

병렬 PEST를 이용한 분포형 수문모형의 매개변수 추정: 레이더 및 지상 강우 자료 영향 비교

Parameter Estimation of a Distributed Hydrologic Model using Parallel PEST: Comparison of Impacts by Radar and Ground Rainfall Estimates

노성진* / 최윤석** / 최천규*** / 김경탁****

Noh, Seong Jin / Choi, Yun-Seok / Choi, Cheon-Kyu / Kim, Kyung-Tak

Abstract

In this study, we estimate parameters of a distributed hydrologic model, GRM (grid based rainfall-runoff model), using a model-independent parameter estimation tool, PEST. We implement auto calibration of model parameters such as initial soil moisture, multipliers of overland roughness and soil hydraulic conductivity in the Geumho River Catchment and the Gamcheon Catchment using radar rainfall estimates and ground-observed rainfall represented by Thiessen interpolation. Automatic calibration is performed by GRM-MP (multiple projects), a modified version of GRM without GUI (graphic user interface) implementation, and "Parallel PEST" to improve estimation efficiency. Although ground rainfall shows similar or higher cumulative amount compared to radar rainfall in the areal average, high spatial variation is found only in radar rainfall. In terms of accuracy of hydrologic simulations, radar rainfall is equivalent or superior to ground rainfall. In the case of radar rainfall, the estimated multiplier of soil hydraulic conductivity is lower than 1, which may be affected by high rainfall intensity of radar rainfall. Other parameters such as initial soil moisture and the multiplier of overland roughness do not show consistent trends in the calibration results. Overall, calibrated parameters show different patterns in radar and ground rainfall, which should be carefully considered in the rainfall-runoff modelling applications using radar rainfall.

Keywords : distributed hydrologic model, radar rainfall estimates, parallel PEST, parameter estimation, uncertainty assessment

요 지

본 연구에서는 범용 매개변수 최적화 모형인 PEST를 이용하여 분포형 수문모형인 GRM (grid based rainfall-runoff model) 모형의 매개변수 및 불확실성 범위를 추정하였다. 특히, 레이더 강우 및 지상 관측 강우를 각각 적용하여, 입력자료

* 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 수자원연구실 전임연구원 (e-mail: seongjin.noh@gmail.com, Tel: 031-955-0838)

Corresponding Author, Research Specialist, Water Resources Research Division, Water Resources and Environmental Research Department Korea Institute of Construction Technology, 411-712, Korea

** 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 수자원연구실 수석연구원 (e-mail: yschoi51@kict.re.kr)

Senior Researcher, Water Resources Research Division, Water Resources and Environmental Research Department Korea Institute of Construction Technology, 411-712, Korea

*** 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 수자원연구실 석사후연구원 (e-mail: ckchoi@kict.re.kr)

Post-master Researcher, Water Resources Research Division, Water Resources and Environmental Research Department Korea Institute of Construction Technology, 411-712, Korea

**** 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 수자원연구실 연구위원 (e-mail: ktkim1@kict.re.kr)

Research Fellow, Water Resources Research Division, Water Resources and Environmental Research Department Korea Institute of Construction Technology, 411-712, Korea

차이가 매개변수 추정에 미치는 영향을 분석하였다. 자동 보정 모형은 GUI (graphic user interface)에 대한 접근 없이 모형구동이 가능하도록 개선된 GRM-MP (multiple projects) 버전과 병렬 PEST 버전을 결합하여 매개변수 추정에 소요되는 시간을 단축시켰다. 이를 낙동강 수계 금호강 유역과 감천 유역에 대해 적용하여, 초기 포화도, 지표면 조도계수 및 토양 투수계수의 보정계수에 대해 매개변수 최적화 및 불확실성 추정을 수행하였다. 강우자료 분석 결과, 레이더와 지상 강우의 유역평균 누적시계열은 비슷하거나 지상 강우가 조금 큰 경향을 보였으나, 공간분포에 있어서는 지상 강우에 비해 레이더 강우에서 큰 변동성이 확인되었다. 보정된 수문모의 결과는 레이더 강우 적용 시, 지상 강우에 비해 비슷하거나 더 나은 정확도를 보였다. 추정된 매개변수는 레이더 강우 적용 시, 토양 투수계수의 보정계수가 일관되게 1보다 작은 경향을 보였으며, 이는 강우강도가 강한 격자가 상당수 존재하기 때문으로 판단되었다. 초기 포화도 및 지표면 조도계수의 보정계수는 레이더 및 지상 강우에서 일정한 경향성을 보이지 않았다. 본 연구의 대상 유역 및 호우사상에 대한 PEST의 최적화 모의 결과, 동일 유역 및 호우사상에 대해서도 강우 추정 방법에 따라 서로 다른 최적 매개변수 값을 갖는 것을 알 수 있었으며, 이는 향후 레이더 강우 자료의 수문 모의 활용 시 유의해야할 점으로 판단된다.

핵심용어 : 분포형 모형, 레이더 강우, 병렬 PEST, 매개변수 추정, 불확실성 분석

1. 서 론

수문모형은 유역의 각종 수문과정의 시공간적 변화를 수학적 함수관계로 표현하여 모의하는 응용도구이며, 장단기 갈수, 홍수 유출의 재현 및 예측에 광범위하게 사용된다. 공간적 해상도에 따라 집중형, 준분포형, 분포형 모형으로 나뉘며, 최근 레이더, 인공위성에 의한 고해상도 강우 추정 기술의 발달과 원격탐사 기술을 이용한 유역의 공간적 특성에 대한 매개변수 자료 축적, 컴퓨팅 능력의 향상에 따라 분포형 모형의 활용이 확대되고 있다(Noh et al., 2005; Park and Hur, 2008; Kim et al., 2009a; Kim et al., 2009b; Hong et al., 2010; Choi et al., 2010; Lee and Yoo, 2011). 분포형 모형은 레이더에 의해 관측된 분포형 강우자료를 유역평균 강우량 추정과 같은 추가적인 단순화 과정 없이 적용할 수 있고, 세분화된 개별 수문과정을 공간적으로 분포된 물리적 매개변수에 기반하여 모의할 수 있는 장점이 있다. 반면, 집중형 모형에 비해 입력자료 및 계산 영역의 증가로 불확실성이 확대될 수 있으며, 이를 보완하기 위한 방편으로 모형 매개변수에 대한 보정이 요구된다. 분포형 모형의 보정에 대해서는 그동안 많은 연구가 진행되어 왔으나, 서로 다른 매개변수의 조합이 비슷한 모의 결과를 낳는 등결과성(equifinality)(Beven and Freer, 2001)을 최소화하기 위해서는 매개변수 분포의 전체 보정계수를 추정함으로써, 매개변수의 차원수를 줄이는 것이 효과적이다. 수문모형의 매개변수 최적화를 위해 SCE-UA, 유전자 알고리즘 등 다양한 방법이 활용되고 있으나(Chung et al., 2012; Kim et al., 2007b), 대부분 많은 횟수의 순차적 반복 계산이 요구되어 분포형 수문모형

에 효율적으로 적용되기 어려운 단점이 있다.

한편, 넓은 지역에 대해 고해상도의 시공간 분해능을 갖는 레이더 추정 강우는 산악지역에 대한 돌발홍수 예측이나 홍수예보의 정확도 향상에 큰 가능성을 지닌 것으로 평가되고 있다(Bae et al., 2012). 최근 우리나라 수문분야에서도 적용이 확대되고 있지만, 레이더 강우는 강우-유출 모의 측면에서 아직 많은 불확실성을 가지고 있다. 레이더 추정 강우가 유역 유출에 미치는 영향에 대한 연구가 일부 있었지만(Borga, 2002; Collier and Knowles, 1986), 강우 추정 방법에 따른 유출 수문 곡선 모의에 그치고 있으며, 레이더 추정 강우의 고해상도 시공간 정보가 수문 모형의 매개변수 추정에 미치는 영향에 대해서는 거의 연구된 바 없다. 또한, 레이더 강우가 갖는 불확실성을 줄이기 위해 지상과 레이더 강우의 상호보완적 적용이 확대되고 있으나, 아직까지 레이더 강우의 오차를 총 강우량 측면에서만 보정한 후 수문모의에 적용하는 방법이 대부분을 차지한다. 보정을 통해 오차를 줄이려는 노력에 비해 레이더 강우 자료의 특성 자체와 연관된 연구는 미진한 편이다. 따라서 측정방법에서부터 시공간 분해능까지 지상 강우와 완전히 상이한 레이더 강우자료가 강우-유출에 미치는 영향을 수문모형의 매개변수 측면에서 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

본 연구의 목적은 분포형 수문모형의 매개변수 추정 및 불확실성 분석을 위해 범용 최적화 모형인 PEST의 적용성을 평가하고, 레이더 강우 및 지상 관측 강우의 입력자료 차이가 매개변수 추정에 미치는 영향을 분석하는 것이다. 이를 위해 GUI에 대한 접근 없이 모형구동이 가능하도록 기존 GRM 모형을 개선한 GRM-MP 버전과 병렬 컴퓨팅

에 의해 최적화 계산 속도를 향상시킬 수 있는 병렬 PEST 버전을 적용하여 매개변수 자동 보정 모형을 구축한다. 이를 낙동강 수계의 금호강 유역과 감천 유역에 대해 레이더 강우 및 티센망(Thiessen polygon)에 의한 지상 관측 강우를 각각 적용하여, 초기 포화도, 지표면 조도계수 및 토양 투수계수의 보정계수의 매개변수 최적값 및 불확실성 범위를 추정한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 연구에 적용된 분포형 수문모형 및 매개변수 최적화 기법, 병렬 PEST를 이용한 GRM 모형 보정 방법을 설명한다. 3장에서 대상유역, 레이더 및 지상 강우 추정 방법, 적용 호우사상 및 모의 조건에 대해 기술한다. 4장에서 레이더 및 지상 강우의 시공간 특성, PEST에 의한 보정 결과를 분석한다. 5장에서 결론 및 향후 연구 방향에 대해 논한다.

2. 분포형 수문모형 및 매개변수 최적화 기법

2.1 GRM 모형

GRM(Grid based Rainfall-runoff Model)은 강우-유출 사상을 모의하기 위한 분포형 수문모형으로, 지표면 및 하도 유출과, 지표하 유출, 기저유출을 모의할 수 있다. 지표면 유출과 하도 유출 해석을 위해서 운동과 모형을 이용하고, 침투는 Green-Ampt 모형을 이용하여 계산한다(KICT, 2011a, 2011b). GRM 모형에서 적용하고 있는 지표면 및 하도 유출에서의 연속방정식은 Eqs. (1) and (2)와 같고, 마찰경사는 흐름면의 바닥경사를 적용한다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r - f + \frac{q_r}{\Delta y} \quad (1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = r \Delta y + q_L + q_{ss} + q_b \quad (2)$$

여기서, q : 단위 폭당 유량($q=uh$), u : x 방향 유속, r : 강우강도, f : 침투율, A : 하도 단면적, q_r : 복귀류, A : x 방향에 직각인 단면적, Q : 유량, h : 수심, q_L : 지표면 흐름에 의한 측방유입,

q_{ss} : 하도로 유입되는 지표하 유출, q_b : 기저유출, t : 시간

GRM-MP (Multiple Projects)는 다수의 GRM 프로젝트 파일을 일괄적으로 모델링할 수 있는 모듈이다. GRM 모형은 Windows GUI를 가지는 응용프로그램이지만, GRM-MP는 도스창(DOS console window)에서 GUI 없이 GRM 모형을 구동할 수 있다. 그러므로 GRM 프로젝트 파일의 매개변수를 수정한 후 각각 다른 이름으로 저장하고, 이를 배치파일 형식으로 GRM-MP에서 일괄 모의할 수 있다.

2.2 PEST의 이론적 배경

PEST(model-independent parameter estimation)는 비선형함수의 매개변수 최적화 및 불확실성 분석 패키지(Doherty, 2003, 2009), 격자기반 지하수 해석 모형의 매개변수 추정에 광범위하게 사용되어 왔으며, 최근 들어 지표수 모형에 대해서도 적용이 확대되고 있다(Kim et al., 2007a). SCE-UA 등 기존 매개변수 최적화 모형에 비해 적은 횟수의 반복 계산에 의해 매개변수를 추정할 수 있어 효율성 면에서 큰 장점을 가지고 있으며, 파일럿 포인트(pilot point), 정규화(regularization) 등 다차원 매개변수 추정에 사용되는 고급 기법을 지원한다.

2.3 병렬 PEST를 이용한 GRM 모형 보정

PEST는 적용하고자 하는 모형의 종류와 상관없이, 그리고 모형 내부 코드의 변형없이 사용할 수 있다. 현재 배포되고 있는 PEST 버전의 경우, 추정하고자하는 매개변수 및 목적함수 계산에 사용되는 모형의 출력이 텍스트 형식이고, 도스 방식으로 외부에서 모형의 실행파일을 조절할 수 있는 조건을 만족할 경우, 사용이 가능하다. 본 연구에서는 병렬컴퓨팅에 의해 계산시간을 최소화할 수 있는 “병렬 PEST”를 적용하였으며, 병렬 PEST를 이용한 GRM 모형 보정 과정은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 수행된다(Fig. 1). 병렬 PEST는 1개의 “주 노드(master node)”와 여러 개의 “부 노드(slave node)”로 구성되며, 각각의 부 노드별로

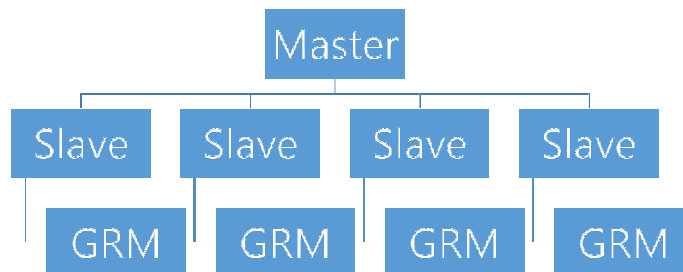


Fig. 1. Diagram of GRM Parameter Optimization Processes by Parallel PEST

GRM 모형이 병렬적으로 모의되고 그 결과가 주 노드로 전달되어 매개변수 최적화를 위한 반복계산을 수행한다.

실제 측정 자료를 구하기 어렵거나 불확실성이 높아 최적화가 요구되거나, GRM 모형에서 자동 보정 가능한 매개변수는 토양 투수계수, 토양 공극률, 토양심, 토양 습윤 전선 흡인수두, 지표면 조도계수, 하도 조도계수, 초기 포화도, 최저 하상경사, 최소 하천단면폭 등이 있다. 본 연구에서는 분포형 수문모형에서 강우사상별, 유역특성별로 다른 불확실성을 가질 수 있다고 판단되고, 경험적으로 민감도가 비교적 큰 것으로 알려진(Park and Hur, 2008; Jung et al., 2008; Choi et al., 2010; Choi et al., 2012) 토양 투수계수, 지표면 조도계수, 초기 포화도를 대상으로, 강우 자료가 매개변수 추정에 미치는 영향을, 병렬 PEST를 통해 분석하였다. 최적화 대상 매개변수의 선정방법은 모의 정확도 및 매개변수 불확실성에 영향을 줄 수 있는 중요한 요소이나, 이에 대한 추가적인 논의는 본 연구의 범위를 벗어난다. 추정 시 다수의 GRM-MP 모형을 병렬 PEST 모형의 부 노드에서 모의하도록 하였으며, 매개변수 최적화에 소요되는 반복 계산 횟수는 대상 유역 및 강우사상별로 차이가 있었으나, 대개 30~60회 이내에 수렴된 결과를 도출하였다.

3. 대상유역 및 모의 조건

3.1 대상유역 및 지상 강우 관측 지점

본 연구에서는 레이더 추정 강우와 지상 관측 강우를 동시에 분석하기 위하여 비슬산 레이더의 관측반경내에 있는 금호강 유역과 감천 유역을 대상유역으로 선정하였다(Figs. 2 and 4). 본 연구에서는 전체 금호강 유역 중 금

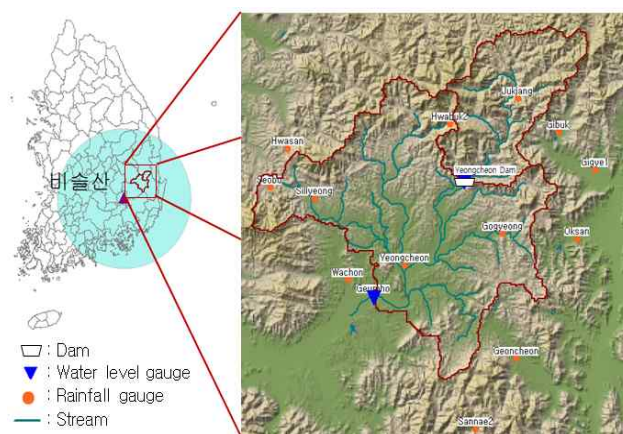


Fig. 2. Geumho River Catchment

호 수위관측소를 최하류 유출지점으로 하는 상류 유역에 대해 모의하였으며, 금호강 상류의 영천댐의 방류량은 별도로 모의하지 않고 관측값을 적용하였다. Fig. 2는 금호강 유역의 개황도를 나타낸 것이다. 금호 수위관측소는 낙동강 지류인 금호강에 위치하고 있으며, 낙동강 하류 지점으로부터 상류 약 56km에 위치하고 있다. 금호강 유역에서 금호 수위관측소 지점의 전체 유역면적은 약 1,002 km²이며, 이 중 영천댐 상류 면적 235 km²를 제외한 약 767 km² 면적에 대해 수문모의를 수행하였다. 금호강의 하상은 주로 모래와 자갈로 구성되어 있다. 금호강 유역에 대하여 14개 강우관측소(금호, 외촌, 영천, 산내2, 건천, 옥산, 고경, 기북, 기계1, 죽장, 화북2, 화산, 신령, 서부)를 이용하여 티센망을 생성하였으며, Fig. 3과 같다(MLTMA, 2009).

본 연구의 대상유역 중 감천 유역은 선산 수위관측소부터 상류 유역을 의미하며, Fig. 4는 감천 유역을 나타낸 것이다. 감천의 선산 수위관측소는 감천 하류부에 위치하며, 경상북도 구미시 고아면 오로리 선주교에 있다. 유역 면적은 약 977 km²이며, 낙동강과 합류점으로부터 하천 거리상 약 27.6km 상류에 위치해 있다. 감천의 하상은 주로 모래로 이루어져 있으며, 경사는 완만하다. 유역 내에는 김천시가 있다. 감천 유역에서는 12개의 강우관측소(부항1, 지례, 부항2, 김천, 선산, 일선교, 대가, 구미, 웅양2, 무풍, 상촌, 웅북)를 활용하여 티센망을 생성하였으며, Fig. 5와 같다(MLTMA, 2011b; Choi et al., 2012).

3.2 레이더 강우 추정

본 연구에서는 비슬산 레이더 자료를 활용하였으며, 이 레이더는 국토해양부에서 운영하고 있는 S-밴드 도플러 이중편파 레이더로 모델명은 WSR-98D/SD이다. 이중편

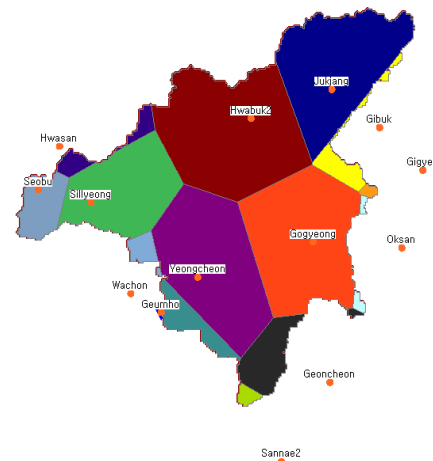


Fig. 3. Rainfall Thiessen network (Geumho River)

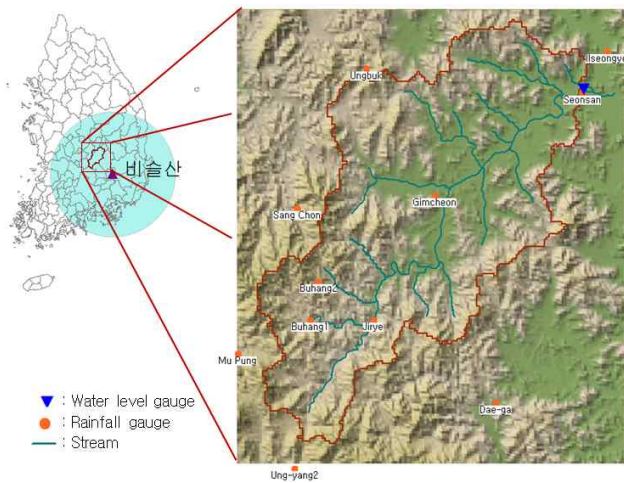


Fig. 4. Gamcheon Catchment

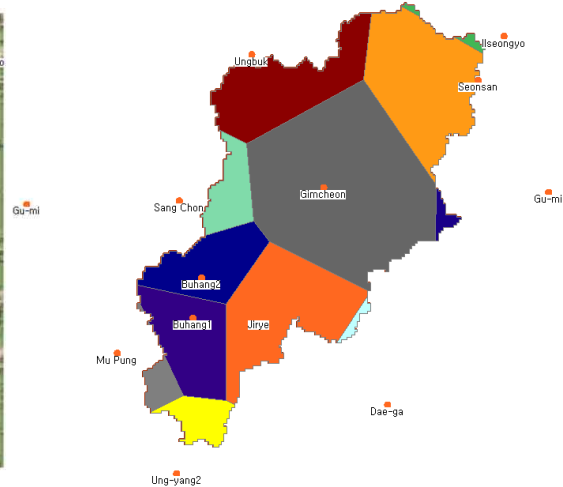


Fig. 5. Rainfall Thiessen network (Gamcheon)

Table 1. Applied Events and Observations

Periods	Catchment (site)	Peak discharge (m ³ /s)	Cumulative rainfall (mm)	
			Radar	Thiessen Int.
2011. 7. 8. 22:00~ 7. 12. 24:00	Geumho River (Geumho)	1767	234	234
	Gamcheon (Sunsan)	1874	162	164
2012. 8. 22. 22:00~ 8. 24. 24:00	Geumho River (Geumho)	827	136	161
	Gamcheon (Sunsan)	194	52	60

과 레이더의 수평편파와 수직편파 신호는 눈, 우박과 물방울이 떨어지면서 공기저항에 의해 수직으로 넓어지는 형태를 구별할 수 있으며, 단일편파 레이더의 관측 자료인 수평반사도(Z_{HH}), 도플러속도(V_r), 스펙트럼 폭(W) 등 3개와 수직반사도(Z_{VV}), 차등반사도(differential reflectivity, Z_{DR}), 비차등위상변이(specific differential phase, K_{DP}), 교차상관계수(cross-correlation coefficient, ρ_{hv}), 차등위상차(Φ_{DP}) 등 5개가 추가되어 8가지의 자료를 활용할 수 있다. 그 중 본 연구에서 활용한 $R(ZDR)$ 은 Bringi and Chandrasekar (2001)가 S-band 레이더를 대상으로 제안한 Eq. (3)을 이용한다.

$$R(ZDR) = c_1 Z_{HH}^{a_1} 10^{0.1b_1 Z_{DR}} \quad (3)$$

여기서, $c_1: 6.7 \times 10^{-3}$, $a_1=0.93$, $b_1: -3.43$, $R(ZDR)$ 의 단위: mm/h

Z_{HH} 의 단위: mm⁶/m³, Z_{DR} 의 단위: dB

이중편파 레이더로부터의 강우 추정 방법 및 그 오차에 대해서 그동안 많은 연구가 진행되어 왔으며(Bae et al., 2012; Yoo et al., 2008), 이에 대한 추가적인 논의는 본 연

구의 범위를 벗어난다. 이중편파 레이더의 이론적 배경과 비슬산 강우레이더에 대해서는 Ryzhkov et al. (2005)과 MLTMA (2011a)를 각각 참고할 수 있다.

3.3 호우사상 및 모의 조건

본 연구에 적용된 호우사상은 다음의 Table 1과 같다. 비슬산 레이더의 관측기간이 길지 않은 관계로, 관측기간 중의 호우사상을 비교하여 다음의 두 사상을 선택하였다. 호우 발생 원인으로는, 2011년 7월은 장마전선에 의한 강우, 2012년 8월은 대기 불안정에 의한 대류성 강우로 각각 상이하다(KMA, 2011, 2012; Jeon et al., 2012). 2011년 7월 호우사상은 두 유역에서 첨두홍수량이 1700 m³/s 이상으로 관측되었으며, 2012년 8월 호우사상은 금호강 유역에서는 827 m³/s, 감천 유역에서는 194 m³/s로 상대적으로 작았다. 각 유역에 대해 관측된 레이더 및 티센망에 의한 지상 강우의 누적량은 2011년 7월 호우사상의 경우, 거의 동일한 면적평균 누적강수량을 나타내었으며, 2012년 8월 호우사상의 경우, 지상 강우가 레이더 추정 강우에 비해 크게 관측되었다.

각각의 호우사상 및 유역에 대해 레이더 및 지상 강우별로 독립적인 모의를 수행하여 총 8개의 경우에 대해 병렬 PEST 및 GRM-MP의 결합 모형을 통해 토양 투수계수 및 지표면 조도계수의 보정계수, 초기 포화도 세 가지 매개변수를 추정하였다. 초기 포화도는 모의 시작 시점에서의 유역내 토양의 함수율로, 연속모의모형에서는 추가 모의기간을 설정을 통해 그 영향을 최소화하지만, GRM 모형은 홍수모의에 초점을 맞추어 호우사상별로 모의하도록 개발되어 포화도에 대한 초기 설정이 요구된다. 토양 투수계수 및 지표면 조도계수는 각 토양 및 토지이용 특성별 자료를 구축한 후 전체적인 보정계수를 도입하여 보정하였다. 보정에 적용된 매개변수의 종류 및 범위는 다음의 Table 2와 같다. 특히, 토양 투수계수의 보정계수는 비교적 큰 불확실도를 고려하여 대수 스케일(log scale)로 보정을 수행하였다. 그 외의 매개변수는 기존 연구에서 보정된 값이나 참고문헌에서 제시한 값을 사용하였으며, 보정 대상 매개변수 이외에는 강우 추정 방법에 상관없이 동일한 매개변수를 적용하였다.

4. 결과 분석

4.1 강우 분석

두 유역에서 레이더 및 지상 관측에 의한 호우사상별 면적평균 누적강우량 그래프는 Fig. 6과 같다. 2011년 7월 호우사상에 대해 각 유역에서 레이더와 지상 강우가 시간대별로 일부 차이를 보이지만 총량에서는 거의 동일한 결과를 보이고 있다. 그러나 2012년 8월 호우사상에 대해서는 두 유역 모두에서 지상 강우가 레이더 강우에 비해 13~15% 정도 많은 총량을 보였다. 누적강우량의 차이가 벌어지는 지점은 곡선의 기울기가 급하게 변하는 지점, 즉 순간 강우 강도가 높은 지점에서 주로 차이가 발생하였다.

호우사상별 강우 추정 방법별 누적강우량의 공간분포는 Figs. 7 and 8과 같다. Fig. 7은 금호강 유역에 대한 누적강우량 공간 분포로, 레이더와 지상 강우가 전반적으로는 비슷한 양상을 보이지만 레이더 강우에서만 공간적으로 큰 변동성이 발견된다. 이는 시공간적으로 고해상도를 갖는 레이더의 특징으로 볼 수 있으나, 그동안 레이더 관련 연구가 지상 관측이나 유역면적평균과의 관계에 대해

Table 2. Initial Ranges and Calibration Mode of Parameters

Parameters	Ranges		Calibration mode
	Minimum	Maximum	
Initial soil moisture	0	1	Non-log scale
Multiplier of overland roughness	0.5	1.5	Non-log scale
Multiplier of soil hydraulic conductivity	0.1	10	Log scale

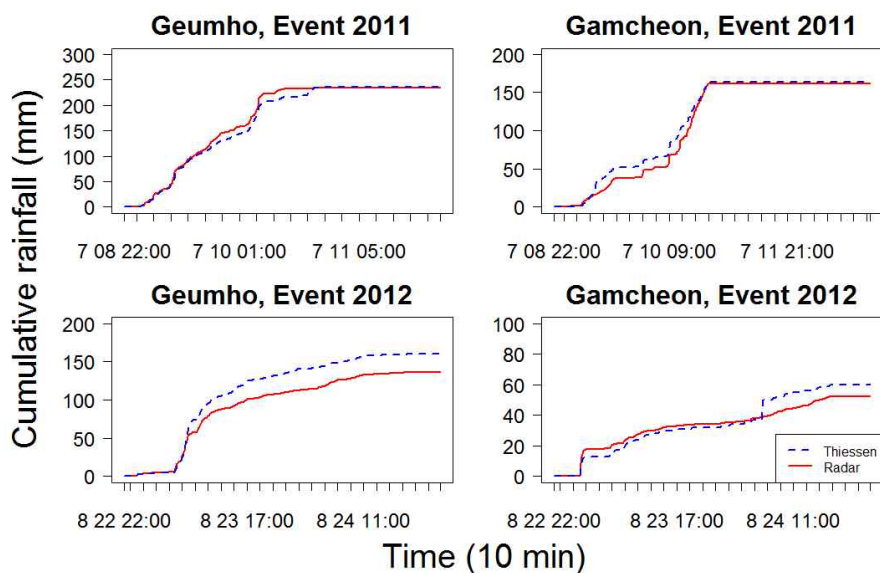


Fig. 6. Cumulative Time Series by Catchment Averaged Rainfall

초점을 맞추어 진행되었기 때문에 향후 산악지역 등 지상 미관측 지점에 대한 고해상도 레이더 정보의 정확도 및 보정에 대해 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

이러한 공간 분포의 특성 차이는 감천 유역에서도 확인되며(Fig. 8), 주로 유역경계인 산악지역을 중심으로 국지적으로 강한 강우가 레이더에 의해 추정되었다.

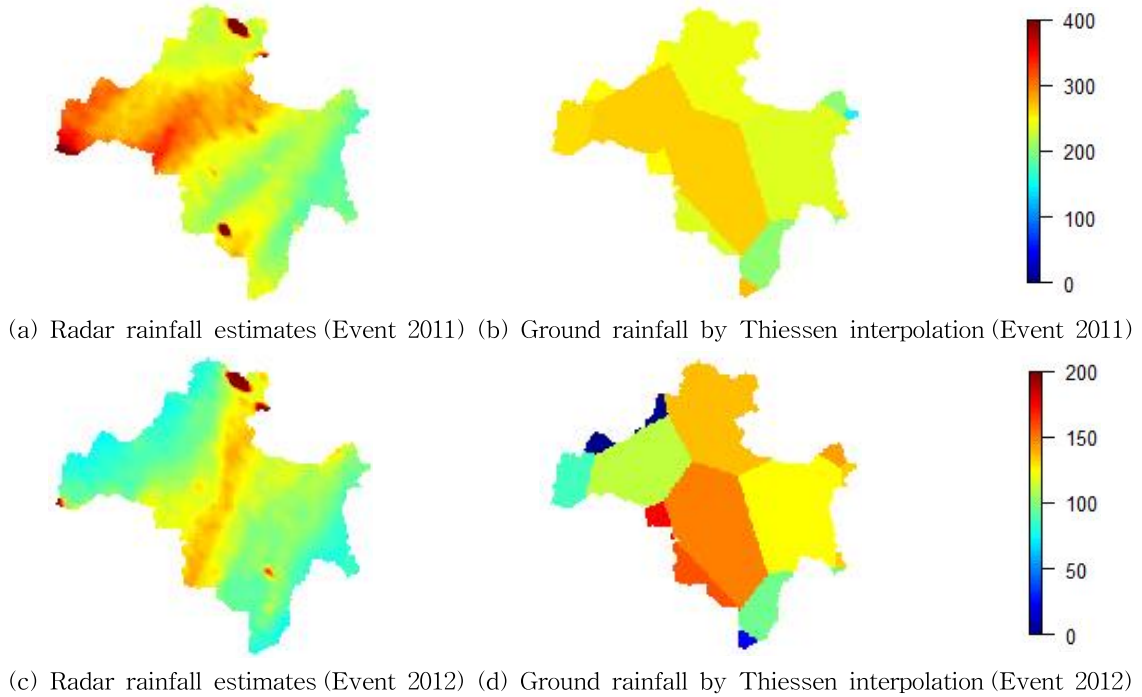


Fig. 7. Cumulative Rainfall Distribution (Geumho River Catchment)

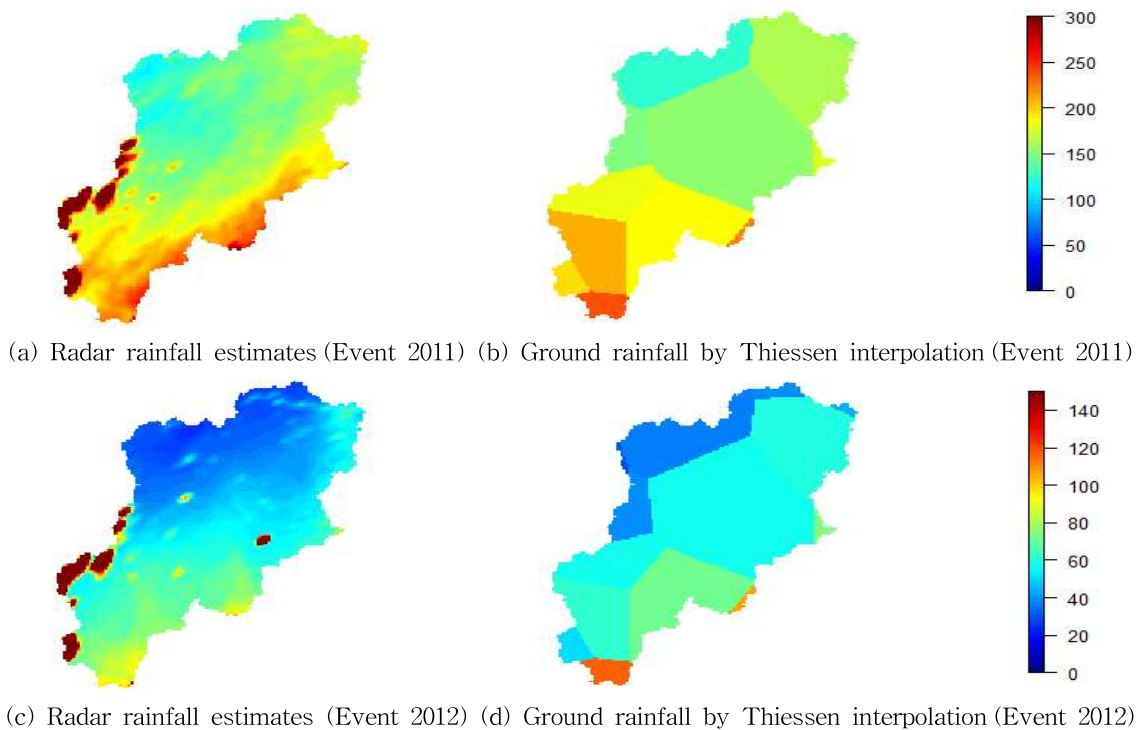


Fig. 8. Cumulative Rainfall Distribution (Gamcheon Catchment)

4.2 보정후 수문해석결과 비교

병렬 PEST에 의한 매개변수 보정후 모의 수문 그래프는 Fig. 9에 도시하였으며, 각 모의의 정확도에 대한 통계 분석결과는 Table 3과 같다. Fig. 9에 도시된 강우량은 유역평균된 레이더 추정 강우를 사용하였다. 통계값으로는 Nash-Sutcliffe 효율계수(Nash-Sutcliffe efficiency; NSE)와 평균제곱근오차(root mean square error; RMSE)를 적용하였으며, 다음 식에 의해 계산되었다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}^t - Q_{sim}^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}^t - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}^t - Q_{sim}^t)^2}{T}} \quad (5)$$

여기서, t: 시간, T: 전체 관측 시계열의 수, Q_{obs}^t : 관측 유량, Q_{sim}^t : 모의 유량, $\overline{Q_{obs}}$: 관측 유량 평균이다.

보정 결과, 금호강 유역에 대해서는 레이더 및 지상 강우 모두에서 Nash-Sutcliffe 효율계수 0.9 이상의 높은 정확도를 갖는 유출량 해석 결과를 얻을 수 있었으며, 감천 유역에 대해서는 강우 추정 방법과 상관없이 상대적으로 낮은 정확도를 보였다. 특히, 2012년 감천 유역에 대한 모의 결과는 보정 후에도 Nash-Sutcliffe 효율계수가 레이더 강우 적용 시, 0.54, 지상 강우 적용 시, 0.09로 낮았다. 감천 유역의 2012년 사상의 경우에는 비교적 소규모 호우사상으로서 모형 매개변수보다 모형의 구조나 입력자료가 갖는 불확실성의 영향이 더 큰 것으로 판단되며, 후속 연구가 필요한 부분이다. Table 3에서 보듯이, 보정된 수문 모의 결과는 레이더 강우 적용 시 지상 강우에 비해 비슷하거나 더 향상된 정확도를 보였다.

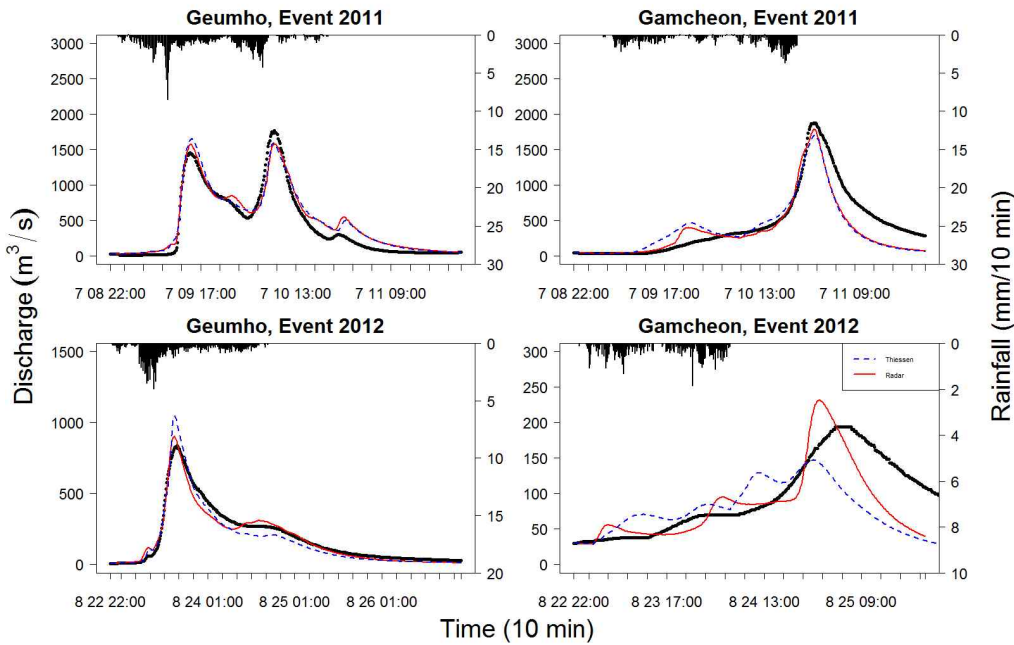


Fig. 9. Observed and Simulated Discharge after Calibration

Table 3. Simulation Accuracy after Calibration

Event	Metrics	Geumho River Catchment		Gamcheon Catchment	
		Radar rainfall	Thiessen*	Radar rainfall	Thiessen
2011	NSE	0.94	0.94	0.76	0.72
	RMSE	114	117	206	222
2012	NSE	0.97	0.94	0.54	0.09
	RMSE	38	48	36	51

*Ground rainfall by Thiessen interpolation

4.3 보정 매개변수 분석

각 호우사상별 유역별로 보정된 매개변수 및 95% 불확실도 범위는 Fig. 10과 Table 4와 같다. 초기 포화도는 예측대로 호우사상 및 유역에 따라 다른 최적값을 나타내었으나, 강우 추정 방법에 대해서도 각기 다른 결과를 보였다. 초기 포화도는 유역의 특성 매개변수가 아닌 선행 강

우사상의 지배적인 영향을 받으므로, 향후 자료동화기법이나 연속모의기법 도입을 통해 초기 포화도를 추정하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 지표면 조도계수의 보정계수는 감천 유역의 2012년 8월 호우사상에 대한 결과를 제외하고, 레이더 및 지상 강우에 대해 1보다 작은 특성을 보였고, 매개변수 불확실성은 2012년 8월 감천 유역에 대해 레이더 강우 적용 시 가장 컸으며, 그 외에서는 지상 강우

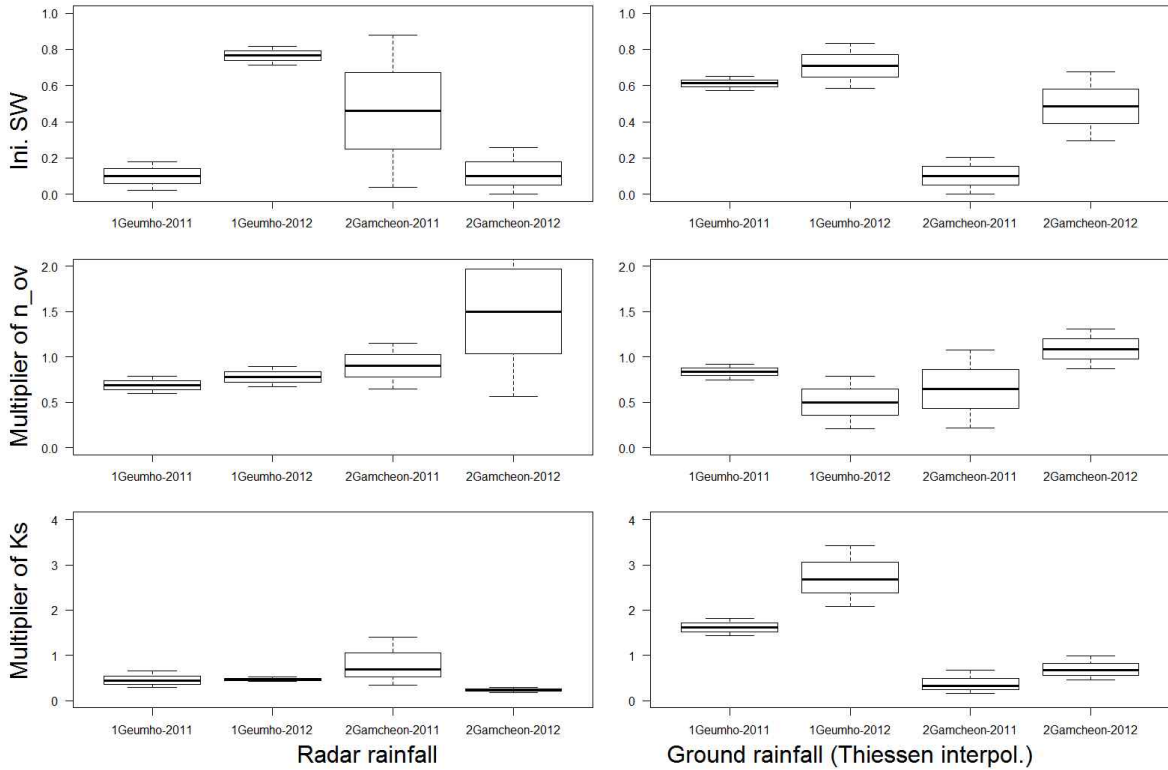


Fig. 10. Calibrated Parameters by PEST

Table 4. Calibrated parameters by PEST

Parameters (95% confidence interval)	Methods of rainfall estimates	Geumho River Catchment		Gamcheon Catchment	
		Event 2011	Event 2012	Event 2011	Event 2012
Initial soil moisture	Radar rainfall	0.10 (0.02~0.18)	0.76 (0.71~0.82)	0.46 (0.04~0.88)	0.10 (0~0.26)
	Thiessen interpolation	0.61 (0.57~0.65)	0.71 (0.58~0.83)	0.10 (0~0.21)	0.49 (0.30~0.68)
Multiplier of overland roughness	Radar rainfall	0.69 (0.59~0.79)	0.78 (0.67~0.89)	0.90 (0.65~1.15)	1.5 (0.57~2.43)
	Thiessen interpolation	0.83 (0.75~0.92)	0.50 (0.21~0.79)	0.64 (0.21~1.08)	1.09 (0.87~1.31)
Multiplier of soil hydraulic conductivity	Radar rainfall	0.44 (0.29~0.66)	0.47 (0.42~0.52)	0.70 (0.35~1.40)	0.23 (0.18~0.30)
	Thiessen interpolation	1.61 (1.43~1.81)	2.68 (2.08~3.43)	0.33 (0.17~0.67)	0.67 (0.46~0.98)

가 레이더 강우를 적용할 때보다 비슷하거나 큰 불확실성 범위를 나타냈다. 토양 투수계수의 보정계수는 레이더 강우의 경우에서 일관되게 1보다 작은 경향을 보였으며, 이는 강우강도가 강한 격자가 일부 존재하기 때문으로 판단되었다. 2012년 8월 감천 유역 강우 사상을 제외하면, 레이더 강우는 지표면 조도계수 및 토양 투수계수의 보정계수에 대해 일정한 보정결과와 상대적으로 적은 불확실성을 보였으나, 지상 강우의 경우, 유역별이나 호우사상별로 일정한 경향을 찾을 수 없었다. 이에 대해서는 향후 레이더 관측 자료 축적 후, 추가적인 연구가 요구된다. PEST에 의한 매개변수 최적화 결과, 동일 유역 및 호우사상에 대해서도 강우 추정 방법에 따라 서로 다른 최적 매개변수 값을 갖는 것을 알 수 있었으며, 이는 향후 레이더 강우 자료의 수문 모의 활용 시 유의해야할 점으로 판단되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 범용 매개변수 최적화 모형인 PEST를 이용하여 분포형 수문모형인 GRM 모형의 매개변수 및 불확실성 범위를 추정하였다. 특히, 레이더 강우 및 티센 망에 의한 지상 관측 강우를 각각 적용하여, 입력자료 차이가 매개변수 추정에 미치는 영향을 분석하였다. 구축된 자동 보정 모형은 GUI에 대한 접근 없이 모형구동이 가능하도록 개선된 GRM-MP 버전과 병렬 PEST 버전을 결합하여 매개변수 추정에 소요되는 시간을 단축시켰다. 이를 낙동강 수계 금호강 유역과 감천 유역을 대상으로 적용하여, 초기 포화도, 지표면 조도계수 및 토양 투수계수의 보정계수에 대해 매개변수 보정을 수행하였다. 본 연구의 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 병렬 PEST를 이용하여 분포형 수문모형인 GRM 모형의 매개변수를 적은 반복 계산 횟수와 병렬 계산을 통해 효율적으로 추정할 수 있었다.
- 2) 강우자료 분석 결과, 레이더와 지상 강우의 유역평균 시계열은 비슷하거나 지상 강우가 조금 큰 경향을 보였으나, 공간분포에 있어서는 지상 강우에 비해 레이더 강우에서 큰 변동성이 확인되었다.
- 3) 보정 매개변수에 의한 수문모의 결과, 레이더 강우 적용 시 지상 강우에 비해 비슷하거나 더 나은 통계 값을 보였다. 상대적으로 작은 호우 사상에서는 대상 매개변수만으로 적절한 보정이 이루어지지 않았으며(감천, 2012년 호우사상), 모형 구조나 입력자료의 불확실성을 추가적으로 고려한 후속 연구가 요구되었다.

4) 추정된 매개변수는 레이더 강우 적용의 경우, 토양 투수계수의 보정계수가 일관되게 1보다 작은 경향을 보였으며, 이는 강우강도가 강한 격자가 일부 존재하기 때문으로 판단되었다.

수문과정 기반의 분포형 모형 적용 시 불가피하게 기존의 문헌정보나 GIS 공간정보에서 얻은 매개변수를 그대로 적용하는 경향이 있으나, PEST를 이용하여 일부 매개변수(혹은 그에 대한 보정계수)에 대한 최적화만으로도 모의 정확도의 향상이 가능함을 확인하였다. 본 연구의 대상 유역 및 호우사상에 대한 PEST의 최적화 모의 결과, 동일한 유역 및 호우사상에 대해서도 강우 추정 방법에 따라 서로 다른 최적 매개변수 값을 갖는 것을 알 수 있었으며, 이는 레이더 강우 자료의 수문 모의 활용 시 유의해야할 점으로, 향후 레이더 추정 강우와 분포형 수문 모형의 불확실성에 대한 후속 연구가 가능할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구를 통해 적용성이 확인된 병렬 PEST와 GRM 모형의 자동 보정 모형을 이용하여, 분포형 수문 모형의 토양, 토지이용, 유출 추적과 관련된 광범위한 매개변수의 불확실성에 대한 연구가 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(수문레이더 기반 홍수예경보 및 폭설 추정 플랫폼 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 논문의 수정·보완에 큰 도움을 주신 심사위원들께 깊이 감사드립니다.

References

- Bae, D.H., Phoung, T.A., and Yoon, S.S. (2012). "A method to evaluate the radar rainfall accuracy for hydrological application." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 12, pp. 1039-1052. (in Korean with English abstract)
- Beven, K.J., and Freer, J. (2001). "Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems." *J. Hydrol*, Vol. 249, pp. 11-29.
- Borga, M. (2002). "Accuracy of radar rainfall estimates for streamflow simulation." *J. Hydrol*, Vol. 267, pp. 26-39.
- Bringi, V.N., and Chandrasekar, V. (2001). *Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications*.

- Cambridge University Press, pp. 534-540.
- Choi, Y.S., Choi, C.K., Kim, K.T. (2012). "Development of a multi-site calibration module of distributed model -the case of GRM-." *Journal of Korean Association of Geographic Information Studies, Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 15, No. 3, pp. 103-118. (in Korean with English abstract)
- Choi, Y.S., Kim, K.T., and Shim, M.P. (2010). "Discharge estimation at ungauged catchment Using distributed rainfall-runoff model." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 43, No. 4, pp. 353-365. (in Korean with English abstract)
- Chung, G.H., Park, H.S., Sung, J.Y., and Kim, H.J. (2012). "Determination and evaluation of optimal parameters in storage function method using SCE-UA." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 45, No. 11, pp. 1169-1186. (in Korean with English abstract)
- Collier, C.G., and Knowles, J.M. (1986). "Accuracy of rainfall estimates by radar, part III: Application for short-term flood forecasting." *J. Hydrol.*, Vol. 83, pp. 237-249.
- Doherty, J. (2003). "Ground water model calibration using pilot points and regularization." *Ground Water*, Vol. 41, No. 2, pp. 170-177.
- Doherty, J. (2009). PEST: Model-Independent Parameter Estimation. Watermark Numerical Computing, Australia.
- Hong, W.Y., Park, G.A., Jung, I.K., and Kim, S.J. (2010). "Development of a grid-based daily watershed runoff model and the evaluation of its applicability." *Journal of Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, Vol. 30, No. 5, pp. 459-469. (in Korean with English abstract)
- Jeon, B.K., Lee, C.K., and Kim, Y.S. (2012). "Evaluation of rainfall measurement capability of dual polarization radar." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 2, pp. 215-224. (in Korean with English abstract)
- Jung, I.K., Shin, H.J., Park, J.H., and Kim, S.J. (2008). "A modified grid-based kinematic wave storm runoff model (ModKIMSTORM) (II)-Application and Analysis -." *Journal of Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, Vol. 28, No. 6B, pp. 709-721. (in Korean with English abstract)
- Kim, B.K., Kim, B.S., and Kwon, H.H. (2009a). "Impact assessment of agricultural reservoir on streamflow simulation using semi-distributed hydrologic model." *Journal of Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, Vol. 29, No. 1, pp. 11-12. (in Korean with English abstract)
- Kim, K.S., Han, K.Y., and Kim, G. (2009b). "Development of distributed rainfall-runoff model using multi-directional flow allocation and real-time updating algorithm (I) -theory-." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 42, No. 3, pp. 247-257. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.M., Benham, B.L., Brannan, K.M., Zeckoski, R.W., and Doherty, J. (2007a). "Comparison of hydrologic calibration of HSPF using automatic and manual methods." *Water Resour. Res.*, Vol. 43, W01402, doi: 10.1029/2006WR004883.
- Kim, T.S., Jung, I.W., Koo, B.Y., and Bae, D.H. (2007b). "Optimization of tank model parameters using multi-objective genetic algorithm (I): methodology and model formulation." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 40, No. 9, pp. 677-685. (in Korean with English abstract)
- Korea Institute of Construction Technology. (2011b). *HyGIS-GRM User's Manual*. Ministry of Education, Science and Technology. (in Korean with English abstract)
- Korea Institute of Construction Technology. (KICT). (2011a). *Development and Application of HyGIS*. Ministry of Education, Science and Technology. (in Korean with English abstract)
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2011). Monthly Weather Report in July. (in Korean)
- Korea Meteorological Administration (2012). Monthly Weather Report in August. (in Korean) 645-653. (in Korean with English abstract)
- Lee, M.H., and Yoo, D.H. (2011). "Development and application of diffusion wave-based distributed runoff model." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 44, No. 7, pp. 553-563. (in Korean with English abstract)
- Ministry of Land, Transportation, and Maritime Affairs (2011a). Development of Rainfall Estimation and

- Analysis Optimization System of the Bisl-San Rainfall Radar. (in Korean)
- Ministry of Land, Transportation, and Maritime Affairs (2011b). Streamflow survey report. (in Korean)
- Ministry of Land, Transportation, and Maritime Affairs (MLTMA) (2009). Streamflow Survey Report. (in Korean)
- Noh, S.J., Kim, H.J., and Jang, C.H. (2005). "Application of WEP Model to the Cheonggecheon watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 38, No. 8, pp. 645-653.
- Park, J.H., and Hur, Y.T. (2008). "Development of dynamic wave-based distributed model for flood discharge analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 5, pp. 455-462. (in Korean with English abstract)
- Ryzhkov, A.V., Giangrande, S.E., and Schuur, T.J. (2005). "Rainfall estimation with a polarimetric prototype of WSR-88D." *J. Appl. Meteo.*, Vol. 44, pp. 502-515.
- Yoo, C.S., Ha, E.H., Kim, B.S., Kim, K.J., and Choi, J.H. (2008). "Sampling error of areal average rainfall due to radar partial coverage." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 5, pp. 545-558. (in Korean with English abstract)

논문번호: 13-062	접수: 2013.07.30
수정일자: 2013.08.29/09.13	심사완료: 2013.09.13