

# 레이더 강우 및 분포형 수문모형의 공간해상도가 매개변수 추정에 미치는 영향 평가

노성진\* · 최신우\*\* · 최윤석\*\*\* · 김경탁\*\*\*\*

Noh, Seong Jin\*, Choi, Shin Woo\*\*, Choi, Yun Seok\*\*\*, Kim, Kyung Tak\*\*\*\*

## Impact Assessment of Spatial Resolution of Radar Rainfall and a Distributed Hydrologic Model on Parameter Estimation

### ABSTRACT

In this study, we assess impact of spatial resolution of radar rainfall and a distributed hydrologic model on parameter estimation and rainfall-runoff response. Radar data measured by S-band polarimetric radar located at Mt. Bisl in the year of 2012 are used for the comparative study. As different rainfall estimates such as R-KDP, R-Z, and R-ZDR show good agreement with ground rainfall, R-KDP are applied for rainfall-runoff modeling due to relatively high accuracy in terms of catchment averaged and gauging point rainfall. GRM (grid based rainfall-runoff model) is implemented for flood simulations at the Geumho River catchment with spatial resolutions of 200m, 500m, and 1000m. Automatic calibration is performed by PEST (model independent parameter estimation tool) to find suitable parameters for each spatial resolution. For 200m resolution, multipliers of overlandflow and soil hydraulic conductivity are estimated within stable ranges, while high variations are found from results for 500m and 1000m resolution. No tendency is found in the estimated initial soil moisture. When parameters estimated for different spatial resolution are applied for other resolutions, 200m resolution model shows higher sensitivity compared to 1000m resolution model.

**Key words** : Distributed hydrologic model, Radar rainfall estimates, Spatial resolution, PEST, Parameter estimation, Uncertainty assessment

### 초록

본 연구는 레이더 강우와 분포형 수문모형의 공간해상도가 매개변수 추정 및 강우-유출 모의에 미치는 영향을 분석하였다. 레이더 강우는 비슬산 S밴드 이중편파 강우레이더에서 2012년 관측된 강우사상을 대상으로, R-KDP, R-Z, R-ZDR의 관계식에 의해 추정된 레이더 강우를 지상 관측 강우와 비교하였다. 세 가지 강우 추정식에 의한 레이더 강우를 지상 관측 강우와 비교 시 유역 평균에 대해서는 모두 높은 일치도를 보였으며, 이는 지상 관측 강우에 대한 레이더 강우 보정의 영향으로 판단되었다. 그 중에서도 R-KDP에 의한 추정 강우가 비교적 높은 정확도를 보였으며, 이를 강우-유출 모형의 입력자료로 적용하였다. 강우-유출 모형으로는 GRM (grid based rainfall-runoff model) 모형을 이용하여, 낙동

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 수자원연구실 전임연구원  
(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · seongjin.noh@gmail.com)

\*\* 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 수자원연구실 청년인턴연구원  
(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · chshin9085@kict.re.kr)

\*\*\* 정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 수자원연구실 수석연구원  
(Corresponding Author · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · yschoi51@kict.re.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 수자원연구실 연구위원  
(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · ktkim1@kict.re.kr)

Received May 14, 2014/ revised July 13, 2014/ accepted August 9, 2014

강 수계 금호강 유역을 대상으로, 200m, 500m, 1000m의 공간해상도로 입력자료를 구축하였다. 또한, 범용 매개변수 최적화 모형인 PEST (model independent parameter estimation tool)로 초기 포화도, 지표면 조도계수 및 토양 투수계수의 보정계수를 각 공간해상도 및 호우사상 별로 추정하였다. 매개변수 추정 결과, 200m 공간해상도 모형에서는 비교대상 강우사상에 대해 지표면 조도계수와 토양 투수계수 관련 보정계수가 비교적 안정적으로 추정되었으나, 500m, 1000m 공간해상도 모형에서는 강우사상에 따라 매개변수의 최적 추정 값의 변동이 확인되었다. 초기 포화도는 강우사상 별, 공간해상도 별로 일정한 경향을 보이지 않았다. 또한, 200m와 1000m 공간해상도에 대해 최적화된 매개변수를 다른 공간해상도에 적용한 결과, 1000m 공간해상도에 대해 보정된 매개변수를 200m 공간해상도 모형에 적용하면 첨두 홍수량이 증가하는 경향이 있었다.

**검색어** : 분포형 수문모형, 레이더 강우, 공간해상도, PEST, 매개변수 추정, 불확실성 분석

## 1. 서론

분포형 수문모형은 유역의 각종 수문과정의 시공간적 변화를 격자단위로 해석하며, 최근 레이더, 인공위성에 의한 고해상도 강우 추정 기술의 발달과 원격탐사 기술을 이용한 유역의 공간적 특성에 대한 매개변수 자료 축적 및 컴퓨팅 능력의 향상에 따라 활용이 확대되고 있다(Noh et al., 2005; Hong et al., 2006; Park and Hur, 2008; Kim et al., 2009a; Kim et al., 2009b; Hong et al., 2010; Choi et al., 2010; Kim et al., 2011; Lee and Yoo, 2011; Choi et al., 2012; Lim et al., 2013; Noh et al., 2013). 또한 레이더 추정 강우는 산악지역에 대한 돌발홍수 예측이나 홍수예보의 정확도 향상에 큰 가능성을 지닌 것으로 평가되며 (Bae et al., 2012), 그동안 많은 관련 연구가 진행되어 왔다(Borga, 2002; Collier and Knowles, 1986; Yoo et al., 2011, Jeon et al., 2012; Lee, 2013). 특히, 최근 보급이 확산되고 있는 이중편파 레이더는 수평편파만을 사용하는 기존의 단일편파 레이더에 비해 수직 편파를 추가로 사용함으로써 강우체 추정 및 강우량 정확도 개선을 위한 다양한 관측자료를 제공한다(Lee, 2013). 레이더 추정 강우를 분포형 수문모형 적용 시 유역 평균 강우 환산과 같은 추가적인 불확실성 요인 없이 고해상도의 강우자료를 그대로 활용할 수 있는 장점이 있다. 기존의 집중형 및 준분포형 모형에 비해, 분포형 수문모형은 유역 내 모든 지점에 대해 수문요소의 시공간적 이동 및 변화를 모의할 수 있는 반면, 격자 별로 설정되는 입력자료 및 매개변수의 증가로 인해 불확실성이 확대될 수 있으며, 이를 보완하기 위해 모형 매개변수에 대한 보정이 필요하다. 수문모형의 매개변수 최적화를 위해 Bayesian 기법, SCE-UA, 유전자 알고리즘, 패턴탐색 등 다양한 방법이 활용되고 있으나(Kwon et al., 2008; Chung et al., 2012; Kim et al., 2007b; Kwak et al., 2009), 대부분 많은 횟수의 순차적 반복 계산이 요구되어 분포형 수문모형에 효율적으로 적용되기 어려운 단점이 있으며, 최근 들어 비교적 적은 반복 계산으로 효과적인 매개변수 추정이 가능한 PEST 모형을 이용한 연구가 수행된 바 있다(Kim et al., 2007a; Noh et al., 2013).

대부분의 수문모형은 매개변수 추정을 통해 대상 유역의 수문곡선을 적절히 모의할 수 있지만, 호우사상별로 최적 매개변수의 변동성이 클 경우, 최적 매개변수에 대한 정보가 부족한 실시간 홍수예측이나 미세측 유역 해석 시 모의 결과에 대한 신뢰도가 크게 낮아질 수 밖에 없다. 공간해상도는 분포형 수문모형의 정확도 및 불확실성에 큰 영향을 미치는 요소이나, 대상 유역의 크기와 모의 소요 시간 등을 고려하여 사용자에게 따라 임의적으로 결정되고 있는 실정이다. 레이더 자료의 해상도가 분포형 강우-유출 모의에 미치는 영향에 대한 연구가 일부 있었으나(Kim et al., 2011), 레이더 강우 및 분포형 수문모형의 공간해상도가 매개변수 추정에 미치는 영향에 대해서는 아직까지 많은 연구가 진행되지 않았다.

본 연구에서는 레이더 강우와 분포형 수문모형의 공간해상도가 매개변수 추정 및 강우-유출 모의에 미치는 영향을 분석한다. 레이더 강우는 비슬산 강우레이더에서 2012년 관측된 호우사상을 대상으로, R-KDP, R-Z, R-ZDR의 관계식에 의해 추정된 레이더 강우를 지상 관측 강우와 비교한다. 강우-유출 모형으로는 GRM 모형을 이용하여, 낙동강 수계 금호강 유역을 대상으로, 200m, 500m, 1000m의 공간해상도로 모형을 구축하고, 범용 매개변수 최적화 모형인 PEST로 초기 포화도, 지표면 조도계수 및 토양 투수계수의 보정계수를 추정하여 호우사상별 변동성을 분석하고, 서로 다른 공간해상도로부터 추정된 매개변수를 각각 적용하여 민감도를 평가한다.

## 2. 대상 유역 및 연구방법

### 2.1 대상유역

본 연구에서는 레이더로부터 추정된 강우를 이용한 유출해석시 적용된 자료의 공간해상도에 따른 매개변수 추정 특성을 평가하고자 한다. 이를 위하여 국토교통부의 비슬산 강우레이더 관측반경 내에 있고, 계산된 유량자료를 검증할 수 있는 수위관측소를 포함하고 있는 금호강의 금호 수위관측소 유역(Fig. 1)을 대상으로 연구를 수행하였다. 금호 수위관측소 유역의 면적은 약 928km<sup>2</sup>이며, 상류에는 영천댐을 포함하고 있다. 본 연구에서는 영천댐 방류량을

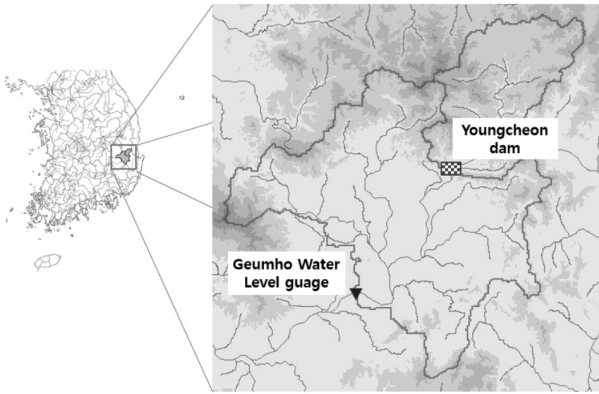


Fig. 1. Geumho Stream Gauge Catchment



Fig. 2. Thiessen Polygon Area by Rainfall Gauges

영천댐 지점에서의 상류단 경계조건으로 적용하여 유출해석을 수행하였다. 그러므로 실제 유출모의에 적용된 영역은 금호 수위관측소 상류에서 영천댐 하류의 유역이며, 모의 대상 영역의 면적은 약 691km<sup>2</sup>이다. 본 연구의 강우자료 평가에서는 대상유역에 영향을 미칠 것으로 판단되는 14개 강우관측소(금호, 외촌, 영천, 산내2, 건천, 옥산, 고경, 기북, 기계1, 죽장, 화북2, 화산, 신령, 서부)의 강우자료를 Fig. 2와 같은 티센망을 이용해서 평균강우량으로 환산한 후 이를 레이더 강우자료와 비교 평가 하였다.

## 2.2 비슬산 강우레이더 자료

본 연구에서는 GRM 모형을 이용한 강우-유출 모의를 위한 수문자료로 국토교통부에서 비슬산에 설치한 S-밴드 이중편파 강우레이더로부터 추정된 강우자료를 활용하였다. 이중편파 강우레이더는 수평 및 수직 방향 편파 신호를 사용하여 눈, 우박, 물방울 등이 떨어지면서 공기저항에 의해 수직으로 넓어지는 형태를 구별

할 수 있으며, 수평반사도( $Z_{HH}$ ), 도플러속도( $V_r$ ), 스펙트럼 폭( $W$ ), 수직반사도( $Z_{VV}$ ), 차등반사도(differential reflectivity,  $Z_{DR}$ ), 비차등위상변이(specific differential phase,  $K_{DP}$ ), 교차상관계수(cross-correlation coefficient,  $\rho_{hv}$ ), 차등위상차( $\Phi_{DP}$ ) 등 총 8가지의 관측 자료를 산출한다. 본 연구에서는 국토교통부에서 제공하는 비슬산 이중편파 강우레이더 자료 중 비차등위상변이( $K_{DP}$ ), 수평반사도( $Z_{HH}$ ), 차등반사도( $Z_{DR}$ )를 R-KDP, R-Z, R-ZDR 관계식에 의해 추정된 강우 자료를 활용하였으며, 각각 다음 식에 의해 강우량을 추정한다(Jeon et al., 2012; Lee, 2013).

$$R(Z) = 1.7 \times 10^2 \times Z^{0.714} \quad (1)$$

$$R(Z_{DR}) = 6.7 \times 10^{-3} \times Z^{0.714} \times (Z_{DR})^{-3.43} \quad (2)$$

$$R(K_{DP}) = 44.0 |K_{DP}|^{0.822} \text{sign}(K_{DP}) \quad (3)$$

$$R(Z) < 6 \text{mm/h} \text{ 일 경우, } R = \overline{R(Z)} / f_1 \overline{R(Z_{DR})}$$

$$6 \text{mm/h} \leq R(Z) < 50 \text{mm/h} \text{ 일 경우,}$$

$$R = \overline{R(K_{DP})} / f_2 \overline{R(Z_{DR})}$$

$$50 \text{mm/h} < R(Z) \text{ 일 경우, } R = \overline{R(K_{DP})}$$

$$\text{여기서, } f_1(\overline{Z_{DR}}) = 0.4 + 5.0 |\overline{Z_{dr}} - 1|^{1.3}$$

$$f_2(\overline{Z_{DR}}) = 0.4 + 3.5 |\overline{Z_{dr}} - 1|^{1.7}$$

$$\overline{Z_{DR}} = 10^{0.1 \overline{Z_{dr}}(dB)}$$

국토교통부에서는 이중편파 강우레이더 자료로부터 추정된 강우량을 지상 강우관측소의 강우량과 보정하기 위하여 편의보정방법(mean field bias correction)을 활용하고 있으며, 이때 작은 값의 자료를 활용할 경우 비정상적인 G/R비(지상강우에 대한 레이더 강우의 비율)가 추정되는 것을 방지하기 위해서 1시간의 누적 G/R 비로 보정하였다(Yu et al., 2011; MLTMA, 2011). 이중편파 강우레이더로부터의 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 연구의 범위를 벗어난다. 이중편파 강우레이더의 이론적 배경과 비슬산 강우레이더에 대해서는 Ryzhkov et al. (2005)와 MLTMA (2011)를 각각 참고할 수 있다.

본 연구에서는 국토교통부에서 제공하는 R-KDP, R-Z, R-ZDR의 관계식에 의해 추정된 10분 간격의 강우레이더 자료를 활용하여 지상강우 대비 유역 평균 및 관측소별 강우량의 정확도를 분석한 후, 정확도가 비교적 우수한 강우추정식의 결과를 수문 모의에 적용하였다.

### 2.3 수문 모형 및 입력자료 구축

본 연구에서는 레이더 강우자료의 공간해상도에 따른 유출특성을 분석하기 위해서 분포형 모형인 GRM (Choi et al., 2010; Choi et al., 2012)을 이용하였다. GRM은 레이더 강우자료와 지형자료를 격자형식의 그리드 파일로 입력하며, 이때 두 자료는 동일한 해상도를 가진다. 본 연구에서는 200m × 200m, 500m × 500m, 1000m × 1000m 해상도의 지형자료와 레이더 강우자료를 구축하였으며, 해상도별로 유출해석을 수행하였다. 국토해양부에서 제공하는 레이더 강우자료의 강우해상도는 본래 250m × 250m이며, 수문 모형 적용을 위한 각각의 공간해상도 자료 구축을 위해 공1차 내삽법(bilinear interpolation)을 사용하였다.

지형자료는 금호강의 금호 수위관측소 유역에 대해서 30m × 30m 해상도의 DEM을 리샘플링(resampling)하여 해상도를 변화시킨 후, 지표면 지형분석을 통하여 구축하였다. DEM으로부터 구축된 지형자료는 해상도별 유역 경계, 흐름방향, 흐름누적수, 하천망 그리드 레이어이다. 또한 토지피복과 토양도는 환경부의 대부분류 토지피복도와 농업과학기술원의 정밀토양도를 이용하였으며, 각각에 대해서 해상도별 그리드 레이어를 구축하였다. 지형자료 구축 결과, 200m × 200m, 500m × 500m, 1000m × 1000m 해상도 별로 유역 평균경사는 각각 0.126, 0.074, 0.049, 하천간 총 길이는 719km, 401km, 237km, 하천 평균경사는 0.030, 0.017, 0.012로 경사는 완만해지고 하천 길이는 짧아지는 경향을 보였다.

본 연구에서는 수문자료로 비습산 강우레이더로부터 생성된 강우자료와 강우관측소에서 관측된 강우량 및 영천댐의 방류량을 적용하였다. 강우자료는 2012년 호우사상 중 비교적 강우량이 많은 4개의 호우사상을 선택하였으며, Table 1과 같다. Table 1에서의 평균강우량은 강우관측소 강우량의 경우 본 연구에서 적용된 강우관측소 14개로부터 관측된 강우량을 디센가중법을 이용해서 평균강우량으로 환산한 것이며, 강우레이더로부터 생성된 강우량인 R-KDP, R-Z, R-ZDR의 평균강우량은 유역내 격자강우량의 합을 격자의 개수로 나누어서 계산하였다. 영천댐의 방류량은 시계열 값으로 입력되며, 본 연구의 4개 수문사상과 동일한 기간의 방류량을 유출해석에 적용하였다.

### 2.4 PEST 매개변수 최적화 모형

PEST (model-independent parameter estimation)는 비선형함수의 매개변수 최적화 및 불확실성 분석 모형으로(Doherty, 2003, 2009), 지하수 흐름 해석 모형의 매개변수 추정에 주로 사용되어 왔으며, 최근 지표수 해석 모형에 대해서도 적용이 확대되고 있다 (Kim, 2007a; Noh et al., 2013). PEST는 매개변수 최적화 방법으로 개선된 Levenberg-Marquadt 기법을 사용하며, SCE-UA 등 기존 매개변수 최적화 모형에 비해 비교적 적은 반복 계산에 의해 매개변수를 추정할 수 있어 효율성 면에서 장점을 가진다. PEST는 추정하고자하는 매개변수 및 목적함수 계산에 사용되는 모형의 출력이 텍스트 형식이고, 도스 방식으로 외부에서 모형의 실행파일을 조절할 수 있는 조건을 만족할 경우, 모형의 종류와 관계없이 적용이 가능하다. 실제 측정 자료를 구하기 어렵거나 불확실성이 높아 최적화가 요구되는 매개변수를 GRM 모형에서 자동 보정 가능한 매개변수는 토양 투수계수, 토양 공극률, 토양심, 토양 습윤 전선 흡인수, 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, 공간해상도가 매개변수 추정에 미치는 영향을, PEST를 통해 분석하였다.

### 2.5 공간해상도 영향 평가 방법

레이더 강우 및 분포형 모형의 공간해상도가 매개변수 추정 및 강우-유출 해석에 미치는 영향을 검토하기 위해, 1) R-KDP, R-Z, R-ZDR 세 가지 레이더 추정 강우를 지상 관측 강우와 비교평가하여 강우-유출 모의에 적용할 레이더 강우를 선정하고, 2) 금호강 유역에 대해 200m, 500m, 1000m 공간해상도의 GRM 모형을 구축하고 4개의 대상 호우사상에 대해 PEST로 최적 매개변수(초기 토양 포화도, 지표면 조도계수 및 토양 투수계수의 보정계수)를 각각 추정하여 강우-유출 해석의 정확도 및 매개변수의 변동성을

Table 1. Applied Rainfall Events and Observations

Event	Period	Cumul. rainfall of areal average(mm)				Flood peak(m <sup>3</sup> /s)
		Ground	Rain radar			
			R-KDP	R-Z	R-ZDR	
Event1	2012/07/13 02:00 - 2012/07/15 12:00	74.07	80.96	71.57	85.48	319
Event2	2012/08/12 17:00 - 2012/08/13 23:50	66.88	73.87	64.05	83.36	190
Event3	2012/08/22 22:00 - 2012/08/24 18:00	148.46	152.44	126.27	142.26	834
Event4	2012/09/15 18:00 - 2012/09/17 14:00	147.12	128.68	120.22	129.84	1789

평가하였다. 또한, 서로 다른 공간해상도의 모형에 대해 보정된 매개변수를 각각 적용하여 강우-유출 해석에 미치는 영향을 검토하였다. 유출량의 모의 정확도 비교는 Nash-Sutcliffe 효율계수 (Nash-Sutcliffe efficiency; NSE)와 평균제곱근오차(root mean square error; RMSE)를 적용하였고 레이더 강우 자료 분석에서는 상관계수와 표준화된 RMSE (normalized RMSE; nRMSE)를 추가적으로 비교하였으며, 다음의 식을 각각 적용하였다.

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

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

$$nRMSE = RMSE / \overline{Q_{obs}} \quad (6)$$

$$CC = \left[ \sum_{t=1}^T (Q_{obs}^t - \overline{Q_{sim}})(Q_{obs}^t - \overline{Q_{obs}}) / T \right] / (\sigma_{sim}\sigma_{obs}) \quad (7)$$

여기서, t: 시간, T: 전체 관측 시계열의 수,  $Q_{obs}^t$ : 관측,  $Q_{sim}^t$ : 모의(혹은 레이더 강우),  $\overline{Q_{obs}}$ : 관측 평균,  $\overline{Q_{obs}}$ : 모의(혹은 레이더 강우) 평균,  $\sigma_{sim}$ :모의(혹은 레이더 강우) 표준편차,  $\sigma_{obs}$ :관측 표준 편차이다.

### 3. 레이더 강우 자료 평가

#### 3.1 유역 평균 강우량 평가

비슬산 강우레이더로부터 생성된 강우자료를 강우관측소 자료와 비교함으로써 강우레이더 자료의 특성을 평가하고자 한다. 강우 자료의 평가는 유역 평균강우량과 지점 강우량에 대해서 수행되었다. 강우관측소의 평균강우량은 본 연구에서 적용한 14개 강우관측소 강우량을 티센가중법을 이용하여 평균강우량으로 환산하였으며, 강우레이더 자료의 평균강우량은 200m 공간해상도를 가지는 R-KDP, R-Z, R-ZDR를 이용하여 산정하였다.

Fig. 3과 Table 2는 4개의 강우사상에 대해서 R-KDP, R-Z, R-ZDR의 평균강우량을 강우관측소 평균강우량과 비교한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 누적평균강우량의 분포는 4개의 사상에서 모두 강우관측소와 유사한 형태로 증가하는 것으로 나타났으나, Event 2는 다른 사상에 비해서 강우관측소 강우량과 상대적으로 큰 차이를 보였다. Table 2에서 Event 2는 R-KDP, R-Z, R-ZDR에 대한 NSE, CC, nRMSE의 평균값으로 각각 0.44, 0.70, 0.12를

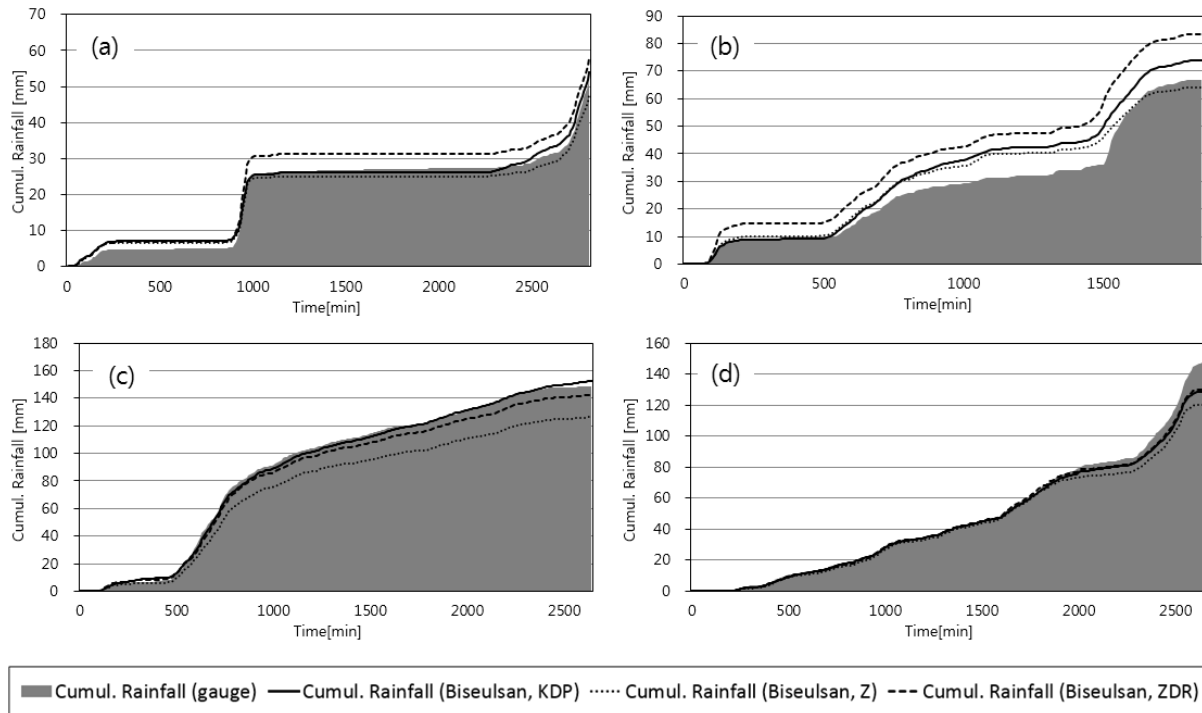


Fig. 3. Cumulative Areal Averaged Rainfall for Each Event. (a) Event1, (b) Event2, (c) Event3, and (d) Event4.

Table 2. Statistical Values of Rain Radar Compared with Rain Gauge (Areal Average Rainfall Data).

Event	R-KDP			R-Z			R-ZDR			Ave.		
	NSE*	CC**	nRMSE***	NSE	CC	nRMSE	NSE	CC	nRMSE	NSE	CC	nRMSE
Event1	0.90	0.95	0.04	0.88	0.94	0.04	0.90	0.96	0.04	0.89	0.95	0.04
Event2	0.53	0.73	0.11	0.51	0.71	0.11	0.29	0.66	0.14	0.44	0.70	0.12
Event3	0.81	0.90	0.08	0.78	0.90	0.09	0.78	0.88	0.09	0.79	0.89	0.09
Event4	0.80	0.92	0.07	0.89	0.75	0.08	0.81	0.91	0.07	0.83	0.86	0.07
Ave.	0.76	0.88	0.08	0.77	0.83	0.08	0.70	0.85	0.09	0.74	0.85	0.08

\* NSE : Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient

\*\* CC : correlation coefficient

\*\*\* nRMSE : dimensionless normalized root mean square error

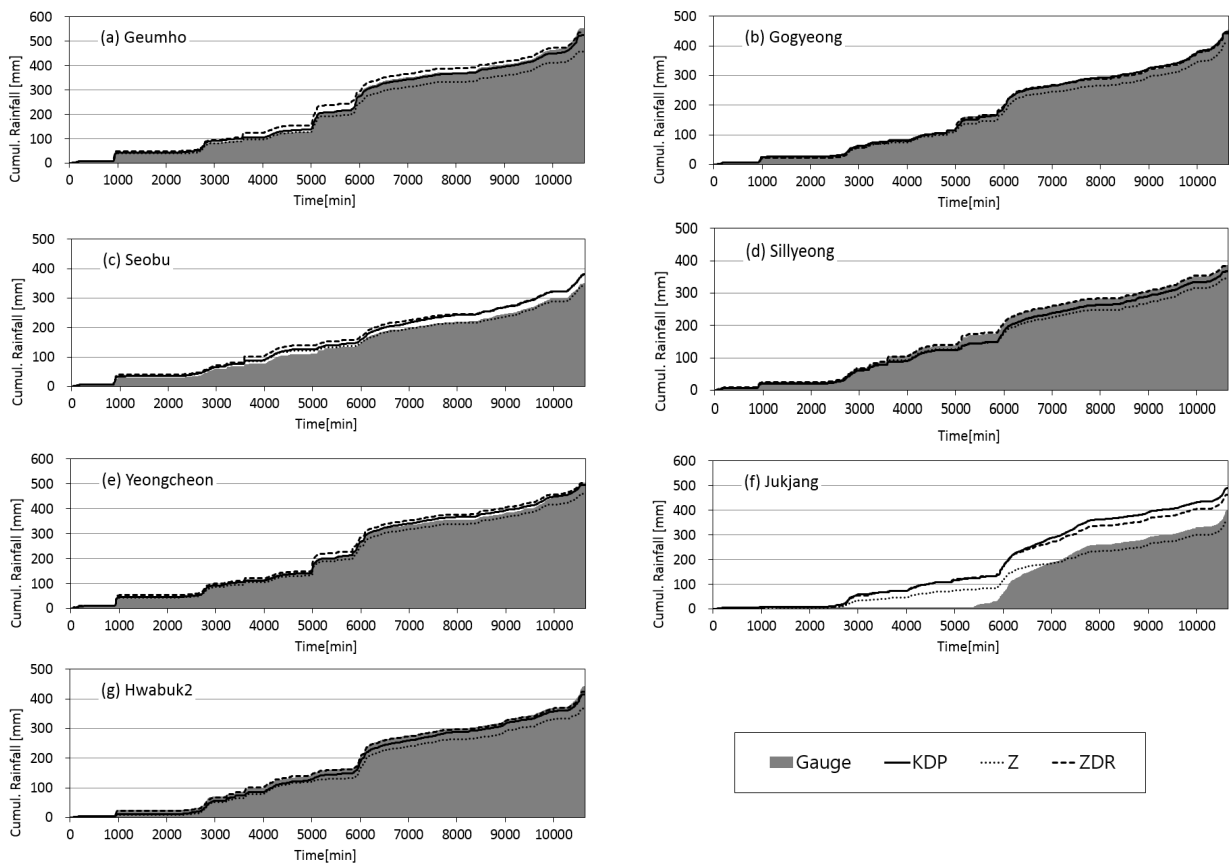


Fig. 4. Cumulative Rainfall for Each Rainfall Gauge

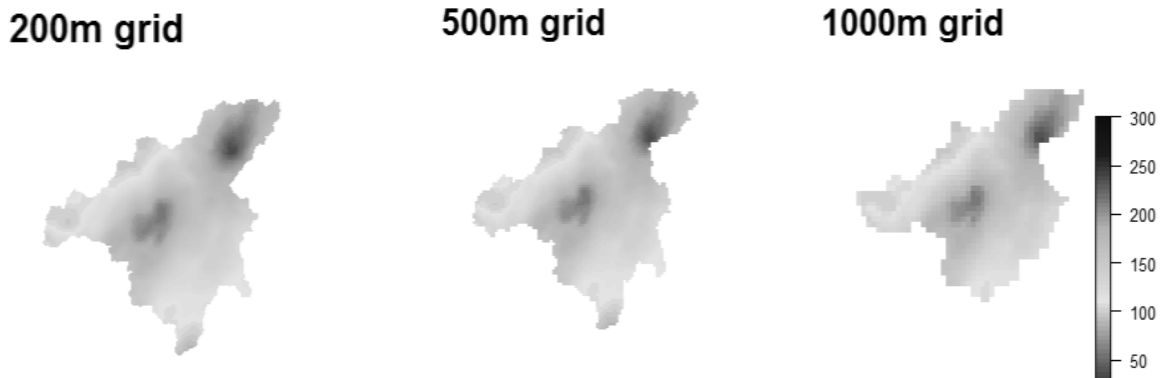
나타내고 있다. 또한 Fig. 3에서 Event 2를 제외한 3개의 사상에서 강우레이더는 강우관측소 강우량과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. Table 2에서 Event1, Event3, Event4는 NSE는 0.78 이상, CC는 0.75 이상, nRMSE는 0.09 이하의 값을 보임으로써 강우관측소 강우량과 유사한 값을 나타내고 있다. 강우레이더 자료에 따른 분석에서는 R-KDP와 R-Z가 R-ZDR에 비해서 양호한 결과를 나타내었다.

### 3.2 강우관측소 지점별 평가

강우관측소 지점별 강우량과 비습산 강우레이더 강우량의 비교는 대상유역인 금호 수위관측소 유역 내에 있는 7개 강우관측소(금호, 고경, 서부, 신령, 영천, 죽장, 화북2)에 대해서 평가하였다. 이때 강우레이더 자료는 200m 해상도를 가지는 R-KDP, R-Z 및 R-ZDR을 이용하였다. 강우레이더 강우량 자료로부터 7개 강우관측소와 동일한 위치에 있는 격자의 강우 시계열 자료를 4개의

**Table 3.** Statistical Values of Rain Radar Compared with Each Rain Gauge. Rainfalls from Rain Radar Are Cell Values of Radar Rainfall Fields Corresponding to the Positions of Rain Gauges

Rain gauge	R-KDP			R-Z			R-ZDR			Ave.		
	NSE	CC	nRMSE	NSE	CC	nRMSE	NSE	CC	nRMSE	NSE	CC	nRMSE
Geumho	0.72	0.85	0.05	0.63	0.80	0.05	0.59	0.80	0.06	0.65	0.82	0.05
Gogyeong	0.58	0.77	0.07	0.55	0.75	0.08	0.51	0.75	0.08	0.55	0.76	0.08
Seobu	0.46	0.70	0.10	0.64	0.36	0.10	0.24	0.66	0.11	0.45	0.57	0.10
Sillyeong	0.48	0.69	0.05	0.55	0.74	0.05	0.70	0.43	0.05	0.58	0.62	0.05
Yongcheon	0.76	0.87	0.03	0.60	0.78	0.04	0.47	0.76	0.05	0.61	0.80	0.04
Jukjang	0.28	0.64	0.11	0.37	0.64	0.10	0.12	0.57	0.12	0.26	0.62	0.11
Hwabuk2	0.6	0.77	0.06	0.54	0.74	0.06	0.70	0.84	0.05	0.61	0.78	0.06
Ave.	0.55	0.76	0.07	0.55	0.69	0.07	0.48	0.69	0.07	0.53	0.71	0.07



**Fig. 5.** Cumulative Rainfall Distribution with Varying Spatial Resolutions at Event 3 (22-24 Aug. 2012)

강우사상에 대해서 추출하였으며, 이를 강우관측소 강우량과 비교하였다.

Fig. 3에서 비슬산 강우레이더 강우량은 강우관측소 강우량과 대체적으로 유사한 시간분포를 보이고 있으나, 서부(Fig. 4(c))와 죽장(Fig. 4(f)) 강우관측소에 대해서는 상대적으로 큰 차이를 나타내고 있다. Table 3은 R-KDP, R-Z 및 R-ZDR 강우량을 강우관측소 강우량과 비교한 통계값을 나타낸 것이다. Table 3의 R-KDP, R-Z, R-ZDR의 지점별 강우량은 강우관측소 강우량과 비교하였을 때 NSE에서 평균 0.53, CC는 평균 0.71, nRMSE는 평균 0.07을 나타내고 있다.

Table 3의 결과를 유역 평균강우량을 평가한 Table 2와 비교하면, 지점별 레이더 강우자료는 강우관측소 강우량과 nRMSE에서는 유사한 값을 보이지만, NSE와 CC에서는 강우관측소 강우량과의 차이가 커지는 것으로 나타났다. 그러므로 강우레이더 자료를 활용할 때는 유역 평균강우량을 이용하는 경우와 강우장에 포함된 특정 격자의 강우 자료를 이용하는 경우를 구분할 필요가 있으며, 특정 격자의 강우자료에 대해서는 충분한 타당성 평가가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 공간해상도별 매개변수 추정 및 강우 유출 영향 평가

##### 4.1 공간해상도별 레이더 강우자료 구축

3절에서 유역 평균 및 관측소별 강우 비교 결과, 정확도 측면에서 비교적 우수한 결과를 보인 R-KDP 강우추정식에 의한 강우를 GRM 모형을 이용한 강우-유출 해석의 입력자료로 적용하였다. GRM 모형의 200m, 500m, 1000m의 공간해상도 별로 강우자료를 각각 생성하였으며, Event 3에 대해 공간해상도별로 생성된 자료의 누적강우량은 다음의 Fig. 5에서 보는 바와 같다. GRM 모형에서 구축된 유역 형상이 공간해상도별로 일부 차이가 있지만, 호우의 분포양상에서는 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 강우자료의 시간해상도는 10분으로, 공간해상도와 관계없이 동일하게 구축하였다.

##### 4.2 공간해상도 별 매개변수 추정 결과

200m, 500m, 1000m의 공간해상도 별로 구축된 수문모형의 적용 호우사상에 대한 매개변수 추정결과는 다음의 Fig. 6 and Table 4와 같다. 매개변수 추정은 초기 포화도, 토양 투수계수

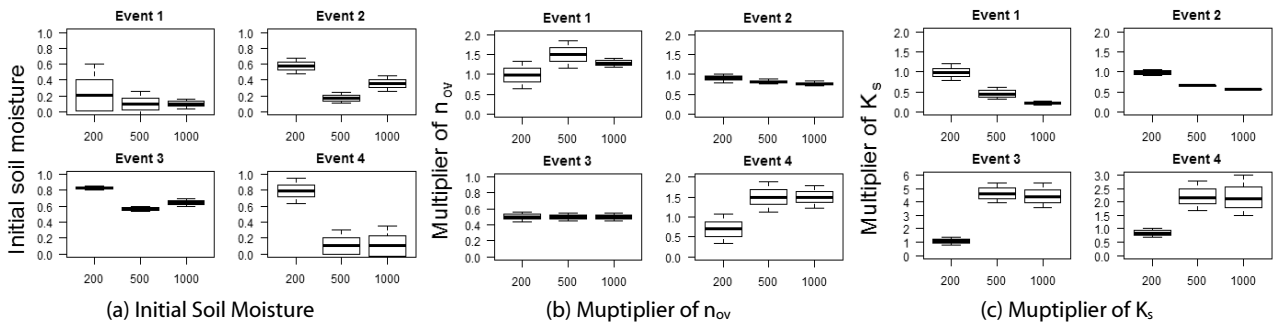


Fig. 6. Calibrated Parameters with Varying Spatial Resolutions by PEST

Table 4. Calibrated Parameters by PEST

Event	Parameters (95% confidence interval)	Spatial resolution		
		200m	500m	1000m
Event1	Initial soil moisture	0.21 (0.00~0.60)	0.10 (0.00~0.25)	0.10 (0.00~0.16)
	Multiplier of overland roughness	0.97 (0.63~1.3)	1.50 (1.15~1.84)	1.29 (1.17~1.40)
	Multiplier of soil hydraulic conductivity	0.97 (0.79~1.20)	0.44 (0.31~0.62)	0.22 (0.17~0.28)
Event2	Initial soil moisture	0.57 (0.47~0.67)	0.17 (0.11~0.24)	0.36 (0.26~0.45)
	Multiplier of overland roughness	0.91 (0.79~1.02)	0.82 (0.75~0.88)	0.77 (0.70~0.83)
	Multiplier of soil hydraulic conductivity	0.98 (0.90~1.06)	0.66 (0.64~0.68)	0.57 (0.55~0.58)
Event3	Initial soil moisture	0.83 (0.80~0.86)	0.59 (0.54~0.60)	0.64 (0.59~0.69)
	Multiplier of overland roughness	0.50 (0.44~0.56)	0.50 (0.46~0.54)	0.50 (0.45~0.55)
	Multiplier of soil hydraulic conductivity	1.04 (0.78~1.40)	4.61 (3.92~5.43)	4.38 (3.55~5.40)
Event4	Initial soil moisture	0.79 (0.64~0.95)	0.10 (0.00~0.30)	0.10 (0.00~0.35)
	Multiplier of overland roughness	0.69 (0.33~1.06)	1.50 (1.12~1.88)	1.5 (1.21~1.78)
	Multiplier of soil hydraulic conductivity	0.83 (0.67~1.03)	2.17 (1.69~2.78)	2.10 (1.48~2.99)

및 지표면 조도계수의 보정계수, 3개의 매개변수에 대해 각 공간해상도별 모형(3개) 및 호우사상(4개)에 대해 PEST를 통해 수행되었다(총 12개). 각 매개변수 추정의 최대최소 범위는 초기 포화도, 지표면 조도계수 및 토양 투수계수의 보정계수에 대해 0-1, 0.5-1.5, 0.5-5를 각각 적용하였다. Fig. 6에서 박스그림(boxplot)의 굵은 선은 최적 매개변수, 상하단의 막(bar)은 Table 4의 95% 신뢰구간을 각각 나타내며, 박스(box)는 최적값과 95% 신뢰구간의 중간값을 가리킨다. 초기 포화도 매개변수에 대한 추정 결과(Fig. 6(a)), 동일한 공간해상도에 대해 호우사상별로 일정한 패턴을 보이지 않았으며, 이는 초기 포화도가 선행 강우사상의 영향이 크기 때문으로 판단된다. 다만, 동일 호우사상에 대해 200m 공간해상도 모형이 500m, 1000m 모형에 비해 상대적으로 큰 초기 포화도 매개변수 값을 보였으며, 후속 연구가 요구되는 부분이다. 추정된 초기 포화도의 불확실도는 호우사상에 대해 다른 결과를 보였으며, Event 2와 3에서는 모든 공간해상도에서 불확실도 범위가 작았으나, Event 1, 4에서는 비교적 큰 불확실도 범위를 보였다. 지표면

조도계수의 보정계수에 대한 매개변수 추정 결과(Fig. 6(b)), 200m 공간해상도 모형은 각 호우사상별 최적값이 0.5-1.0 사이의 값을 보인 반면, 500m, 1000m 모형은 호우사상별로 0.5-1.5로 매개변수의 추정범위를 모두 포괄하는 큰 변동성을 보였다. 토양 투수계수의 보정계수에 대한 추정 결과에서도(Fig. 6(c)), 200m 공간해상도 모형은 각 호우사상별 최적값이 1 부근으로 추가적인 보정이 거의 필요치 않았으나, 500m, 1000m 모형은 호우사상별로 0.5-2.5 사이로 변동성이 컸다. 지표면 조도계수와 토양 투수계수의 보정계수에 대한 추정 매개변수의 불확실도 또한 호우사상에 따라 변동하였으며, 불확실성이 큰 Event 4의 결과를 제외하고 두 매개변수가 다른 경향을 보였다. 매개변수의 불확실도 범위가 공간해상도에 관계없이 호우사상별로 변동하는 것은 호우사상의 특징에 따라 매개변수 민감도가 변동하여 불확실성에 영향을 미치는 간접적인 증거로 볼 수 있으며, 향후 추가적인 연구가 필요하다.

Fig. 7에서 각 공간해상도별 호우사상별로 추정된 매개변수에 의해 모의된 금호지점에서의 수문곡선을 비교하였고, Table 5에서



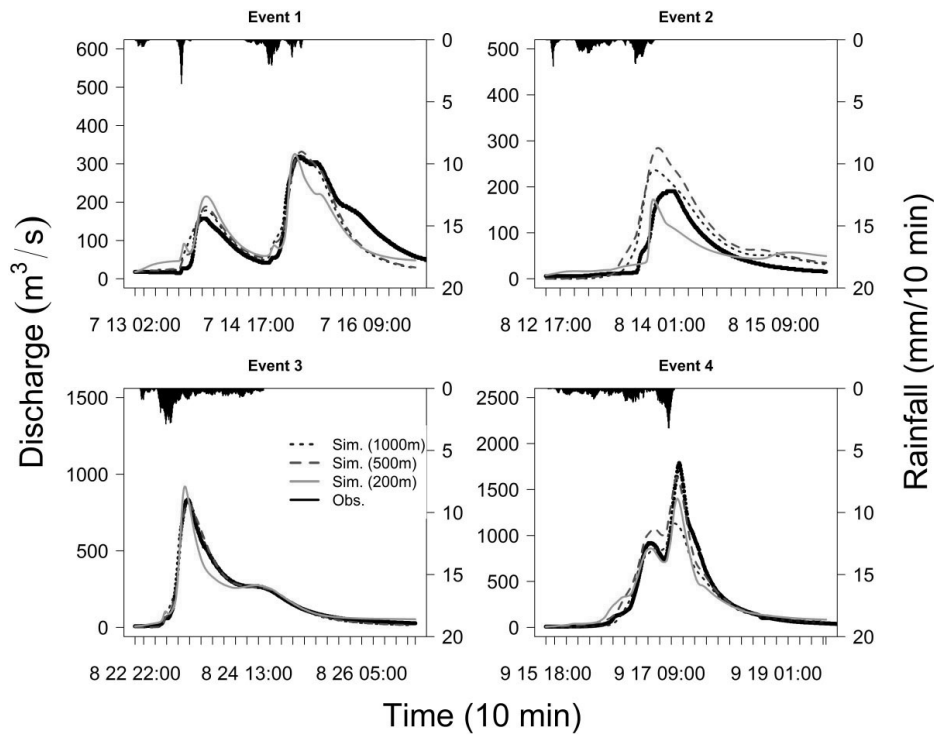


Fig. 7. Observed and Simulated Discharge with Varying Spatial Resolutions After Calibration

Table 5. Simulation Accuracy After Calibration

Event	Metrics	Spatial resolution		
		200m	500m	1000m
Event 1	NSE	0.768	<b>0.870</b>	0.838
	RMSE	44.1	<b>33.1</b>	36.9
Event 2	NSE	<b>0.713</b>	0.234	0.616
	RMSE	<b>29.5</b>	48.2	34.1
Event 3	NSE	0.952	0.993	<b>0.993</b>
	RMSE	44.3	17.1	<b>17.1</b>
Event 4	NSE	0.907	<b>0.945</b>	0.887
	RMSE	129.8	<b>100.1</b>	143.1

모의된 각 수문곡선모의 정확도를 비교하여 정확도가 높은 공간해상도의 값을 이탤릭체의 굵은 글씨로 표시하였다. Fig. 7에서 Event 1과 3에서는 각 공간해상도 모형의 결과가 비슷한 수문곡선의 양상을 보였으나, Event 2에서는 500m, 1000m 공간해상도 모형에서 첨두홍수량의 과대추정이, Event 4에서는 200m, 500m 모형에서 첨두홍수량의 과소추정이 발생하였다. 추가적인 매개변수 보정을 통해 모의 정확도 향상이 가능할 것으로 판단되나, 공간해상도의 영향 평가를 주로 다루는 본 연구의 범위를 벗어난다. 다만, Event 2의 첨두홍수량 과대추정은 다른 호우사상에 비해 상대적으로

누적강우량이 적고, 3.1 절의 분석에서 나타난 레이더 강우의 과대 추정과 관련성이 있는 것으로 보인다. 또한 Event 4의 첨두홍수량 과소추정은 금호 수위관측소의 수위-유량 관계곡선이 1500m³/s에서부터 외삽 구간에 해당하여, 이로 인한 불확실성과 연관이 클 것으로 판단된다. 모의 정확도 측면에서 매개변수 보정된 200m 공간해상도 모형의 수문곡선은 모든 호우사상에 대해 0.7 이상의 NSE 값을 보여 안정적인 모의 결과임을 확인할 수 있으며, 500m, 1000m 모형의 경우도, Event 2를 제외하면 0.8이상의 NSE값을 보여 적절하게 모의되었음을 통계적으로 뒷받침하였다. 보정된 공간해상도 모형의 정확도를 비교하면, 호우사상별로 가장 높은 정확도를 갖는 모형이 각각 상이하였으나, 그 차이는 크지 않았다. RMSE 결과는 NSE와 비슷한 결과를 보였다.

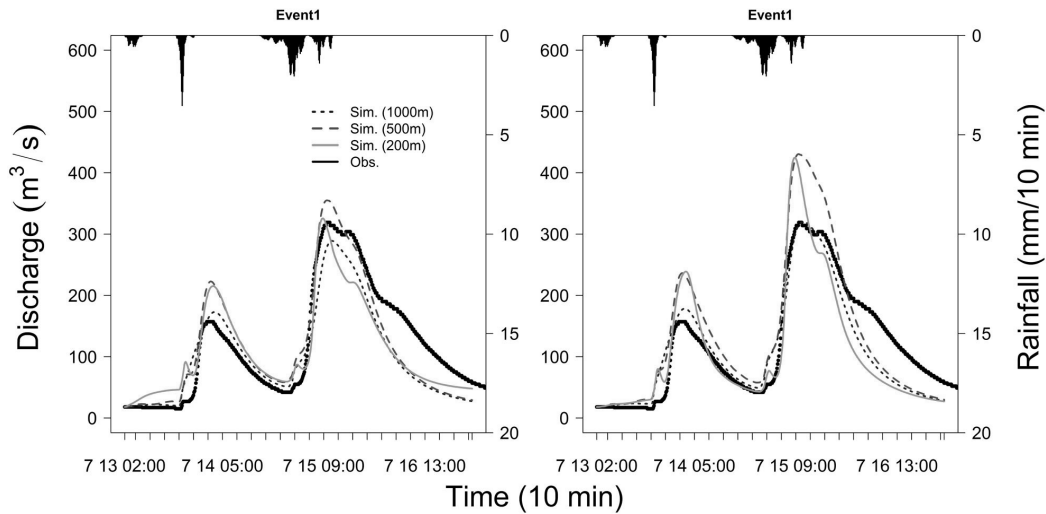
매개변수 추정 결과와 수문곡선, 정확도를 종합적으로 비교하면, 매개변수 보정을 통해 누적강우량이 큰 대부분의 호우사상에 대해 높은 정확도의 수문곡선을 재현할 수 있었다. 200m 공간해상도 모형의 경우, 호우사상별로 지표면 조도계수 및 토양 투수계수의 보정계수에 대한 추정값이 다른 공간해상도에 비해 큰 변화가 없는 안정적인 결과를 보인 반면, 500m, 1000m 공간해상도 모형의 경우, 최적의 수문곡선을 모의하기 위해 호우사상별로 상이한 매개변수의 적용이 필요하였다. 이에 매개변수의 안정성 측면에서 200m 공간해상도 모형이 다른 공간해상도 모형에 비해 우수함을

확인할 수 있었다. 또한, 본 연구에서 비교된 호우사상의 수와 대상유역이 다소 제한적이므로, 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 4.3 추정 매개변수의 공간해상도에 따른 민감도 영향 분석

각각의 공간해상도별 모형의 매개변수에 대한 민감도를 분석하기 위해 상이한 공간해상도 모형에 대해 추정된 매개변수를 각각 적용하여 수문곡선 및 모의 정확도의 변화를 분석하였다. 분석 대상은 200m, 1000m 공간해상도의 수문모형에 대해 추정된 매개변수를 다른 공간해상도 모형에 적용한 경우로 한정하였으며, 이때의 모의 수문곡선과 정확도는 각각 다음의 Figs. 8, 9 and Table

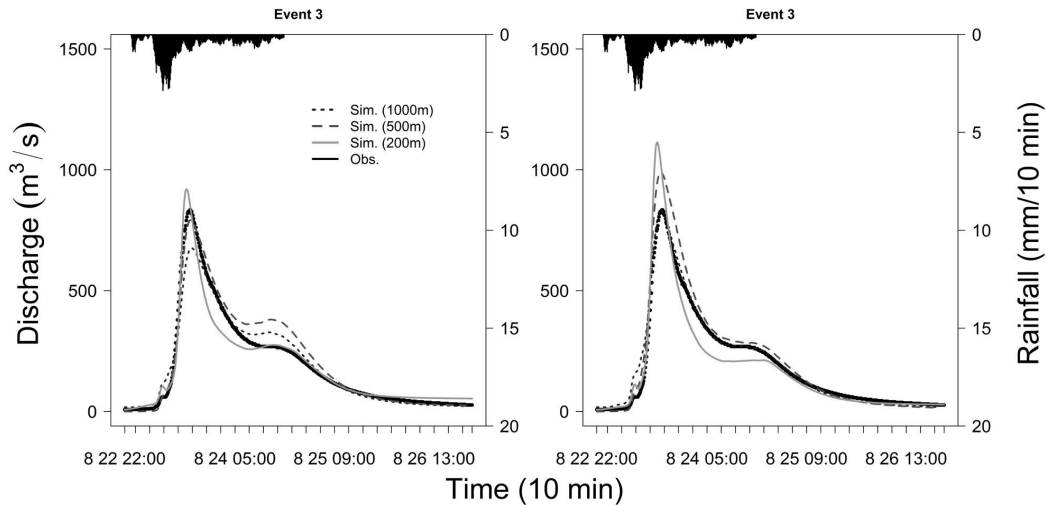
6과 같다. Fig. 8(b)에서 공간해상도 1000m 모형에 대해 추정된 매개변수를 200m, 500m 모형에 대해 적용하면, 첨두홍수량이 크게 증가하지만, Fig. 8(a)에서 공간해상도 200m 모형에 대해 추정된 매개변수를 500m, 1000m 모형에 대해 적용하면, 첨두홍수량 변화가 크지 않음을 알 수 있다. 이러한 특징은 다른 호우사상인 Event 3에 적용 결과에서도 비슷하였다. Fig. 9에서 보듯이, 200m 모형에 대해 추정된 매개변수를 500m, 1000m 모형에 대해 적용하면, 첨두홍수량 변화폭이 크지 않은 반면, 1000m 모형에 대해 추정된 매개변수를 200m, 500m 모형에 대해 적용하면, 첨두홍수량이 크게 증가하였다. Table 6에서 모의 정확도를 비교하면,



(a) Using Parameters Estimated for 200m

(b) Using Parameters Estimated for 1000m

Fig. 8. Observed and Simulated Discharge with Varying Spatial Resolutions in Event 1



(a) Using Parameters Estimated for 200m

(b) Using Parameters Estimated for 1000m

Fig. 9. Observed and Simulated Discharge with Varying Spatial Resolutions in Event 3

Table 6. Simulation Accuracy Using the Same Parameters for Different Resolutions

Event	Spatial resolution of parameter estimation	Metrics	Spatial resolution of application		
			200m	500m	1000m
Event1	200m	NSE	0.768	<b>0.823</b>	0.794
		RMSE	44.1	<b>38.6</b>	41.6
	1000m	NSE	0.681	0.688	<b>0.838</b>
		RMSE	51.7	51.2	<b>36.9</b>
Event3	200m	NSE	0.952	0.950	<b>0.954</b>
		RMSE	44.3	45.6	<b>43.6</b>
	1000m	NSE	0.885	0.924	<b>0.993</b>
		RMSE	68.8	55.8	<b>17.1</b>

1000m 공간해상도에 대해 보정한 매개변수를 각각 다른 공간해상도에 적용하면, 1000m 모형의 결과가 가장 정확하였다. 하지만, 200m 공간해상도에 대해 보정한 매개변수를 각각 다른 공간해상도에 적용하면, 200m 모형이 아닌 500m, 1000m 모형이 정확도가 높았으나, 그 차이는 크지 않았다.

4.2절의 매개변수 변동성과 본 절의 매개변수 민감도 영향을 함께 고려하여 분석하면, 200m 공간해상도 모형은 호우사상별 매개변수의 변동성은 크지 않은 반면(Fig. 6), 다른 공간해상도에 대해 추정된 매개변수를 적용할 경우, 침투홍수량의 변화가 크게 발생하였다(Figs. 8 and 9). 한편, 1000m 공간해상도 모형은 호우사상별 매개변수의 변동성이 크게 발생하였으나(Fig. 6), 매개변수 변동에 따른 유출수문곡선의 민감도는 비교적 크지 않았다(Figs. 8 and 9). 이로 부터, 200m 공간해상도 모형 적용시 호우사상별로 일정한 매개변수 적용이 가능하며, 안정적인 강우-유출 모의가 가능할 것으로 판단되나, 매개변수에 대한 수문곡선의 변동성이 크므로, 적용시 주의가 요구된다. 200m 공간해상도 모형의 높은 매개변수 민감도는 공간해상도 증가에 따라 수문해석을 위한 격자수의 증가와 연관이 있을 것으로 판단되나, 정확한 분석을 위해 후속 연구가 요구되는 부분이다. 본 연구에서 공간해상도 모형의 비교 대상으로 설정한 매개변수 변동성이나 민감도 이외에, 모의 수행 시간도 공간해상도에 큰 영향을 받는다. AMD 2.2GHz CPU가 탑재된 PC에서 3일간의 호우사상에 대해 강우-유출을 GRM 모형으로 모의하였을 때, 200m, 500m, 1000m 공간해상도 모형에 대해 각각 약 15분, 5분, 2분 정도의 모의 시간이 소요되었으며, 수십 회의 반복 계산이 소요되는 매개변수 추정에는 이에 비례하는 시간이 소요되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 레이더 강우와 분포형 수문모형의 공간해상도가 매개변수 추정 및 강우-유출 모의에 미치는 영향을 분석하였다. 레이더 강우는 비슬산 강우레이더에서 2012년 관측된 강우사상을 대상으로, R-KDP, R-Z, R-ZDR의 관계식에 의해 추정된 레이더 강우를 지상 관측 강우와 비교하였다. 비교 결과, 세 가지 강우 추정식에 의한 레이더 강우의 유역 평균 및 강우관측소 별 추정강우가 지상 관측 강우와 비교적 잘 일치하고, 강우 추정식에 따른 차이가 크지 않았으며, 이는 레이더 추정강우를 지상 관측 강우에 대해 편이 보정(bias correction)한 영향으로 판단되었다. R-KDP에 의한 추정 강우가 비교적 높은 정확도를 보였으며, 이를 강우-유출 모형의 입력자료로 적용하였다.

강우-유출 모형으로는 GRM (grid based rainfall-runoff model) 모형을 이용하여, 낙동강 수계 금호강 유역을 대상으로, 200m, 500m, 1000m의 공간해상도로 모형을 구축하였다. 또한, 범용 매개변수 최적화 모형인 PEST로 초기 포화도, 지표면 조도계수 및 토양 투수계수의 보정계수를 각 공간해상도 모형 및 호우사상별로 추정하였다. 매개변수 추정 결과, 200m 공간해상도 모형에서는 비교 대상 호우사상에 대해 지표면 조도계수와 토양 투수계수 관련 보정계수가 비교적 안정적으로 추정되었으나, 500m, 1000m 공간해상도 모형에서는 강우사상에 따라 최적 매개변수의 값의 변동이 크게 발생하였다. 또한, 200m와 1000m 공간해상도에 대해 추정된 매개변수를 다른 공간해상도에 적용한 결과, 1000m 공간해상도에 대해 보정된 매개변수를 200m 공간해상도 모형에 적용하면 침투 홍수량이 증가하는 경향을 보였다. 반면, 1000m 공간해상도 모형은 200m 모형에 대해 추정된 매개변수를 적용하여도 수문곡선의 변화가 크지 않았다.

레이더에 의한 강우추정 및 분포형 수문모형의 적용은 수문해석의 범위를 점 및 선 단위에서 면 단위로 확장할 수 있는 공학적 가능성을 가지고 있다. 하지만, 방대한 입력자료 및 매개변수 자료가 필요하고, 공간해상도 확장에 따라 매개변수 불확실성 및 모의시간이 증가하여 홍수예측 등 실무 적용에 어려움이 있었다. 본 연구에서 수행된 레이더 강우 및 모형의 공간해상도가 모형 매개변수 변동성에 미치는 영향을 평가하는 연구 방법론 및 결과를 토대로 적용 유역 및 호우사상을 확장한다면, 분포형 수문모형의 신뢰성 향상이 가능할 것으로 판단된다. 또한 본 연구와 관련된 후속 연구로는 공간해상도 별 매개변수의 민감도 변동 특성 및 미측정 매개변수의 공간특성 고려 방안 등에 대한 연구가 분포형 모형의 적용성 확장을 위해 필요할 것으로 예상된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(수문레이더 기반 홍수 예경보 및 폭설 추정 플랫폼 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 레이더 자료 구축에 도움을 주신 최찬규 연구원(한국건설기술연구원)께 감사드립니다. 또한, 원고의 보완을 위해 조언을 주신 익명의 심사위원분들께 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).
- 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. and 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- Kim, Y. S., Chang, K. H., Kim, B. S. and Kim, H. S. (2011). "Decision of GIS optimum grid on applying distributed rainfall-runoff model with radar resolution." *Journal of Korean Wetlands Society*, Korean Wetlands Society, Vol. 13, No. 1, pp. 105-116 (in Korean).
- Kwak, J. W., Kim, D. G., Hong, I. P. and Kim, H. S. (2009). "A study of progressive parameter calibrations for rainfall-runoff models." *Journal of Korean Wetlands Society*, Korean Wetlands Society, Vol. 11, No. 2, pp. 107-121 (in Korean).
- Kwon, H. H., Moon, Y. I., Kim, B. S. and Yoon, S. Y. (2008). "Parameter optimization and uncertainty analysis of the NWS-PC rainfall-runoff model coupled with bayesian markov chain monte carlo inference scheme." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 28, No. 4, pp. 383-392 (in Korean).
- Lee, C. K. (2013). "Operation and application of observation network of KLTMA rainfall radar." *Magazine of IEEK*, IEEK, Vol. 40, No. 2, pp. 32-40 (in Korean).
- Ministry of Land, Transportation, and Maritime Affairs (2011). *Development of rainfall estimation and analysis optimization system of the bisl-san rainfall radar* (in Korean).
- Noh, S. J., Choi, Y., Choi, C. and Kim, K. (2013). "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 (in Korean).
- Yoo, C., Kim, J., Chung, J. H. and Yang, D. (2011). "Mean field bias correction of the very-short-range-forecast rainfall using the kalman filter." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 3, pp. 17-28 (in Korean).