 K_s 와 K_{si} 를 전역최적화방법을 이용하여 재산정하였다. 그 결과 Fig. 8. (d)와 같이 2003년의 K_s 와 K_{si} 는 0.00058mm/s, 0.0034mm/s, 2015년의 K_s 와 K_{si} 는 0.00021mm/s, 0.00025mm/s로 나타나 특정 연도에만 발생하던 매개변수의 급격한 변화를 안정화 시킬 수 있었다. 이상과 같이 Rainfall Excess

침투해석방법의 경우 K_s 와 K_{si} 가 Θ_s 에 매우 민감하게 반응함을 알 수 있다. 또한 Green&Ampt 침투해석방법의 결과 K_s 의 연도별 변화가 크지 않았으나, Θ_s 에 따른 K_s 와 PSI 의 변동 특성을 알아보기 위해 Rainfall Excess 침투해석방법과 같이 Θ_s 를 연도별 평균값으로 고정시킨 후 K_s 와 PSI 를 전역최적화기법을 이용하여 재산정하였다. 그 결과 Fig. 8. (b)와 같이 Green&Ampt 침투해석방법에서는 Θ_s 와 K_s , PSI 의 상관성이 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 Horton 침투해석방법의 결과는 Fig. 8. (c)와 같으며 각 연도별 f_o 와 f_c 를 확인한 결과 f_o 는 최소 27.64mm/hr에서 최대 249.35mm/hr, f_c 는 최소 0.98mm/hr에서 최대 8.09mm/hr의 변화를 나타냈다.

이상과 같이 침투해석방법별 매개변수의 연도별 변동 특성을 분석한 결과 Rainfall Excess 침투해석방법의 경우는 K_s 와 K_{si} 의 최적화 수행 시에 Θ_s 의 변동 특성을 면밀히 분석할 필요가 있으며, Green&Ampt 침투해석방법과 Horton 침투해석방법의 경우에는 매개변수들 간의 상관성이 없는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 보령댐 유역을 대상으로 CAT 모형을 이용하여 일 자료 기반의 유출 분석을 실시하였으며 CAT 모형과 연계된 매개변수 최적화 및 불확실성 패키지인 PEST의 전역최적화기법(SCEUA-P)을 이용하여 Rainfall Excess, Green&Ampt 및 Horton 침투해석방법에 따른 주요 토양 매개변수들의 최적화를 수행하였다. 최적화를 수행하기 전의 CAT 모의 결과 Rainfall Excess 침투해석방법의 NSE와 R^2 값이 각 0.695, 0.820, Green&Ampt 침투해석방법의 NSE와 R^2 값이 각 0.630, 0.794, 그리고 Horton 침투해석방법의 NSE와 R^2 값이 각 0.697, 0.821로 나타났으며, 전역최적화기법을 이용한 최적화를 수행한 후의 모의 결과 Rainfall Excess 침투해석방법의 NSE와 R^2 값이 각 0.877, 0.901, Green&Ampt 침투해석방법의 NSE와 R^2 값이 각 0.856, 0.890, 그리고 Horton 침투해석방법의 NSE와 R^2 값이 각 0.820, 0.873으로 나타났다. 따라서 매개변수 최적화를 통하여 Rainfall Excess, Green&Ampt 및 Horton 침투해석방법의 NSE가 각 26.18%, 35.87% 및 17.65% 향상되었다.

또한 검·보정 방법에 따라 구분한 SIM_(1), SIM(2) 및 SIM_(3) 시나리오의 모의 결과, 연도별 최적화 매개변수를 매년 적용하여 검증한 SIM_(1)의 NSE, RMSE 및 R^2 값은 각 0.851, 0.112, 0.888, 연구기간 전 기간에 대해 최적화한 매개변수를 전체 모의기간에 대해 적용한 SIM_(2)의 NSE, RMSE 및 R^2 값은 각 0.868, 0.035, 0.871, 그리고 연도별 최적화한 매개변수의 평균값을 적용하여 전체 모의기간에 대해 적용한 SIM_(3)의 NSE, RMSE 및 R^2 값은 각 0.808, 0.078, 0.826로 나타나 전 기간에 대해 최적화 수행 후 보정된 매개변수를 전체 모의기간에 적용한 SIM_(2)의 모의 정확도가 가장 높게 나타났다.

또한 전역최적화기법을 이용한 침투해석방법별 매개변수의 연도별 변동특성을 분석한 결과 Rainfall Excess 침투해석방법의 경우 K_s 와 K_{si} 값이 Θ_s 값에 민감하게 반응하는 것을 확인하였고, Green&Ampt 침투해석방법의 경우 Θ_s 와 K_s , PSI의 상관성이 거의 없는 것으로 나타났다.

따라서 Rainfall Excess 침투해석방법을 이용하여 최적화기법을 적용할 경우에는 Θ_s , K_s 및 K_{si} 의 변동특성을 면밀히 살펴볼 필요가 있을 것이다.

References

- [1] H. M. Jo, Y. J. Choi, H. J. Kwon, "Climatological Features of Summer Precipitation in Korea", *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol.30, No.3, pp.247-256, 1997.
- [2] H. S. Kim, H. S. Kim, G. I. Jeon, S. W. Kang, "The Evaluation of Drought: 2014-2015", *Water for Future*, KWRA, Vol.49, No.7 pp.61-75, 2016.
- [3] Y. J. Choi, J. H. Ahn, J. E. Yi, "Analysis of Boryeong Dam Operation Effects according to Boryeong Dam Diversion Tunnel Operation Standard", *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, pp.52, 2017.
- [4] M. S. Yu, Y. H. Cho, T. W. Kim, H. S. Chae, "Analysis of drought propagation using hydrometeorological data: from meteorological drought to agricultural drought", *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol.51, No.3, pp.195-205, 2018
DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2018.51.3.195>
- [5] S. H. Jang, K. D. Oh, J. H. Oh, "Impact on Water Surface Level of the Geum River with the Diversion Tunnel Operation for Low Flow Augmentation of the Boryong Dam", *Journal of Environmental Science International*, Vol.26, No.9 pp.1031-1043, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.5322/JESI.2017.26.9.1031>
- [6] S. C. Lee, "Overcome Drought in Western Chungcheongnam-do Province through Construction of Boryeong-dam Diversion Tunnel", *The Magazine of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.16, No.2 pp.33-37, 2016
- [7] J. H. Yoo, "Optimal Determination of the Parameters Representative of a Basin in the Horton's Infiltration Model", *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol.39, No.11, pp.977-984, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2006.39.11.977>
- [8] Y. M. Koo, D. I. Seo "Parameter Estimation to Improve Urban Planning Area Runoff Prediction Accuracy using Stormwater Management Model (SWMM)", *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol.50, No.5, pp.303-313, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.3741/jkwra.2017.50.5.303>
- [9] S. W. Jung, S. Kim, "Rainfall-Infiltration Model using Green-Ampt Infiltration Method", *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol.33, pp.144-155, 1991.
- [10] S. W. Choi, C. H. Jang, H. J. Kim, "Analysis of Short-term Runoff Characteristics of CAT-PEST Connected Model using Different Infiltration Analysis Methods", *Journal of Korea Academia-Industria cooperation Society*, Vol.17, No.11, pp.26-41, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.5762/kais.2016.17.11.26>
- [11] J. Doherty, *PEST: Model-Independent Parameter Estimation*, pp.2-1-13-14, Watermark Numerical Computing, 2009.
- [12] C. S. Rim, "Hydrologic Simulation Considering Watershed Characteristic in Boryeong-dam Watershed", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.10, No.1, pp.67-72, 2006.
DOI: <https://dx.doi.org/10.5660/WTS.2016.5.3.111>
- [13] *Boryeong Area Groundwater Survey Report*, Ministry of Construction & Transportation, K-water, 2007
- [14] H. J. Kim, C. H. Jang, S. J. Noh, "Development and Application of the Catchment hydrologic cycle Assessment Tool considering Urbanization (1) -Model Development-", *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 2, pp.203-215, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.3741/jkwra.2012.45.2.203>
- [15] Maidment, David. R. *Handbook of Hydrology*. McGRAW HILL. pp.5.23-5.30, 1992.
- [16] Green, W. H. and Ampt, G. A., "Studies of Soil Physics. Part I. The Flow of Air and Water through Soils", *Journal of Agriculture Science*, Vol.4, No.1, pp.1-24, 1911
DOI: <https://doi.org/10.1017/S0021859600001441>
- [17] R. E. Horton, *The role of infiltration in the hydrologic cycle*, pp. 446-460, American Geophysical Union, Transaction, 1933
DOI: <https://doi.org/10.1029/tr014i001p00446>
- [18] H. J. Kim, C. H. Jang, *Catchment Hydrologic Cycle Assessment Tool User's Manual(CAT3.0)*, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, pp.14-20, 2017.

박 상 현(Sanghyun Park)

[정회원]



- 2012년 8월 : 국민대학교 건설시스템공학 (이학사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 과학기술연합대학원대학교 스마트도시건설융합 건설환경공학 (박사과정)

<관심분야>
수문해석, 기후변화

김 현 준(Hyeonjun Kim)

[정회원]



- 1988년 2월 : 서울대학교 대학원 농공학과 (공학석사)
- 2001년 8월 : 서울대학교 대학원 농공학과 (공학박사)
- 1989년 6월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 선임연구위원
- 2005년 3월 ~ 현재 : 과학기술연합대학원대학교 KICT 스쿨 대표교수

<관심분야>
수자원평가, 기후변화, 수문해석, 수문모형 개발

장 철 희(Cheolhee Jang)

[정회원]



- 2002년 2월 : 건국대학교 지역건설환경공학과 (공학석사)
- 2012년 8월 : 건국대학교 지역건설환경공학과 (공학박사)
- 2002년 1월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>
수자원평가, 기후변화, 수문해석, 수문모형 개발