

CAT-PEST 연계 모형의 침투 해석 방법에 따른 단기 유출 특성 분석

최신우¹, 장철희², 김현준^{1,2*}

¹과학기술연합대학원대학교 건설환경공학부, ²한국건설기술연구원 수자원·하천 연구소

Analysis of Short-term Runoff Characteristics of CAT-PEST Connected Model using Different Infiltration Analysis Methods

Shinwoo Choi¹, Cheolhee Jang², Hyeonjun Kim^{1,2*}

¹Department of Construction Environmental Engineering, University of Science & Technology

²Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building
Technology(KICT)

요약 본 연구에서는 물리적 매개변수 기반의 물순환모형 CAT(Catchment hydrologic cycle Assessment Tool)을 매개변수 자동보정 기법인 PEST(Model-independent Parameter ESTimation)와 연계하여 단기 유출 특성을 분석하였다. CAT모형의 유출 모의 시 CAT모형에서 지원하는 3가지 침투 해석 방법((Rainfall excess, Green&Ampt and Horton)을 적용하였으며, 대표적인 단기 유출모형인 HEC-HMS를 비교 모델로 설정하여 모의 결과를 비교 분석하였다. 대상유역은 탄천의 지류인 운중천과 금토천이 포함된 판교 시험유역으로 유역면적은 22.9km²이며, 유로연장은 9.2km이다. 2006, 2007년 중 누적 강우량 40mm이상에 해당하는 6개의 강우사상을 대상으로 모의를 실시하였다. 주요 매개변수를 대상으로 침투유량, 침투시간, 유출용적에 대한 민감도 분석 수행 후, PEST를 적용하여 유출 특성에 민감하게 반응하는 토양 관련 매개변수들에 대해 최적화를 수행하였다. 모의 결과 HEC-HMS의 경우 6개 강우사상에 대해 NSE가 0.63~0.91이었으며, CAT-PEST는 NSE 0.42~0.93의 모형 효율을 보였다. 선행토양함수조건에 따라 유출특성이 민감하게 반응하는 강우사상에 대해서는 HEC-HMS의 모의 정확도가 높았으나 강우 특성에 따라 유출특성이 민감하게 반응하는 경우에는 한계가 있는 것으로 보인다. 물리적 매개변수가 입력자료로 사용되는 CAT-PEST의 경우 다양한 유출특성을 가진 강우 사상에 대해 정밀한 유출 분석이 가능할 것으로 판단된다.

Abstract Catchment Hydrologic Cycle Assess Tool (CAT) is a model for hydrologic cycle assessment based on physical parameters. In this study, CAT was applied for short-term runoff simulation and connected with model-independent parameter estimation (PEST) for auto-calibrating parameters. The model performance was compared with HEC-HMS, which is widely used for short-term runoff simulation. The study area is the Pangyo Watershed (22.9 km²), which includes the Unjung-Cheon and Geumto-Cheon tributaries of the Tan-Cheon stream. Simulation periods were selected from six rainfall events of a two-year period (2006-2007). For the runoff simulation, CAT was applied using three types of infiltration methods (excess rainfall, Green and Ampt and Horton). Sensitivity analysis was carried out to select the parameters and then CAT was optimized using PEST. The model performance of HEC-HMS and CAT-PEST for the rainfall events were within an acceptable limit with Nash Sutcliffe efficiencies (NSE) of 0.63-0.91 and 0.42-0.93, respectively. The simulation results of HEC-HMS have high accuracy in the case of rainfall events that have a sensitive relationship between initial soil moisture conditions and runoff characteristics. The results of CAT-PEST indicated the possibility of reflecting a real runoff system using various physical parameters.

Keywords : Catchment hydrologic cycle Assessment Tool (CAT), HEC-HMS, parameter optimization, PEST, rainfall-runoff

본 논문은 국토교통부 물관리 연구사업(14AWMP-B082564-01) 및 한국건설기술연구원 주요사업(20160160-001)의 연구비지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Hyeonjun Kim(KICT, Univ. of Science & Technology)

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

Received October 19, 2016

Revised November 9, 2016

Accepted November 10, 2016

Published November 30, 2016

1. 서론

국내에서는 단기유출 모의를 위하여 HEC-HMS를 이용한 유출 분석에 관한 연구가 많이 이루어진 상태이다. 홍수범람분석 및 홍수피해산정을 위해 HEC-HMS를 이용하여 진위천 유역의 강우 유출 분석을 실시한 바 있으며, 무심천 유역 내 도시화에 의한 유출분석을 실시한 바 있다[1,2].

집중형 모형과 달리 물리적 매개변수를 기반으로 한 물순환 모형인 CAT은 주로 장기 유출모의 및 물수지 분석에 많이 활용되었다[3]. 장철희 등[4]은 농업용 저수지 영향을 반영한 장기 유출모의에 CAT을 이용하였다. 이 상현과 조홍제[5]는 울산의 주요 하천유역을 대상으로 물순환 분석을 실시하여 1975년과 2008년의 표면유출, 중간유출의 변화를 파악하였고, 물순환이 도시화를 증가 정도를 반영하는지에 대한 분석을 수행한 바 있다.

HEC-HMS는 유출 분석 시 매개변수의 보정이 필요하다. 유철상과 신정우[6]는 HEC-HMS 내의 최적화기법을 적용하였을 경우 발생하는 문제점을 극복하기 위한 대안으로 Nash 모형의 반복계산을 통해 수렴된 값을 찾아내는 방식으로 매개변수의 최적화를 실시하였다. 윤국희 등[7]은 HEC-HMS를 이용하여 매개변수 초기값이 최적화에 미치는 영향을 분석한 바 있다. 전체적인 평균 유출량을 일치시키기 위해 CN을 우선 보정한 후, 침투 발생시간을 맞추기 위해 도달시간 및 저류상수를 보정하고, 수문곡선의 형태를 결정하는 나머지 매개변수를 보정하는 식의 보정 순서를 제시하였다.

매개변수의 자동보정 기법은 수동보정 기법에 비해 효율적이고 객관성을 지닌다. 자동 보정 기법에 해당하는 PEST(Model-independent Parameter ESTimation)는 비선형함수의 매개변수 최적화 및 불확실성 분석 패키지이다. 기존의 매개변수 최적화 모형에 비해 적은 횟수의 반복계산 과정을 거치며 다차원 매개변수 추정에 사용되는 고급기법을 지원한다[8,9]. 노성진 등[10]은 강우추정 방법에 따른 최적 매개변수 추정 시 자동보정기법인 PEST를 사용하여 분포형 수문모형인 GRM의 공간해상도에 따른 매개변수의 변화를 분석하였다. 전지홍 등[11]은 HSPF와 PEST를 연계 적용하여 유량 및 비점오염 부하량을 자동보정 하였으며, HSPF 보정에 있어 PEST의 적용성을 평가하였다.

집중형 모형과 분포형 모형 간의 유출분석 비교는 많이 이루어져왔다. 이연근 등[12]은 격자 분포형 모형인

SWAT모형과 HEC-HMS를 오수천 유역에 적용하여 유출특성을 비교하였고, 박진혁과 강부식[13]은 집중형 모형인 KOWACO 홍수분석 모형과 분포형 모형인 Vflo 모형을 용담댐 유역에 대해 유출 해석을 실시하여 두 모형의 구조적 장단점을 비교 분석하였다. 또한 도시유역 홍수유출해석을 위하여 HEC-HMS와 XP-SWIMM모형을 대전광역시 갑천 유역에 연계 적용한 바 있다[14].

본 연구는 CAT의 침투 해석 방법에 따른 단기 유출 특성을 분석하기 위해 판교 신도시 시험 유역을 대상으로 2006년과 2007년 중 강우량 40mm 이상에 해당하는 강우사상의 유출 분석을 수행하였다. 대표적인 단기 유출 모형인 HEC-HMS를 비교 모델로 설정하여 두 모형의 모의 결과를 비교하였다. CAT의 유출모의 수행 시 3가지 침투 해석 방법은 Rainfall excess, Green&Ampt, Horton 방법을 적용하였다. 유출특성에 민감하게 반응하는 토양 관련 매개변수를 선정하여 매개변수 민감도 분석을 실시하였으며, 매개변수의 자동최적화 기법인 PEST를 CAT과 연계하여 최적화를 수행하였다.

2. 연구방법

2.1 대상유역

대상유역은 경기도 성남시 판교 시험유역이며 탄천의 지류인 운중천과 금토천이 위치한 유역이다. 유역면적은 약 22.9 km^2 에 달하며, 유로연장은 9.2km이다. 최종 출구점은 유역의 동쪽에 위치한 운중천의 하류인 매송교 지점이다. 대상유역은 수위관측소 지점을 기준으로 5개의 소유역으로 분할하였다. Fig. 1(a)에서 수위관측소 4개소(내동교, 삼평교, 판교교, 매송교) 및 최종 출구점인 매송교 지점을 표시하였다. Fig. 1(b)는 토지이용 현황을 나타내며 금토천이 지나가는 SUBBASIN 2, 3은 73.9%가 산지유역이다. 유역 내 시가지 지역은 하천을따라 이루어져 있으며 최하류에 해당하는 SUBBASIN 5의 시가지지역 비율은 23.6%이다. Fig. 1(c)는 토양도이며 금토천 유역의 경우 식양질토(clay loam) 39.6%, 사질양토(sandy loam) 35.1%, 미사 식양질토(silty clay loam) 14.1%, 사질토(sand) 11.2%로 구성되어 있고, 운중천 유역은 사질양토(sandy loam) 58.0%, 식양질토(clay loam) 32.7%, 미사 식양질토(silty clay loam) 9.3%로 대부분 사질양토(sandy loam)로 구성되어 있다.

모의기간은 2006, 2007년 강우사상 중 누적 강우량

40mm 이상, 무강우시간 6~12시간에 해당하는 6개의 강우사상을 선별하였다(Table 1). 5일 선행 강수량에 따라 AMC I 조건에 해당하는 강우사상은 Event 4, 6이며, AMC II 조건은 Event 1, 3, AMC III 조건은 Event 2, 5가 해당된다. Event 4는 총강우량 기준 40mm 이상에 해당하지만 관측유출량이 매우 작고 침투유량 또한 매우 낮게 나타난 경우이다. 그러나 작은 강우에 대한 토

양 수분 거동 특성과 유출특성과의 관계를 살펴보기 위해 분석에 포함하였다. 강우 관측소는 한국건설기술연구원에서 설치한 관측소의 시단위 강수량 및 기상청에서 제공하는 기상자료(최고 기온, 최저 기온, 평균 기온, 풍속, 습도, 일조시간 등)를 활용하였으며, 모형의 검·보정을 위해 4개 지점(내동교, 삼평교, 판교교, 매송교)의 관측수위 및 유량자료를 이용하였다.

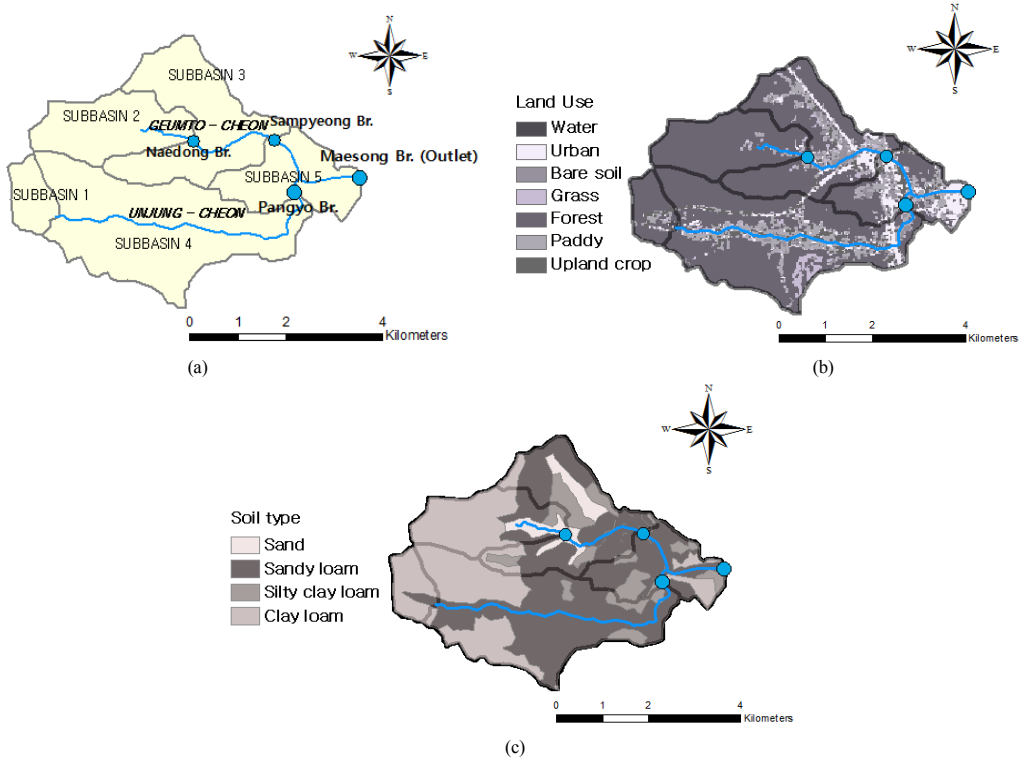


Fig. 1. Characteristics of study area
(a) Study area (b) Landuse map (c) Soil map

Table 1. Selected rainfall events

	Event period	Total rainfall (mm)	Total discharge (mm)	Peak discharge ($Q_p, m^3/s$)	P5 (mm)	AMC
Event 1	2006.06.14. 12:00 ~ 2006.06.15. 10:00	71.2	13.8	16.7	42.0	AMC II
Event 2	2006.07.15. 10:00 ~ 2006.07.19. 03:00	263.0	226.0	73.2	146.8	AMC III
Event 3	2006.07.27. 02:00 ~ 2006.07.29. 22:00	256.7	211.3	60.7	45.0	AMC II
Event 4	2007.05.16. 13:00 ~ 2007.05.17. 05:00	47.0	3.1	2.6	15.0	AMC I
Event 5	2007.08.08. 07:00 ~ 2007.08.08. 19:00	60.0	39.0	54.0	58.6	AMC III
Event 6	2007.09.14. 13:00 ~ 2007.09.15. 12:00	108.8	49.9	39.1	0.0	AMC I

* P5: Antecedent 5-days rainfall, AMC: Antecedent soil moisture condition

Table 2. Input parameters for HEC-HMS

	SUBBASIN 1	SUBBASIN 2	SUBBASIN 3	SUBBASIN 4	SUBBASIN 5
Area (km ²)	1.2	3.6	5.5	9.3	3.3
CN	56.2	64.7	77.0	68.9	70.2
Impervious (%)	1.6	0.3	8.9	4.7	23.6
T_c^* (hr)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Storage Coeff. (hr)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

* T_c (Time of concentration)

2.2 HEC-HMS

HEC-HMS는 미 육군 공병단에서 개발된 강우-유출 및 홍수추적 과정을 모의하는 프로그램이다. 본 연구에서는 SCS방법을 통해 손실량을 산정하였고, 단위도는 Clark 단위도법을 적용하였으며 도달시간은 급경사유역 20분을 적용하였다[15,16]. HEC-HMS의 입력매개변수는 Table 2와 같다. 기저유량은 Recession방법을 택했으며, 하도추적의 경우 Lag법을 적용하였는데 한국건설기술연구원[17,18]의 유량측정자료를 이용하여 수위-단면적 관계로부터 유속을 계산한 후 지점별 지체시간(Lag time)을 산정하였다. Fig. 2는 HEC-HMS 유역 분할 및 시스템 모의 화면이다. HEC-HMS에는 매개변수 최적화 프로그램이 내장되어 있으나 매개변수가 많을 경우에 매개변수 추정이 합리적이지 못하다는 단점이 있다[19]. 따라서 본 연구에서는 수동보정을 통해 보정을 실시하였다. 매개변수 최적화에 사용된 매개변수는 유출곡선지수(Curve Number, CN), 저류상수(Storage coefficient), 기저유량 계산에 사용되는 초기 유량(Initial discharge), 수문곡선의 하강곡선상의 지수 함수적으로 감소하기 시작하는 유량(R recession constant), 기저유량 감소비(Ratio)로 총 5개이다.

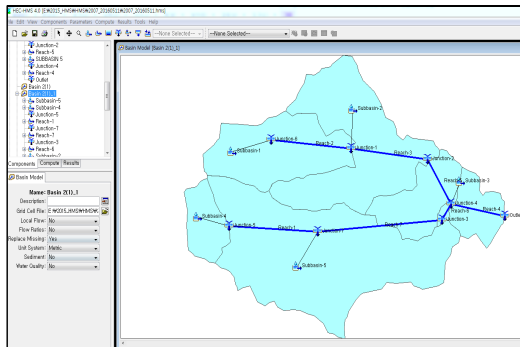


Fig. 2. HEC-HMS system

2.3 CAT 모형

CAT에서의 물의 순환과정은 투수역과 불투수역으로 구분하였으며, 각 공간 단위별로 침투, 증발, 지하수 흐름 등의 모의가 가능하다[20]. 하도추적은 Muskingum 방법, Muskingum-Cunge 방법, Kine-matic wave 방법이 있으며, 본 연구에서는 Muskingum 방법을 적용하였다. Fig. 3은 CAT의 유역 분할 및 시스템 모의화면이다.

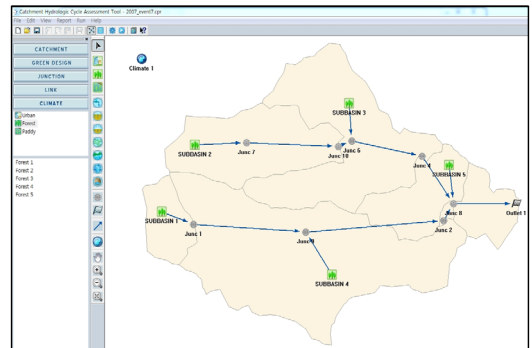


Fig. 3. CAT system

CAT은 물리적 매개변수를 기반으로 하는 모형이므로 유역경사, 불투수면적 비율, 토양 관련 매개변수는 GIS 자료 전처리 과정을 통해 구축되었다. Table 3은 CAT의 입력자료로 사용되는 물리적 매개변수를 나타낸다. 또한 CAT은 투수역의 침투량을 계산하기 위해 총 3가지(Rainfall excess, Green&Ampt and Horton) 침투 해석 방법을 제공한다. 본 연구에서는 3가지 침투 해석 방법에 따른 유출기동을 비교 분석하였다.

Rainfall excess 방법은 연직방향과 사면방향의 포화 투수계수를 사용하여 침투량을 산정하는 방법이며, 침투량 산정을 위해서 토양의 초기 수분율(θ_{per})과 연직방향 투수계수(K_{s_per}), 사면방향 투수계수(K_{si_per}), Mualem 지수가 사용된다. Mualem 지수는 포화투수계

Table 3. Input parameters for CAT

	Parameter	Description	Unit
Surface	Area	Area	km ² , m ²
	Slope	Slope	-
	Aratio_imp	% of impervious area	%
	Aratio_per	% of pervious area	%
	Aper_vegetation	% of vegetation area	%
	DepC_imp	Depression storage of impervious area	mm
	DepC_per	Depression storage of pervious area	mm
Soil	theta_per	Initial soil moisture	-
	Soil depth	Soil depth	m
	s_per	Saturated soil moisture	-
	r_per	Residual soil moisture	-
	FC_per	Field capacity soil moisture	-
	W_per	Wilting point soil moisture	-
	Ks_per	Θs of soil(vertical)	mm/s
	Ksi_per	Θs of soil(lateral)	mm/s
	mualem	mualem n	-
	PSI	Wetting front soil suction head	mm
	k	Decay coefficient	hr ⁻¹
	f_c	Minimum infiltrate capacity	mm/hr
	f_o	Maximum infiltrate capacity	mm/hr
River	EL.gw	Initial Groundwater Elev.	m
	EL.riv	Initial river water Elev	m
	River bed thickness	River bed thickness	m
	Krvbed	Θs of river bed	mm/s
Aquifer	Ariv	Area of river bed	km ² , m ²
	S	Storage coefficient	-
	Top	Aquifer top Elev.	m
	Bot	Aquifer Bottom Elev.	m
	GW pump_rate	GW pumping intake	m ³ /day
	leakage_rate	GW pumping leakage	-

수와 불포화투수계수의 비율을 나타내는 무차원의 값이다. Green&Ampt 방법은 토양의 물리적 특성값을 사용하여 침투량을 산정하는 방법이며, 토양의 초기수분율(theta_per), 연직방향 투수계수(Ks_per), 모세관흡인수두(PSI)가 사용된다[21].

Horton 방법은 경험적인 공식을 사용하여 시간에 대한 함수로 침투량을 산정하며 토양의 감쇄상수(k), 초기 침투능(f_o), 종기 침투능 (f_c)이 사용된다[22].

2.4 CAT-PEST

CAT은 물리적 기반의 모형 특성상 많은 입력 매개변수가 사용되므로 이를 수동 보정할 경우 매개변수의 불확실성이 커지며 물리적으로 타당한 범위 내에서 추정

어렵다. 따라서 자동 보정기법인 PEST를 이용해 최적화를 수행하였다. PEST는 매개변수를 보정하는 과정에서 생길 수 있는 불확실성을 최소화 하며 소요시간을 단축시킬 수 있다. 또한 매개변수 추정이 물리적으로 타당한 범위 내에서 가능하다[10].

PEST를 구동하기 위해서는 TPL(Template), INS(Instruction), PST(PEST control)파일이 필요하다. TPL파일은 모형의 매개변수에 대한 정보가 담긴 파일이다. TPL파일은 CAT의 입력정보를 시스템 외부로 내보낸 후, 저장하는 방식으로 생성한다. INS파일은 CAT에서 계산된 모의유출량을 시계열로 저장한 파일이다. PST파일은 PEST를 제어하는 파일이며 매개변수에 대한 정보 및 추정범위를 제공한다. 이러한 3개의 파일을

이용하여 명령 프롬프트에서 PEST를 실행시키면 CAT에서 계산된 모의 유출량과 관측 유출량의 오차가 계산된다. 이후 매개변수 추정범위 내에서 반복계산을 통해 최적화가 수행된다(Fig. 4).

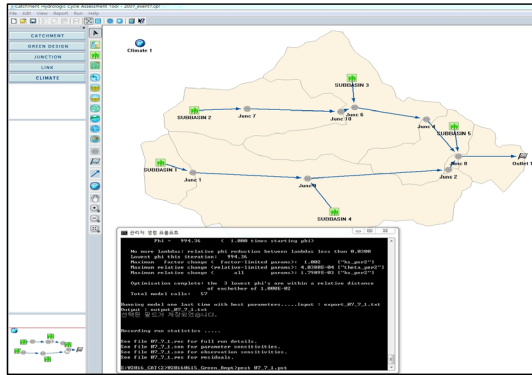


Fig. 4. CAT-PEST system

3. 모형 적용 결과

3.1 HEC-HMS 유출 결과 분석

Fig. 5는 최종 출구점인 매송교 지점에서의 유출량을 비교한 유출수문곡선이다. 침투유량은 Event 1, 2, 3, 5의 경우 4.4 ~ 10.4%의 편차를 보이며 과대 추정되었으며, Event 6은 -8.8%가량 과소 추정되었다. Event 4의 침투유량은 관측값과 일치하였다. 침투시간은 Event 1, 2, 6의 경우 관측값과 일치하였으며, Event 3, 5는 1시간, Event 4는 2시간이 관측치보다 느린 것으로 나타났다. 유출용적에 대해 Event 3은 17.32mm, Event 6은 7.30mm가량 과소 추정되었으며, 나머지 4개 강우사상은 0.2 ~ 69.2mm의 범위 내에서 과대추정되었다. Event 1, 3, 6의 경우 유출량에 대한 R^2 이 0.9 이상이며, NSE가 0.8 이상으로 높은 모형 효율을 보였다(Table 4).

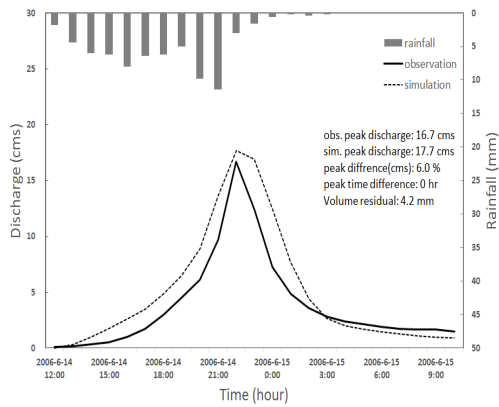
Event 2, 3은 누적강우량 200mm 이상의 홍수 사상이지만 선행 5일 강우량에 따라 Event 2는 AMC III, Event 3은 AMC II에 해당한다. Event 2의 경우 선행 강우로 인해 토양이 이미 포화된 상태에서 강우가 지속적으로 발생한 강우사상이다. Fig. 5(b)에서 알 수 있듯이, 모의에서 토양의 초기조건을 잘 모의하였으나, 지속된 강우로 인해 하강부 곡선에서 과대추정되었다. Event 3은 5일 선행 강우량이 45mm로 토양이 완전히

포화되어있지 않은 상태이지만 침투 이전에 지속적으로 많은 양의 강우가 내렸다. 침투 유량 및 수문곡선의 형태는 관측값과 유사하게 모의되었으나 하강부 곡선이 과소 추정되는 경향을 보였다. 따라서 홍수 사상의 경우 많은 양의 강우로 인해 전체적인 수문곡선의 양상이 관측 수문곡선과 유사하게 모의되지만, 하강부 곡선의 경우 초기 토양 함수 조건의 영향이 큰 것으로 판단된다.

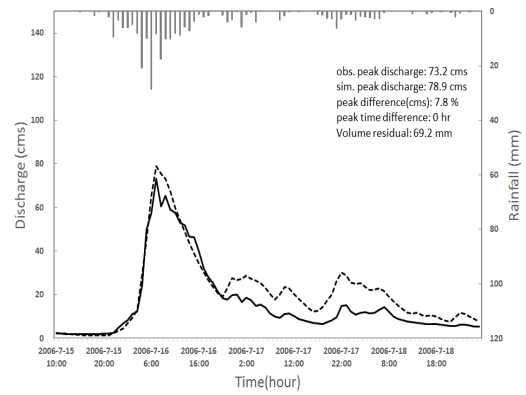
Event 4는 AMC I 조건이며, 총강우량 또한 작아 침투유량이 다른 강우사상에 비해 낮게 나타났다. CN 보정을 통해 관측치와 비교한 결과 모의침투시간이 11시간 가량 늦게 나타났다. 이후 저류상수를 조절하여 모의 침투시간을 2시간 이내로 보정하였다. Event 4(Fig. 5(d))에서 보는 바와 같이 침투유량이 작은 경우에는 강우량에 대한 유역의 유출특성이 매개변수의 작은 변화에도 매우 민감하게 반응함을 알 수 있었다. 따라서 매개변수 보정 시 주의가 요구되는 부분이다.

Event 5는 2007년 8월 8일 8시에 최대강우강도인 22.6mm/hr의 강우가 발생한 후 관측 침투시간은 이로부터 2시간 후, 모의 침투시간은 3시간 후에 발생하였다. 다른 강우 사상들의 경우 최대 강우 이전의 누적 강우량이 모두 20mm 이상이었지만 Event 5의 경우 최대 강우 발생 이전의 누적 강우량이 7.5mm이다. AMC III조건이지만 침투 이전 누적 강우량의 영향으로 모의 유출 응답 시간이 느리게 나타난 것으로 보인다.

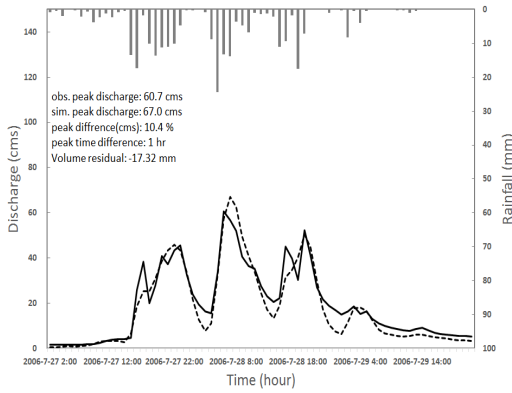
Event 6은 침투시간 및 침투유량은 유사하게 모의되었지만 침투 이전의 강우로 인한 유출량은 과소 추정되었다. AMC I 조건이지만 누적 강우량이 108.8mm이므로 침투 이전의 유출은 제대로 모의되지 않았으나 지속된 강우로 인해 침투유량 및 침투시간은 관측값에 근접하게 모의된 것으로 보인다. HEC-HMS의 SCS-CN방법을 적용하여 모의를 수행할 경우 수문곡선은 CN에 가장 민감하게 반응한다. CN은 선행토양함수조건, 토양의 종류 및 토지이용상태에 따라 결정된다. 따라서 침투 이전의 누적 강우량이 많은 경우에는 침투 유량 및 침투시간이 관측값에 근접하지만, 침투 이전의 누적 강우량이 적거나 AMC I 조건의 경우에는 초기 유출량, 침투시간 및 침투유량을 제대로 모의하지 못하는 등 강우특성과 유출간의 관계를 반영하는 데에 한계가 있는 것으로 판단된다.



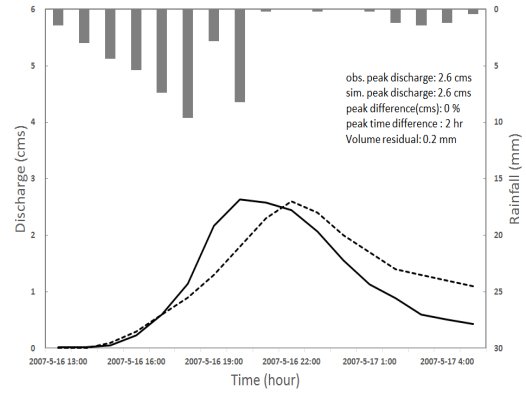
(a) Event 1



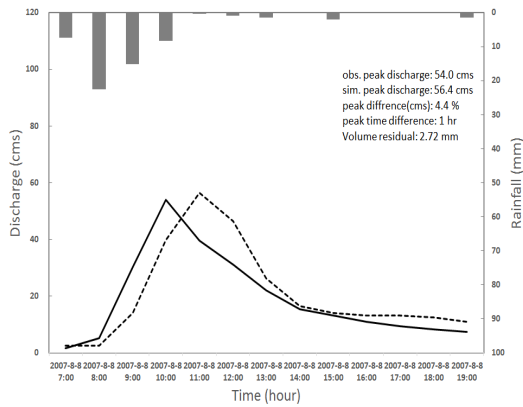
(b) Event 2



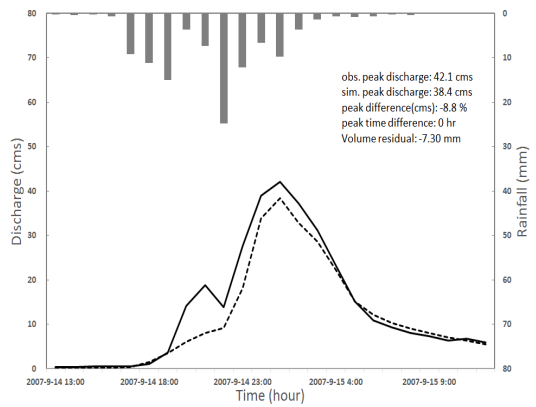
(c) Event 3



(d) Event 4



(e) Event 5



(f) Event 6

Fig. 5. Comparison of the observation and simulation hydrographs using HEC-HMS (Maesong Br.)

Table 4. Statistical assessments of HEC-HMS

Event no.	HEC-HMS		
	R^2	RMSE (m^3/s)	NSE
Event 1	0.9315	2.0	0.750
Event 2	0.9051	7.3	0.812
Event 3	0.9409	4.2	0.928
Event 4	0.7394	0.4	0.785
Event 5	0.6996	9.1	0.628
Event 6	0.9409	3.9	0.910

3.2 CAT-PEST 모형

3.2.1 CAT 모형 매개변수 민감도 분석

CAT에서는 3가지 침투 해석 방법이 제공되며, 침투 해석 방법별로 토양 관련 매개변수들의 특성에 따라 유출 거동이 다를 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 침투 해석 방법별 토양 관련 주요 매개변수들을 대상으로 민감도 분석을 실시하였다. 민감도 분석을 실시한 매개변수는 Rainfall excess 방법의 경우 초기 토양수분율, 연직방향 투수계수, 사면방향 투수계수, Green & Ampt 방법의 경우 토양의 초기 수분율, 연직방향 투수계수, 모세관흡인수두, Horton 방법의 경우 토양의 초기 침투능,

중기 침투능으로 총 8개이다(Table 3). 매개변수 초기값을 등간격으로 변화시켜 침투유량, 침투시간, 유출용적의 변화양상을 살펴보았다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 Rainfall excess 방법 적용 시 침투유량에 대해 토양의 초기 수분율의 변동폭이 -30 ~ 64 %로 가장 민감하였다. 침투시간에 대해서는 3개 매개변수의 변동폭이 유사하였으며(토양수분율은 -4 ~ 0 %, 연직방향 투수계수는 0 ~ 3 %, 사면방향 투수계수는 -4 ~ 3 %), 강우사상별 편차는 크지 않았다. 유출용적에 대해 사면방향 투수계수의 변동폭이 -103 ~ 28 %로 가장 민감하였다.

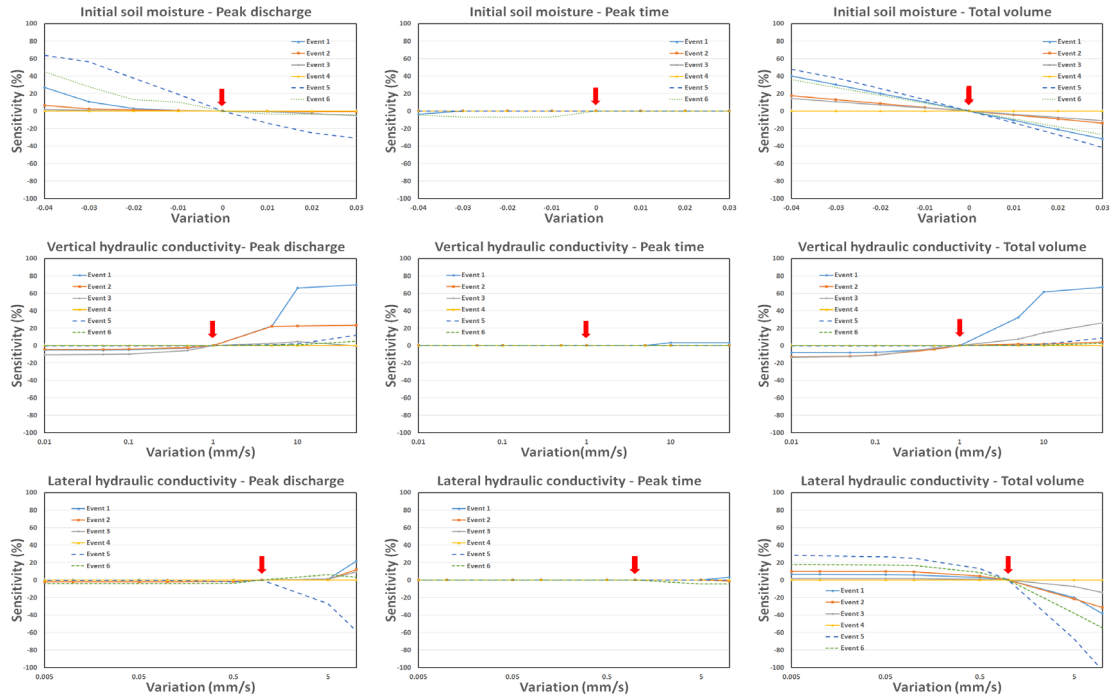


Fig. 6. Results of parameter sensitivity analysis (Rainfall excess)

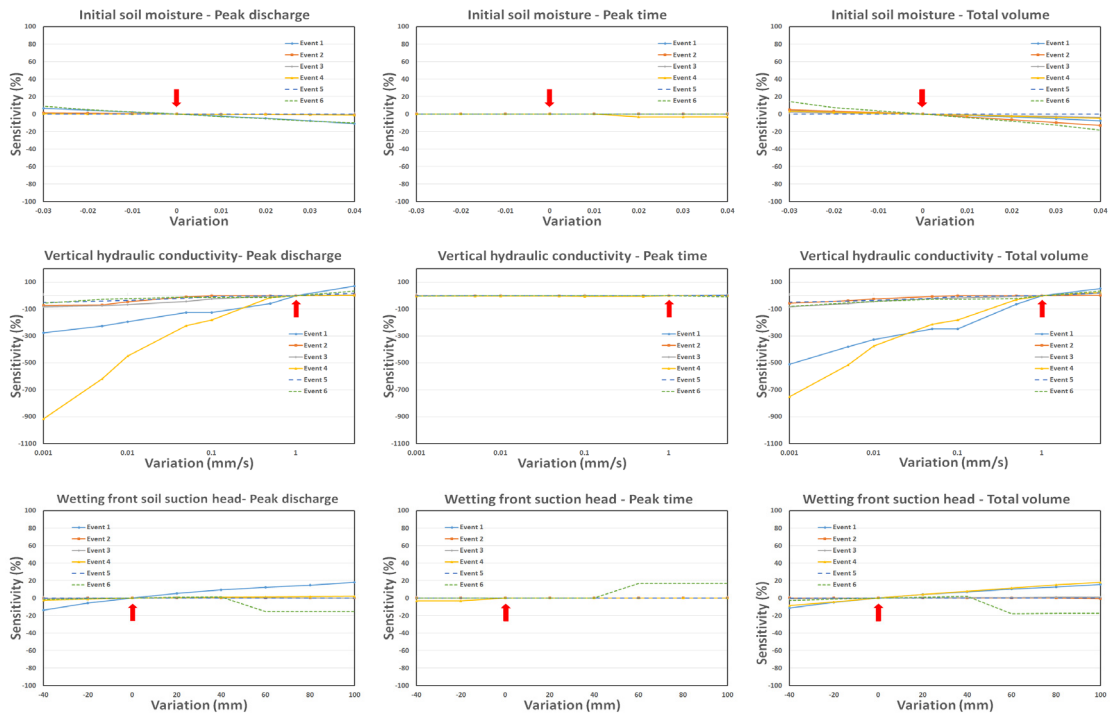


Fig. 7. Results of parameter sensitivity analysis (Green&Ampt)

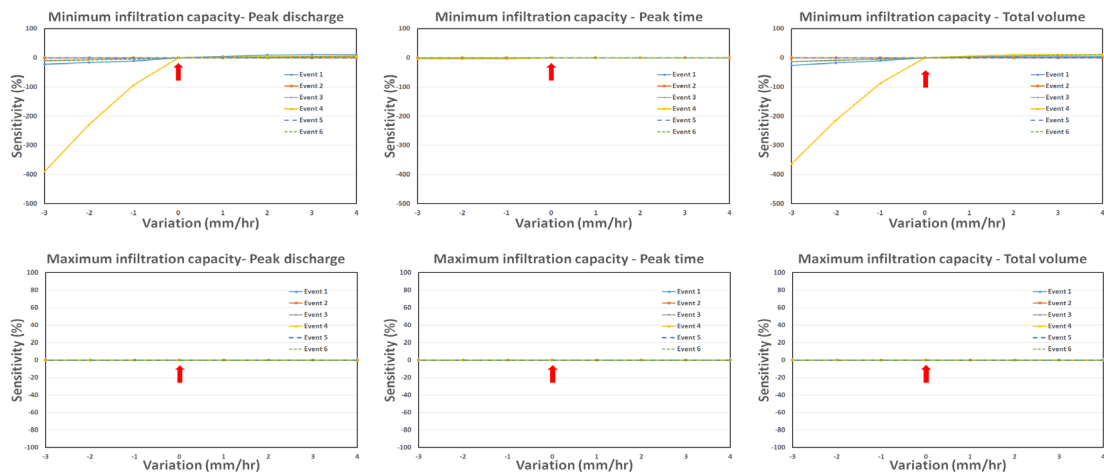


Fig. 8. Results of parameter sensitivity analysis (Horton)

Fig. 7은 Green&Ampt 방법 적용 시 3개 매개변수에 대한 민감도 분석 결과이다. 침투유량에 대해 연직방향 투수계수의 변동폭이 -916 ~ 70 %로 가장 민감하였다. 침투시간에 대하여 모세관 흡인수두의 변동폭이 -3 ~ 17 %로 가장 민감하였다. 유출용적에 대해서는 연직방향

투수계수의 변동폭이 -751 ~ 52 %로 가장 민감하였다.

Fig. 8은 Horton 방법 적용 시 2개 매개변수에 대한 민감도 분석 결과이다. 침투유량에 대한 종기 침투능의 변동폭은 -390 ~ 6 %, 침투시간 에 대해 -3 ~ 0 %, 유출용적에 대해서는 -364 ~ 11 %범위 내로 변화하여

초기 침투능보다 유출특성에 민감한 것으로 나타났다. 따라서 유출모의 시 최적화를 수행할 경우 침투 해석 방법별로 토양 관련 매개변수들의 특성을 고려할 필요가 있다.

3.2.2 CAT-PEST모형 매개변수 최적화 결과 분석

PEST를 이용하여 최적화 수행 시 침투 해석 방법별 매개변수의 종류와 추정범위는 Table 5와 같다.

Table 5. A range of rainfall-runoff parameters

Infiltration method	Parameters	Estimation range
Rainfall excess	theta_per	0.045 ~ 0.460
	ks_per (mm/s)	1.00E-06 ~ 7.00E-02
	ksi_per (mm/s)	1.00E-05 ~ 7.00E-02
Green&Ampt	theta_per	0.045 ~ 0.460
	ks_per (mm/s)	1.00E-06 ~ 7.00E-02
	PSI (mm)	49.5 ~ 316.3
Horton	f_c (mm/hr)	3.8 ~ 11.4
	f_o (mm/hr)	59.3 ~ 152.4

Table 6는 PEST를 이용하여 매개변수를 최적화한 결과이다. Rainfall excess 방법의 토양의 초기 수분율은 0.045 ~ 0.459, Green&Ampt 방법에서 사용되는 토양의 초기 수분율은 0.045 ~ 0.400의 범위로 나타났다. Rainfall excess 방법의 연직방향 투수계수는 1.00E-06 ~ 7.89E-03 mm/s, Green&Ampt 방법의 연직방향 투수계수는 5.00E-05 ~ 7.00E-02 mm/s, 사면방향 투수계수는 8.03E-05 ~ 5.69E-02 mm/s, 모세관 흡인수두는 100.0 ~ 238.8 mm, Horton 방법의 중기 침투능은 3.8 ~ 11.4 mm/hr, 초기 침투능은 85.2 ~ 152.3 mm/hr의 범위로 나타났다.

Rainfall excess 방법과 Green&Ampt 방법은 초기 토양 수분율과 연직방향 투수계수가 공통적으로 사용된다. 강우사상에 따라 Rainfall excess에서 사용되는 토양의 초기 수분율의 편차가 더 큰 특징을 보였으며, Green&Ampt 방법에서 사용되는 연직방향 투수계수가 Rainfall excess 방법의 연직방향 투수계수보다 더 큰 편차를 보였다. 이는 Rainfall excess 방법에서는 토양의 초기 수분율이 침투유량에 민감하게 반응하며 Green&Ampt 방법에서는 침투유량 및 유출용적에 대해 연직방향 투수계수가 민감하게 반응한다는 민감도 분석

결과와 같은 양상을 보여준다. 또한 사질토가 포함된 금토천 유역(SUBBASIN 2, 3)의 경우 다른 소유역에 비해 연직방향 투수계수가 큰 값으로 수렴하였다. 대부분의 토양이 식양질토로 이루어진 SUBBASIN 1의 경우 연직방향, 사면방향 투수계수가 다른 소유역에 비해 대체로 작은 값으로 최적화가 이루어졌다. Horton 방법 적용 시, 사질토가 포함된 SUBBASIN 2, 3가 가장 큰 침투능을 가지며 불투수 면적 비율이 가장 높은 SUBBASIN 5의 침투능은 최적화 결과 가장 작은 값으로 수렴하는 것으로 나타났다.

3.2.3 CAT-PEST모형 유출 결과 분석

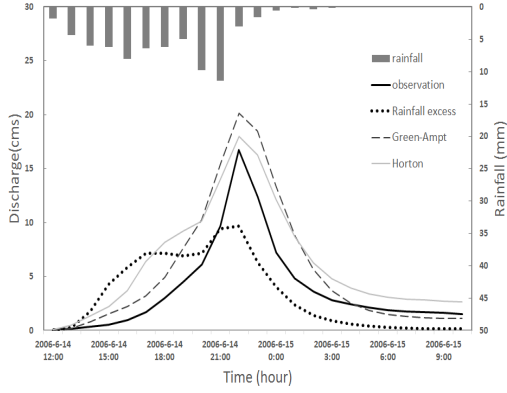
통계적 평가수단은 R^2 , RMSE, NSE를 사용하였으며, 최종 출구점에서의 유출량을 비교하였다(Table 7). Event 4, 5는 세 가지 침투 해석 방법 모두 침투유량, 침투시간, 유출용적이 관측값과 유사하게 모의되어 R^2 , NSE가 모두 0.8 이상이었다(Table 7, Fig. 9). Event 4의 경우 AMC I 조건이며 누적강우량, 관측유출량이 매우 작고 유출을 또한 매우 낮다. 이러한 경우 3가지 침투 해석 방법 모두 초기 토양 수분율의 최적화값이 추정 범위 내 최소값으로, 침투능은 최대값으로 수렴하여 유출 수문곡선 상에서 침투 해석 방법별로 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

Event 1은 3가지 침투 해석 방법의 모의 결과 모두 침투 이전의 유출용적이 과대 산정되는 경향을 보였다. Green&Ampt 방법과 Horton 방법의 경우 유출용적이 과대 산정되었지만 수문곡선의 형태가 관측 수문곡선과 유사하였다. 3가지 침투해석 방법 모두 상승부 곡선의 유출용적오차로 인해 NSE 0.6 미만의 낮은 모형 효율을 보였다.

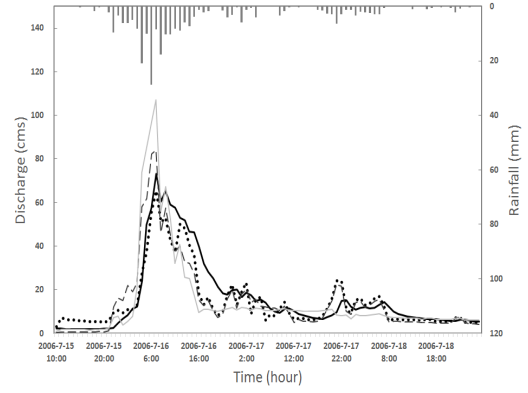
Rainfall excess 방법을 적용할 경우 대체적으로 모의 유출수문곡선이 관측 수문곡선과 유사한 양상을 보였다. 3가지 침투 해석 방법 중 모의 침투유량이 가장 과소 산정되는 특징을 보였으며, 대부분의 강우사상에서 초기 유출량이 과대 산정되는 경향을 보였다. Event 1의 경우 강우 초기의 유출량이 과대 산정되었으며, 모의 침투시간이 관측 침투시간과 일치하였지만 침투유량에서 오차가 크게 발생하였다. Event 1의 강우는 일정한 강우 강도가 지속적으로 발생하는 특징을 보인다. 이러한 경우 Rainfall excess의 수문곡선은 초기 유출량이 과대산정되지만 강우강도의 크기에 큰 변화가 없어 수문곡선의

Table 6. Optimized results using 3 types of infiltration methods

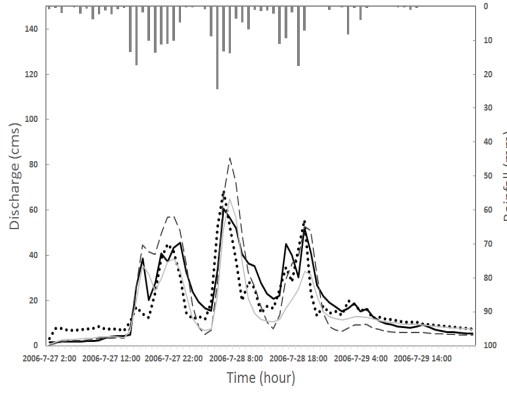
			Event 1	Event 2	Event 3	Event 4	Event 5	Event 6
Rainfall excess	theta_per	SUB.1	0.136	0.455	0.393	0.048	0.378	0.048
		SUB.2	0.247	0.459	0.202	0.062	0.362	0.063
		SUB.3	0.306	0.446	0.374	0.045	0.456	0.045
		SUB.4	0.213	0.372	0.447	0.053	0.448	0.449
		SUB.5	0.460	0.402	0.419	0.050	0.450	0.449
	Ks_per	SUB.1	9.39E-06	2.44E-06	1.92E-05	9.39E-06	3.90E-05	2.76E-06
		SUB.2	5.10E-05	1.00E-06	5.00E-05	5.00E-05	5.00E-04	5.00E-05
		SUB.3	1.50E-04	1.03E-06	1.45E-05	5.00E-05	7.00E-03	3.00E-04
		SUB.4	1.50E-04	1.00E-06	3.00E-06	1.60E-06	7.89E-03	1.00E-06
		SUB.5	5.00E-05	2.62E-06	1.10E-06	5.00E-05	4.05E-03	3.20E-06
	Ksi_per	SUB.1	4.80E-03	1.23E-04	7.00E-03	1.61E-04	4.59E-04	8.03E-05
		SUB.2	4.47E-04	1.68E-03	1.14E-03	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04
		SUB.3	7.36E-04	7.00E-03	7.00E-03	5.00E-04	7.00E-03	5.69E-02
		SUB.4	5.00E-04	6.48E-04	4.96E-03	5.15E-03	7.89E-03	6.56E-03
		SUB.5	3.90E-04	3.26E-04	9.41E-04	5.00E-04	4.05E-03	7.45E-05
Green& Ampt	theta_per	SUB.1	0.138	0.255	0.164	0.048	0.290	0.050
		SUB.2	0.305	0.270	0.285	0.062	0.310	0.063
		SUB.3	0.349	0.275	0.309	0.045	0.324	0.045
		SUB.4	0.278	0.280	0.293	0.053	0.330	0.060
		SUB.5	0.371	0.350	0.335	0.050	0.400	0.050
	Ks_per	SUB.1	1.40E-04	1.00E-03	6.79E-05	1.71E-03	5.00E-05	5.08E-04
		SUB.2	7.00E-02	1.35E-02	2.10E-03	4.36E-02	2.63E-03	7.00E-03
		SUB.3	7.00E-02	6.26E-03	1.00E-03	7.00E-02	1.60E-03	7.00E-03
		SUB.4	7.21E-04	1.00E-04	7.00E-04	7.00E-03	7.83E-04	1.93E-04
		SUB.5	1.80E-03	1.00E-04	5.01E-04	8.84E-03	7.86E-04	1.67E-04
	PSI	SUB.1	123.1	238.8	238.8	238.8	238.8	238.8
		SUB.2	126.5	126.5	126.5	126.5	126.5	126.5
		SUB.3	152.8	151.7	105.2	152.8	152.8	152.8
		SUB.4	223.4	100.0	184.8	184.8	184.8	184.8
		SUB.5	147.4	100.0	109.4	109.4	125.4	117.5
Horton	f_c	SUB.1	4.4	3.8	5.6	10.4	5.6	6.6
		SUB.2	11.4	3.8	7.1	10.4	9.6	8.6
		SUB.3	8.2	3.8	6.9	10.4	9.4	8.6
		SUB.4	4.4	3.8	5.6	10.4	5.6	5.6
		SUB.5	3.8	3.8	5.6	10.4	5.6	3.8
	f_o	SUB.1	102.8	85.2	85.2	136.4	85.2	110.4
		SUB.2	152.3	85.2	112.9	136.4	106.9	110.5
		SUB.3	103.0	85.2	90.0	136.4	108.6	110.5
		SUB.4	102.8	85.2	85.2	136.4	85.2	110.4
		SUB.5	96.5	85.2	85.2	136.4	85.2	108.4



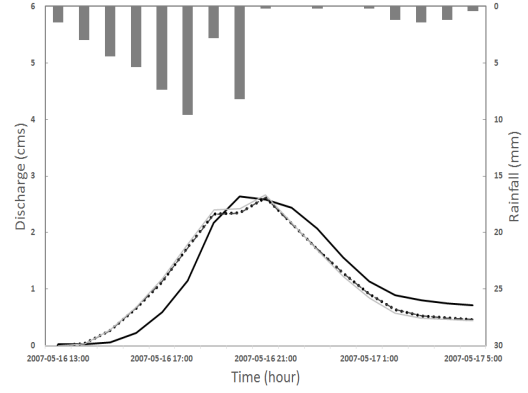
(a) Event 1



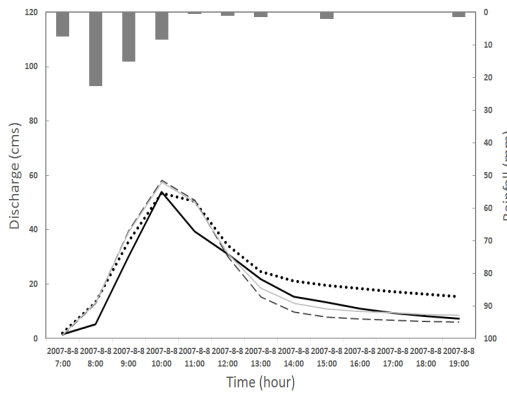
(b) Event 2



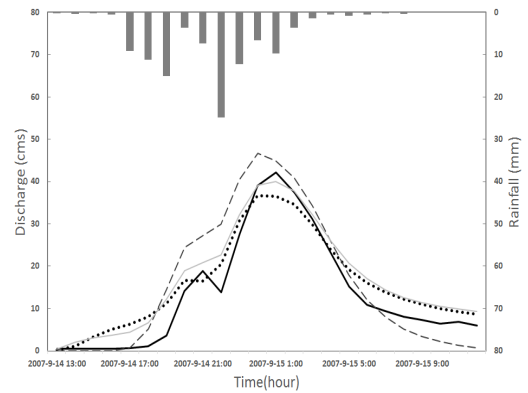
(c) Event 3



(d) Event 4



(e) Event 5



(f) Event 6

Fig. 9. Comparison of the observation and simulation hydrographs using CAT-PEST (Maesong Br.)

Table 7. A comparison through statistical assessment (CAT-PEST)

	CAT-PEST								
	Rainfall excess			Green&Ampt			Horton		
	R^2	RMSE (m^3/s)	NSE	R^2	RMSE (m^3/s)	NSE	R^2	RMSE (m^3/s)	NSE
Event 1	0.4538	0.6	0.422	0.9441	0.6	0.538	0.9086	0.6	0.494
Event 2	0.8726	0.7	0.849	0.7436	0.9	0.721	0.6625	1.2	0.514
Event 3	0.7505	1.0	0.743	0.8563	1.0	0.726	0.8005	1.0	0.734
Event 4	0.8832	0.1	0.882	0.8832	0.1	0.882	0.8631	1.0	0.860
Event 5	0.9537	1.8	0.808	0.9205	1.6	0.850	0.9349	1.1	0.931
Event 6	0.9534	0.8	0.900	0.8930	1.3	0.767	0.9649	0.9	0.889

기울기가 완만하게 나타났다. Event 5의 경우 AMC III에 해당하며 초기 유출량 및 하강부 곡선에서 과대 산정되는 특징을 보였다. 이는 강우의 특성보다 토양의 초기 조건의 영향이 크게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

Green&Ampt 방법은 다양한 선행토양함수조건에서 침투 유량이 모두 과대 산정되며 하강부 곡선은 과소 산정되는 경향을 보였다. Green&Ampt 방법을 적용할 경우 강우 발생에 따라 유출량이 급격하게 증가하기 시작하며 강우가 종료되는 시점부터 유출량이 빠르게 감소하는 형태를 보였다. 이는 초기의 토양조건보다는 강우 특성에 대해 민감하게 반응하기 때문인 것으로 보인다.

Horton 방법은 대부분의 강우사상에서 모의 유출 수문곡선이 Rainfall excess 방법과 Green&Ampt 방법의 중간 형태를 보인다. 하지만 토양이 완전히 포화되어있는 상태에서 침투 이전 44.4mm의 누적 강우가 발생한 Event 2의 경우 침투유량이 다른 침투 해석 방법보다 침투유량오차가 크게 나타났다. 또한 침투 이후 작은 강도의 강우가 지속되지만 하강부 곡선에서는 이러한 강우로 인한 유출량의 변화가 나타나지 않고 일정한 유출량이 지속되는 것으로 나타났다. 반면에 동일한 AMC III조건에 해당하는 Event 5의 경우 침투 이전의 누적 강우량이 7.5mm이므로 침투유량은 Green&Ampt와 비슷한 수준으로 모의되는 것을 알 수 있었다. 따라서 Horton방법의 경우 토양이 이미 포화되어 있는 상태에서 침투 이전 누적 강우량이 많이 발생한 경우에는 침투 유량이 매우 과대 산정되는 등 강우특성에 민감하게 반응하므로 모의 수행 시 주의가 요구된다.

3.3 HEC-HMS와 CAT-PEST 유출 결과 비교

Fig. 10은 유역의 최종 출구점인 매송교 지점에서 HEC-HMS와 CAT-PEST의 모의 결과를 비교한 유출수

문곡선이다.

Event 1은 HEC-HMS와 Green&Ampt, Horton방법에서 유출 수문곡선의 형태가 유사하게 나타났고 Rainfall excess 방법의 초기 유출량은 과대 산정되었으며 침투유량은 과소 추정되는 결과를 보였다.

Event 2, 3는 HEC-HMS와 Rainfall excess방법이 관측 유출 수문곡선과 유사한 양상을 보였고 Event 2에서는 Horton방법이, Event 3에서는 Green&Ampt방법의 침투유량이 과대 산정되었다.

Event 4, 5는 CAT-PEST의 3가지 침투 해석 방법의 유출 수문곡선이 매우 유사하였고 HEC-HMS의 모의 침투시간이 관측 침투시간보다 느리게 나타났다.

Event 6의 경우 Green&Ampt를 제외한 HEC-HMS, Rainfall excess, Horton방법의 모의 침투유량이 관측값에 근접하였다. CAT-PEST의 3가지 침투 해석 방법은 모두 초기 유출량이 과대 산정되는 공통점을 보였으나, HEC-HMS의 모의 유출량은 초기 유출량이 과소 산정되는 특징을 보였다.

6개의 강우사상을 대상으로 각 침투 해석 방법별 유출 수문곡선을 비교한 결과, HEC-HMS 모형에서 SCS-CN방법을 적용할 경우 선행토양함수조건이 매우 중요한 인자이며 CN산정에 큰 영향을 미치므로 전체적인 수문곡선의 형태가 선행 강우량 및 토양의 초기조건에 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. 반면에 CAT-PEST의 경우 3가지 침투 해석 방법들은 선행 강우량 및 선행 토양함수조건은 유출 초기에 큰 영향을 미치게 된다. 유출특성에 대해 강우특성의 영향이 클 경우 토양 관련 매개변수는 물론 모형 내 입력된 유역경사를 비롯한 다른 물리적인 매개변수들의 상호작용으로 인해 실제 유출거동과 유사하게 모의가 가능할 것으로 판단된다.

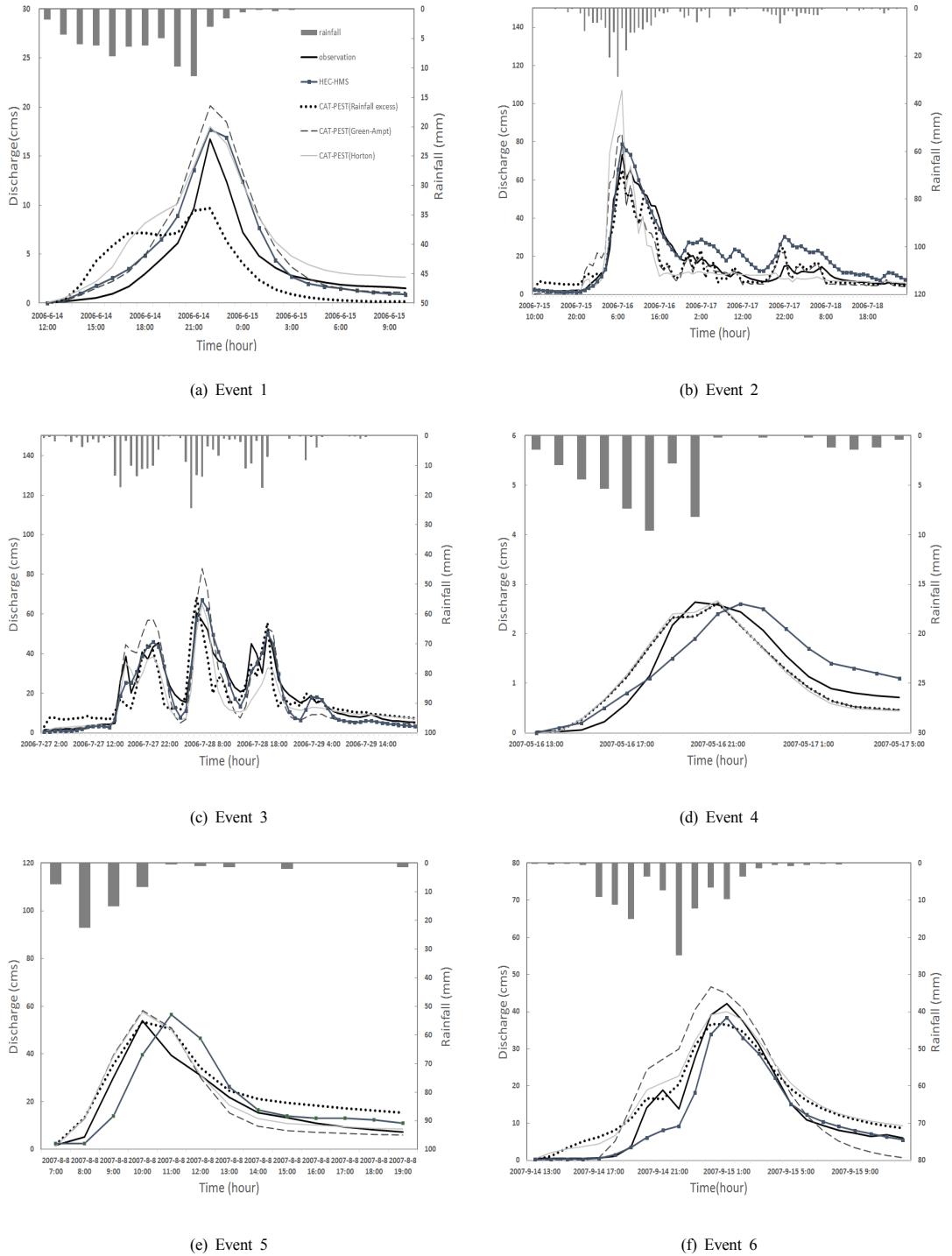


Fig. 10. Comparison of simulation results of HEC-HMS and CAT-PEST (Maesong Br.)

4. 결론

본 연구에서는 판교 시험유역을 대상으로 CAT-PEST 연계모형의 침투 해석 방법에 따른 단기유출 특성을 비교하였으며 이를 위해 HEC-HMS를 비교 모델로 설정하여 유출 결과를 비교 분석하였다. CAT에서 유출특성에 민감하게 반응하는 토양 관련 매개변수를 대상으로 민감도 분석을 실시하였으며, 유출 모의 시 매개변수들은 PEST기법을 적용하여 최적화를 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 대상 모의기간에 대해 HEC-HMS의 모형 적용 결과 R^2 은 0.7394 ~ 0.9409, RMSE는 0.4 ~ 7.3 m^3/s , NSE는 0.628 ~ 0.928였으며, CAT-PEST의 경우 R^2 은 0.4538 ~ 0.9537, RMSE는 0.1 ~ 1.6 m^3/s , NSE는 0.422 ~ 0.931였다.
2. CAT-PEST의 매개변수 민감도 분석 결과, 침투유량에 대해 Rainfall excess 방법의 초기 토양 수분율(θ_{per}), Green&Ampt 방법의 연직방향 투수계수(K_{s_per}), Horton 방법의 종기 침투능(f_c)이 가장 민감한 매개변수로 나타났다. 침투시간에 대해서는 Green&Ampt 방법의 모세관 흡인수두(ψ_i), Horton 방법의 종기 침투능(f_c)이 가장 민감하였다. 유출용적에 대해서는 Rainfall excess 방법의 사면방향 투수계수(K_{si_per}), Green&Ampt 방법의 연직방향 투수계수(K_{s_per}), Horton 방법의 종기 침투능(f_c)이 가장 민감한 매개변수로 나타났다. 따라서 최적화 수행 시 이러한 매개변수들의 특성을 고려하는 등의 주의가 요구된다.
3. 유출특성이 선행토양함수조건에 민감하게 반응하는 강우사상에 대해서는 HEC-HMS의 SCS-CN방법이 관측 유출량과 근접하게 모의되었다. 반면에 토양의 초기 포화도보다 강우특성의 영향이 더 큰 강우사상에 대해서는 모의 정확도에 한계를 보였다. CAT-PEST에서는 토양관련 매개변수 이외에 다른 물리적인 매개변수들이 입력자료로 사용되므로 다양한 유출특성을 가진 강우사상에 대해 정밀한 유출 모의가 가능할 것으로 보인다.

판교 시험유역은 2004년부터 2009년까지 관측이 이루어졌다. 비교적 관측기간이 짧아 6개의 강우사상만을

검토하였다. 유역 특성을 고려한 정밀한 홍수 유출모의를 위해서는 선행강우, 토양 수분 등과 관련된 매개변수들의 상호작용이 매우 중요한 것을 확인할 수 있었다. 향후 다양한 유역에 대한 여러 강우 사상의 분석을 통해 침투 해석 방법별 최적 매개변수의 일반화가 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] S. H. Kim, M. J. Park, S. M. Kang, S. J. Kim, "Modeling Rainfall-Runoff Simulation System of JinWie Watershed using GIS based HEC-HMS Model", *Journal of Geographic Information Studies*, Korean Association of Geographic Information Studies, vol. 9, no. 4, pp.119-128, 2006.
- [2] J. H. Lee, S. H. Yoon, "Runoff characteristics by urbanization in the Mushim stream watershed using HEC-HMS", *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, KSAE, vol. 46, no. 3, pp. 43-54, 2004. DOI: <https://doi.org/10.5389/KSAE.2004.46.3.043>
- [3] H. J. Kim, C. H. Jang, S. J. Noh, "Development and application of the catchment hydrologic cycle assessment tool considering urbanization (I) -model development-", *Journal of Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 203-215, 2012.
- [4] C. H. Jang, H. J. Kim, J. T. Kim, "Prediction of reservoir water level using CAT", *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, KSAE, vol. 54, no. 1, pp. 27-38, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5389/KSAE.2012.54.1.027>
- [5] S. H. Lee, H. J. Cho, "Analysis of water cycle at main streams in Ulsan using CAT model", *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, vol. 47, no. 1, pp. 1-10, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2014.47.1.1>
- [6] C. S. Yoo, J. W. Shin, "Decision of storage coefficient and concentration time of observed basin using Nash -model's structure", *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, vol. 47, no. 1, pp. 1-10, 2010. DOI: <https://doi.org/10.3741/jkwra.2010.43.6.559>
- [7] G. H. Yoon, M. K. Park, B. M. Choi, Y. J. Kim, "Study on parameter optimization in Daegok & Sayun dam basins using HEC-HMS", *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 1103-1107, 2009.
- [8] J. Doherty, "Ground water model calibration using pilot points and regularization", *Ground Water*, vol. 41, no. 2, pp. 170-177, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2003.tb02580.x>
- [9] J. Doherty, *PEST: Model-Independent Parameter Estimation*, pp.2-1-13-14, Watermark Numerical Computing, 2009.
- [10] S. J. Noh, Y. S. Choi, C. K. Choi, K. T. Kim, "Parameter estimation of a distributed hydrologic model using parallel PEST: comparison of impacts by radar and

ground rainfall estimates”, *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, vol. 46, no. 11, pp. 1041-1052, 2013.

DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWR.2013.46.11.1041>

- [11] J. H. Jeon, D. H. Choi, K. J. Lim, T. D. Kim, “Automatic calibration of stream flow and nutrients loads using HSPF-PEST at the Bochung a watershed”, *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, KSAE, vol. 52, no. 5, pp. 77-86, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.5389/KSAE.2010.52.5.077>
- [12] Y. G. Lee, *Runoff analysis of Osu stream basin connecting SWAT and HEC-HMS*, pp. 10-84, Master dissertation, Inha University, 2011.
- [13] J. H. Park, B. S. Kang, “Comparison of runoff analysis between GIS-based distributed model and lumped model for flood forest of dam watershed”, *Journal of Geographic Information Studies*, Korean Association of Geographic Information Studies, vol. 9, no. 3, pp.171-182, 2006.
- [14] S. C. Shin, T. K. Yim, Y. J. Moon, Y. S. Yoon, “Analysis of flood discharge in urban area”, *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 356-360, 2007.
- [15] Gyeonggi Province, Seongnam city, Korea Land & Housing corporation, *Seongnam-Pangyo Urban Planning disaster impact report : Final report*, pp. 5-3 - 6-48, Gyeonggi Province, Seongnam city, Korea Land & Housing corporation, 2005.
- [16] Hydrologic Engineering Center, *Hydrologic Modeling System HEC-HMS*, pp. 1-426, Hydrologic U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA, 2013.
- [17] Korea Institute of Construction Technology, *Development of Watershed Assessment Techniques for Healthy Water Cycle*, KICT, pp. 147-197, 2006.
- [18] Korea Institute of Construction Technology, *Development of Watershed Assessment Techniques for Healthy Water Cycle*, KICT, pp. 40-203, 2007.
- [19] H. H. Kwon, J. G. Kim, J. S. Lee, B. K. Na, “Uncertainty assessment of single event rainfall-runoff model using Bayesian model”, *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, vol. 45, no. 5, pp. 505-516, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWR.2012.45.5.505>
- [20] H. J. Kim, C. H. Jang, S. J. Noh, *User's Guideline for the Catchment Hydrologic Cycle Assessment Tool*, pp.1-73, Sustainable Water Resources Research Center, 2010.
- [21] W. H. Green, G. A. Ampt, “Studies of soil physics I-the flow of air and water through soils”, *Journal of Agriculture Science*, Cambridge University Press, vol. 4, no. 1, pp. 1-24, 1911.
- [22] R. E. Horton, *The role of infiltration in the hydrologic cycle*, pp. 446-460, American Geophysical Union, Transaction, 1933.

최 신 우(Shinwoo Choi)

[준회원]



- 2013년 8월 : 연세대학교 화학 및 의화학, 대기과학 (이학사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 과학기술연합대학원대학교(UST) 건설환경공학부 (석사과정)

<관심분야>

기후변화, 수문해석

장 철 희(Cheolhee Jang)

[정회원]



- 2002년 2월 : 건국대학교 지역건설 환경공학과 (공학석사)
- 2012년 8월 : 건국대학교 지역건설 환경공학과 (공학박사)
- 2002년 1월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수자원-하천연구소 수석연구원

<관심분야>

기후변화, 수자원평가, 수문해석, 수문모형 개발, LID(Low Impact Development)

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 건설환경공학부 교수

<관심분야>

기후변화, 수자원평가, 수문해석, 수문모형 개발