

## 충주댐 유역 홍수추적을 위한 소백산 레이더 강우자료의 적용성 검토\*

안소라<sup>1</sup> · 박혜선<sup>1</sup> · 한명선<sup>2</sup> · 김성준<sup>1\*</sup>

## Applicability of Sobaek Radar Rain for Flood Routing of Chungju Dam Watershed\*

So-Ra AHN<sup>1</sup> · Hye-Sun PARK<sup>1</sup> · Myoung-Sun HAN<sup>2</sup> · Seong-Joon KIM<sup>1\*</sup>

### 요 약

본 연구는 충주댐 유역(6,625.8km<sup>2</sup>)을 대상으로 지점강우와 소백산 이중편파 레이더강우자료를 격자기반 분포형 강우-유출 모형인 KIMSTORM(KIneMatic wave STOrM Runoff Model)에 적용하여 홍수추적을 수행하여 레이더의 적용성을 검토하였다. 2012년 4개의 강우 이벤트(집중호우, 카눈, 불라벤, 산바)에 대하여 한강홍수통제소로부터 보정된 소백산 레이더 강우자료를 제공받아 사용하였다. 레이더 강우와 지점 강우를 비교분석한 결과, 41개 지점의 지상강우보다 레이더의 면적평균강우량을 비교한 결과, 강우의 시공간적 패턴은 상당히 일치하였고 지상강우에 대한 레이더 강우의 비율은 0.97로 분석되었다. 이후 분포형 홍수추적을 위해 KIMSTORM을 이용하였으며, 격자크기 500×500m 해상도의 198행×231열의 총 45,738개의 셀로 모형을 구축하였다. KIMSTORM 모형의 보정 결과, 평균 R<sup>2</sup>(coefficient of determination), ME(model efficiency), VCI(volume conservation index)는 지상강우의 경우, 각각 0.83, 0.68, 1.10로 분석되었고, 레이더강우의 경우는 각각 0.80, 0.62, 1.08의 결과를 보였다.

주요어 : 분포형 강우-유출모형, KIMSTORM, 홍수추적, 지상강우, 이중편파 레이더

### ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the availability of dual-polarization radar rain for flood routing in Chungju Dam watershed(6,625.8km<sup>2</sup>) using KIMSTORM

2014년 1월 17일 접수 Received on January 17, 2014 / 2014년 3월 7일 수정 Revised on March 7, 2014 / 2014년 3월 12일 심사완료 Accepted on March 12, 2014

\* 본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(수문레이더 기반 홍수예경보 및 폭설 추정 플랫폼 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 강우레이더 통합운영센터의 자료협조에 감사드립니다.

1 건국대학교 사회환경시스템공학과 Department of Civil & Environmental System Engineering, Konkuk University

3 한국건설기술연구원 수자원연구실 Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology

※ Corresponding Author E-Mail : kimsj@konkuk.ac.kr

(Grid-based KInEMatic wave STOrM Runoff Model). The Sobaek dual-polarization radar data for 1 heavy rain and 3 typhoon(Khanun, Bolaven, and Sanba) events in 2012 were obtained from Han River Flood Control Office. The spatio-temporal patterns between the two data were similar showing the ratio of radar rain to ground rain with 0.97. The KIMSTORM was set to  $500 \times 500\text{m}$  resolution and a total of 45,738 cells(198 rows  $\times$  231 columns) for the watershed. For radar rain and 41 ground rains, the model was independently calibrated using discharge data at 3 streamflow gauging stations(YW1, YC, and CJD) with coefficient of determination( $R^2$ ), Nash and Sutcliffe Model Efficiency(ME), and Volume Conservation Index(VCI). The  $R^2$ , ME, and VCI 0.80, 0.62 and 1.08 for radar rain and 0.83, 0.68 and 1.10 for ground rain respectively.

**KEYWORDS :** *Distributed Rainfall-Runoff Model, KIMSTORM, Flood Routing, Ground Rainfall, Dual-Polarization Radar*

## 서 론

우리나라는 국토의 약 70%가 산지로 이루어져 있으며 급경사지가 주를 이루는 산지하천의 경우 호우시에는 하천 범람에 의한 침수나 유출피해의 발생위험이 높고 집중호우 발생시에는 2차적인 재해 발생 위험성도 큰 편이다. 산지하천 유역의 홍수피해 양상은 다양하나 돌발홍수시에는 산사태 등의 대규모 피해로 나타난다. 또한, 전체 강우량의 절반 이상이 6월에서 9월 사이에 집중되고, 장마 및 태풍의 영향, 기상이변에 따른 집중호우, 돌발성 호우로 인하여 심각한 인명 손실 및 경제적 피해를 입고 있다(Kang *et al.*, 2007). 이러한 홍수피해를 경감하기 위해서는 수문학적 중요인자인 강우의 시간적, 공간적인 특성의 파악 및 신속하고 정확한 홍수예보가 매우 중요하다. 레이더는 수백 km 반경 내에서 대기의 상태를 수초의 시간간격과 수백m의 공간 분해능으로 3차원 관측할 수 있는 유일한 장비이기 때문에 국지규모 강수 관측에 적합하기 때문에 국지규모 강수 관측에 적합하다(Ha *et al.*, 2002). 이 때문에 정확한 홍수예보를 위해 레이더강우자료의 활용성이 대두되고 있으며, 우리나라에서도 홍수

예보모형의 입력자료로 활용하고 있지만 아직 연구 초기단계라고 할 수 있다.

레이더강우 관련 연구는 레이더가 기상 관측에 활용된 이래 전 세계적으로 다양한 연구가 활발하게 진행되고 있는 상황이다. Marshall and Palmer(1948)에 의해 제안된 Z-R방정식을 이용한 강우입자의 크기를 규명하는 연구를 시작으로 이후 많은 연구자에 의해 연구가 이루어졌다. Hitchfeld and Bordan(1954)은 레이더로부터 얻은 강우량을 보완하기 위해서는 지상강우 관측의 중요성을 강조하였고, Wilson and Brandes(1979)는 레이더의 반사도 측정자료와 지상의 강우 관측소에서의 강우량 자료를 연계한 Z-R 관계식을 이용하여 레이더 자료의 공간적 분포를 정량적인 강우량으로 변환하는 연구를 수행하였다. Collier(1986)는 지상강우를 이용하여 보정된 레이더강우를 이용하는 것이 지상강우관측만을 이용하는 것보다 더 정확함을 보였다. Bringi and Chandrasekar(2001)는 레이더를 이용하여 강우를 추정하는 방법 등을 제안하였다.

한편 국내에서는 레이더강우를 홍수유출 분석에 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다. Kim *et al.*(2009)은 기상청 레이더강우자료를 이용하여 내린천 유역을 대상으로 Vflo 모형을 이용한 홍수유출 모의를 수행하였고, Park *et*

al.(2008)은 S-band 진도레이더 자료를 이용하여 Vflo 모형에 적용하여 용담댐유역의 홍수 유출분석을 수행하였다. Bae *et al.*(2010)은 안성천 유역을 대상으로 칼만필터 기법을 이용하여 지상 강우와 레이더강우를 조합하여 Vflo 모형과 ModClark 모형에 적용한 뒤 홍수유출을 모의하였고, Hong *et al.*(2010)은 지상강우와 광덕산 레이더를 이용하여 Vflo 모형으로 유출모의를 수행하였으며, 강우의 시공간적인 활용측면을 연구하였다. Kim *et al.*(2011)은 내린천 유역을 대상으로 광덕산 레이더자료를 ModClark 모형에 입력하여 레이더강우의 500m~10km 해상도별 유출량 모의를 수행하여 비교분석하였고, Noh *et al.*(2012)은 비슬산 레이더를 Vflo 모형에 적용하여 낙동강 감천유역의 홍수모의를 수행하였다. 최근 Ahn *et al.*(2013)의 연구에서는 남강댐유역을 대상으로 비슬산 레이더를 이용하여 지상 강우관측소와 비교분석하여 정확도를 분석하였고, 분포형 모형인 KIMSTORM에 적용하여 홍수모의를 수행한 바 있다. 이와 같이 분포형 강우-유출모형을 이용한 유출량 산정에 레이더 강우자료를 적용하는 사례가 많아지고 있다. 최근 국토해양부의 레이더 구축 사업과 더불어 레이더의 적용성을 검토하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이중 소백산 이중편파 레이더는 최근에 설치되어 아직 적용성을 검토한 사례가 많지 않다.

본 연구에서는 지상강우자료와 최근 설치되어 운영되고 있는 소백산 레이더강우자료를 비교분석하고, 격자기반 분포형 강우-유출모형인 KIMSTORM에 적용하여 대상유역인 충주댐유역 내에서의 유출해석을 수행하고 소백산 레이더강우의 적용 가능성을 평가하고자 한다.

### KIMSTORM 모형의 개요

본 연구에서 적용한 KIMSTORM 모형은 Kim(1998)이 개발하여 그동안 여러 규모의 유역에 적용하여 평가된 바 있는 격자기반 분포형 강우-유출모형 KIMSTORM(Grid-based KIneMatic wave STORM Runoff Model)을 개선한 Mod-KIMSTORM (Jung *et al.*, 2008)의 최신버전이다. KIMSTORM 모형은 대상유역을 일정한 크기의 격자로 구성하고, 각각의 셀에 대한 지형, 지표 및 토양의 물리적인 특성들을 매개변수로 주어진 시간간격별로 침투, 침루, 지표 및 지표하 유출, 기저유량을 계산한 다음 격자물수지법에 의해 흐름경로를 따라 인접 셀들로부터의 유입과 중심 셀에서의 유출에 대한 물수지를 계산함으로써 유역의 전반적인 수문량에 대한 시간적인 변화와 공간적인 분포를 파악할 수 있는 격자 물수지 방식의 분포형 모형이다(Jung *et al.*, 2010). 모형의 격자물수지 구조는 그림 1과 같다.

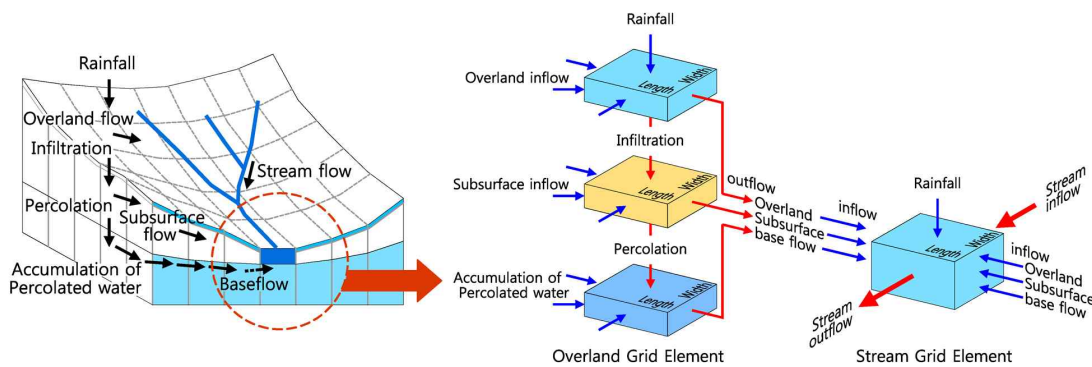


FIGURE 1. The water balance components of KIMSTORM(Jung *et al.*, 2008)

## 대상유역 및 자료

### 1. 대상유역

본 연구에서는 충주호를 포함하는 충주댐 상류부 유역을 대상유역으로 선정하였다(그림 2). 충주댐 유역은 소백산 레이더 관측소에서 반경 100km 내에 북쪽으로 치우쳐 위치해 있다. 유역면적은 6,625.8km<sup>2</sup>, 평균표고는 616.7EL.m, 평균경사는 14.2%로 우리나라 북동부 산악지역에 위치해 있다. 충주댐 유역은 연평균 강수량 1,198mm이며, 산림면적은 5,505.4km<sup>2</sup>로 전체 유역면적의 83.1%를 차지하고 있다. 유역 내에 위치한 충주호는 한강유역에서 소양호에 이어 두 번째로 큰 규모인 27억 5000만 톤의 저수능력을 갖추고 있으며, 연평균 유입량 4,888백 만m<sup>3</sup>으로 남한강 하류 및 한강 본류에 이르는 홍수조절에 기여하고 있다.

### 2. GIS 자료

모형구동을 위해서는 DEM, 흐름방향도, 토지피복도, 유효토심도, 토양종류도, 유역경계가 필수 GIS 자료로 입력된다. 각각의 GIS 입력 자료는 ESRI ArcInfo S/W를 이용하여 격자크

기 500×500m 해상도의 ESRI ASCII Grid 형식으로 구축하였고, 198행×231열의 총 45,738개의 셀로 구성되었다. DEM은 STRM DEM을 이용하였으며, ASCII GRID형식의 데이터를 GIS 소프트웨어를 이용하여 좌표계는 Bessel TM, 해상도는 500m로 재배열하여 DEM을 구축하였다(그림 3a). 흐름방향도는 FLOWDIRECTION 함수를 이용하여 DEM으로부터 구축하였으며(그림 3b), 토지피복도는 1/25,000 환경부 자료를 이용하였고, 8개 토지피복항목(수역, 시가지, 나지, 습지, 초지, 논, 밭, 산림)을 구성되었다(그림 3c). 토양관련 매개변수는 농촌진흥청 농업과학기술원 1/25,000 정밀토양도를 이용하였고, 미국농무성의 삼각도표를 기준으로 대상유역에 대한 토성을 파악하였다(그림 3d and 3e). 마지막으로 지상강우와 레이더강우의 비교분석 및 모형의 보정을 위한 유역경계는 수위관측소를 기준으로 3개의 유역(YW1, YC, CJD)으로 분할하였다(그림 3f).

### 3. 강우 및 유량자료

모형의 보정을 위하여 시단위 강우, 수위, 유량, 댐유입량 자료를 2012년 7월부터 9월까지

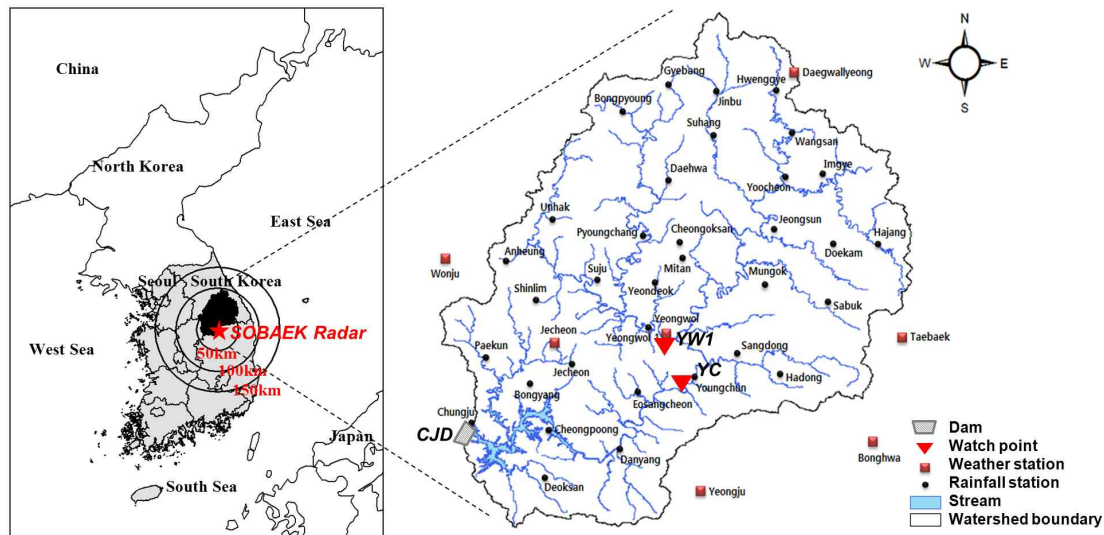


FIGURE 2. Study area

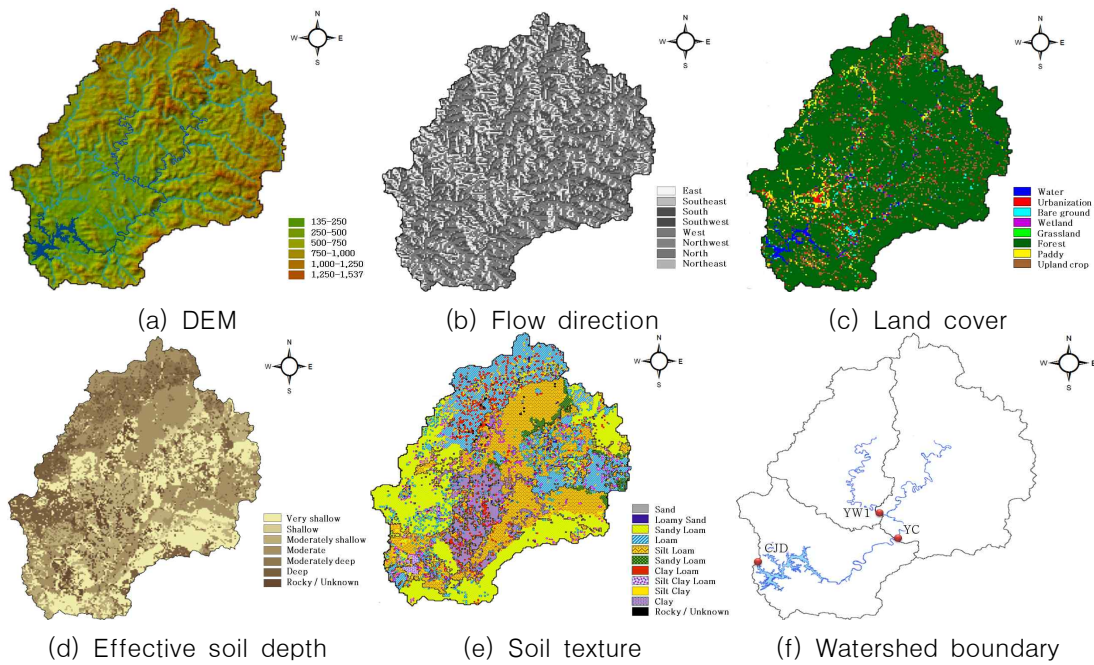


FIGURE 3. GIS input data

의 기간에 대하여 수집하였다(표 1). 강우자료로 대상유역의 총 41개 관측소(국토해양부 1개, 수자원공사 33개, 기상청 7개) 지점의 시간위 강우자료를 수집하였다(그림 2). 수집된 지상강우자료는 IDW(Inverse Distance

Weighting) 기법으로 공간내삽하여 사용하였으며, 2012년 1개의 집중호우(Heavy Rain)와 3개의 태풍사상인 카눈(Khanun), 볼라벤(Bolaven), 산바(Sanba)를 강우이벤트로 선정하였다. 유량자료로 한강홍수통제소에서 제공하

TABLE 1. Characteristics of selected events

Event	Date of event	Watch point	Rainfall amount (mm)	Maximum intensity (mm/hr)	Duration (hr)
Heavy rain	2012.07.05. 15:00 ~ 2012.07.12. 06:00	YW1	214.8	20.0	47
		YC	195.7	19.3	47
		CJD	198.6	19.7	47
Khanun	2012.07.13. 04:00 ~ 2012.07.18. 22:00	YW1	130.3	15.3	85
		YC	134.9	15.3	85
		CJD	128.6	13.2	85
Bolaven	2012.08.20. 19:00 ~ 2012.09.15. 16:00	YW1	268.7	15.6	378
		YC	258.6	15.6	378
		CJD	267.6	14.4	378
Sanba	2012.09.16. 07:00 ~ 2012.09.24. 04:00	YW1	51.5	5.8	55
		YC	94.8	12.3	55
		CJD	83.6	11.1	55

YW1 = Yeongwol1, YC = Yeongchun, CJD = Chungju Dam

는 충주댐 유역 내 영춘 지점의 시단위 유량자료 및 한국수자원공사에서 제공하는 충주댐의 시간당 댐 유입량자료를 수집하여 이용하였다.

#### 4. 레이더강우자료 및 처리

본 연구에서 이용한 소백산 레이더는 2011년 11월 15일에 개소되어 관측을 실시하고 있다. 소백산 레이더는 남한강 및 낙동강상류 유역의 강우관측 및 홍수예보를 위해 설치되었으며, 충청북도 단양군 대강면 용부원리 산13-1번지(소백산 제2연화봉 1,357EL.m)에 위치하고 있다. 소백산 레이더는 S-band 이중편파 강우레이더로 관측반경이 100km에 이르며, 관측주기는 2분 30초이다. 2012년 7월 1일 01시부터 2012년 9월 30일 23시까지의 소백산 레이더강우자료를 250m 해상도, 1시간 간격으로 한강홍수통제소로부터 제공받았다.

레이더 강우의 처리를 위해 LCC(Lambert Conformal Conic Projection)를 이용해서 구한 위경도를 가지는 3차원의 구면으로 된 좌표를 Bessel TM(Transverse Mercator) 2차원의 직교좌표체계로 투영하였다. 이후 제공받은 자료를 분포형 모형의 입력자료 해상도와 동일한 격자크기(500m)로 ArcGIS를 이용하여 재구축하였다.

Ahn *et al.*(2013)의 연구에서는 남강댐유역

을 대상으로 비슬산 레이더 강우를 이용하였고, 본 연구에서는 충주댐유역을 대상으로 소백산 레이더 강우를 이용하였다. 두 유역 모두 각각의 레이더 관측소 100km 반경 내에 위치하고 있으나, 유역의 크기는 충주댐유역이 3배가량 큰 특징이 있다. 본 연구에서 분석을 위해 선정된 카눈(Khanun), 볼라벤(Bolaven), 산바(Sanba)의 3개의 태풍사상은 Ahn *et al.*(2013)의 연구와 동일한 강우 이벤트이다. 태풍의 진행방향은 북상하는데 경로는 3개의 태풍모두 북상하면서 동쪽으로 움직이는 형태를 보인다. 즉 남강댐 유역은 태풍이 북상하기 시작하는 지점에, 충주댐 유역은 태풍이 지나가는 끝 지점에 위치하고 있다.

## 결과 및 고찰

### 1. 지상강우와 레이더강우 비교

소백산 레이더강우와 지상강우를 비교분석하기 위해 4개의 강우사상(집중호우, 카눈, 볼라벤, 산바)에 대하여 충주댐 유역의 면적평균 강우량, 면적평균 누가강우량 및 강우 공간분포도를 분석하였다. 표 2에는 유출량산정 지점별(3개 유역) 면적평균 강우량을 비교하여 충주댐 유역의 면적평균 강우량 비교결과를 나타내었다. 집중호우, 태풍 카눈, 볼라벤, 산바에 대해

TABLE 2. Comparing area-average rainfall of each subbasin

Event	Watch point	Areal average rainfall(mm)		Ratio(b/a)
		TM(a)	Radar(b)	
Heavy rain	YW1	214.8	214.7	1.00
	YC	195.7	254.4	1.30
	CJD	198.5	243.1	1.23
Khanun	YW1	139.3	90.4	0.65
	YC	134.9	107.9	0.80
	CJD	129.6	92.5	0.71
Bolaven	YW1	268.7	264.1	0.98
	YC	258.6	269.8	1.04
	CJD	267.6	294.3	1.10
Sanba	YW1	51.5	55.4	1.08
	YC	94.8	73.5	0.78
	CJD	83.6	83.6	1.00
Average		169.8	170.3	0.97

여 지상강우에 대한 레이더강우의 비율은 각각 1.18, 0.72, 1.04, 0.95 이었으며, 평균 0.97 의 비율을 보였다.

그림 4에는 충주댐 유역 전체에 대한 강우사상별 면적평균 강우량, 누가강우량, 상관관계를 보기위한 산점도를 나타내었다. 면적평균 강우의 패턴은 전반적으로 모든 강우사상에서 비슷하게 예측되었다. 누가강우량을 보면 태풍이 아닌 집중호우의 경우 레이더강우의 강우총량이 높은 값으로 예측되어 가장 많은 오차를 보인 반면 태풍 카눈, 볼라벤, 산바 모두 강우총량이 매우 우수하게 예측되었다. 또한 비가 가장 많

이 온 시간대를 보면 산바를 제외하고는 레이더가 지상강우보다 대체적으로 높게 예측되는 것으로 나타났다. 충주댐 유역을 지나는 집중호우 및 태풍의 영향을 알아보기 위해 강우의 공간분포를 비교하였다(그림 5). 4개의 강우사상에 대하여 각각 비가 많이 온 날을 선정하여 분석한 결과, 강우의 공간적 패턴은 상당히 일치하지만 지상강우보다 레이더강우가 더 높은 값으로 나타났다. 특히 카눈과 볼라벤과 같이 일정한 지역에 강우가 집중되거나 태풍의 형태가 긴 띠형식을 보이는 경우 지상강우를 이용한 공간내삽법으로는 레이더 강우의 상세한 공

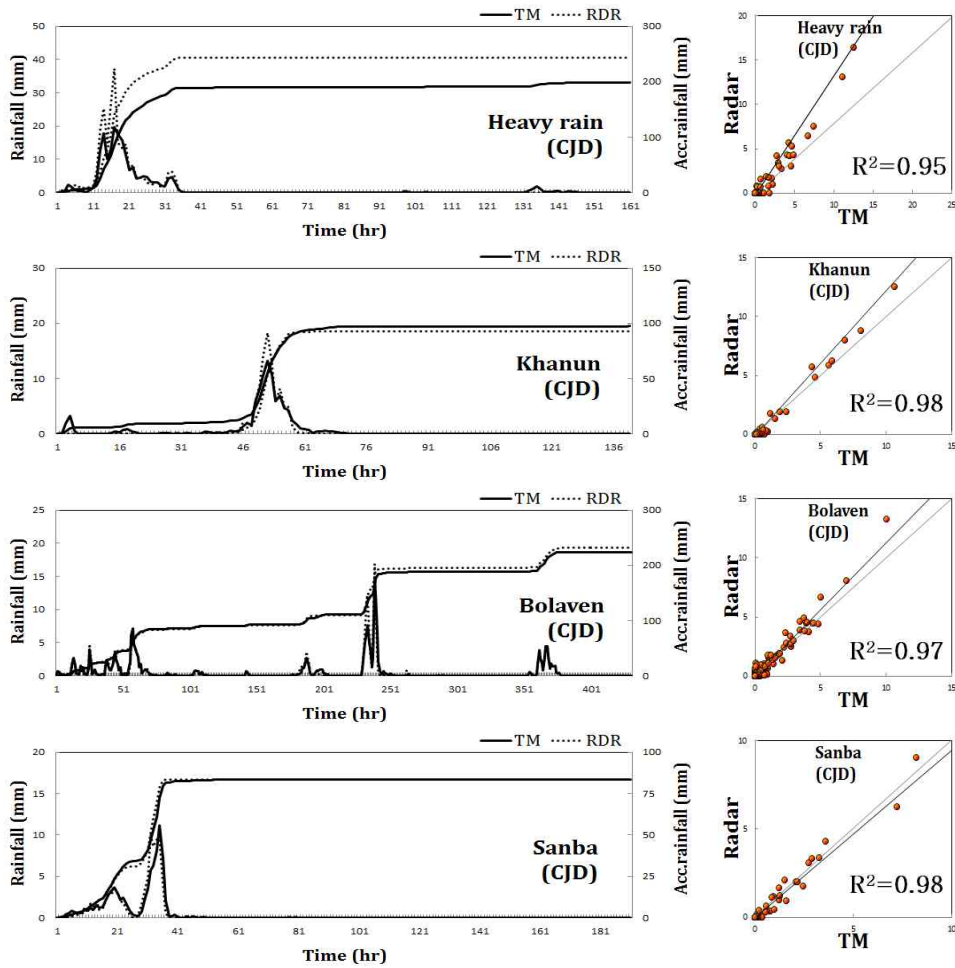


FIGURE 4. Comparing area-average rainfall of each event

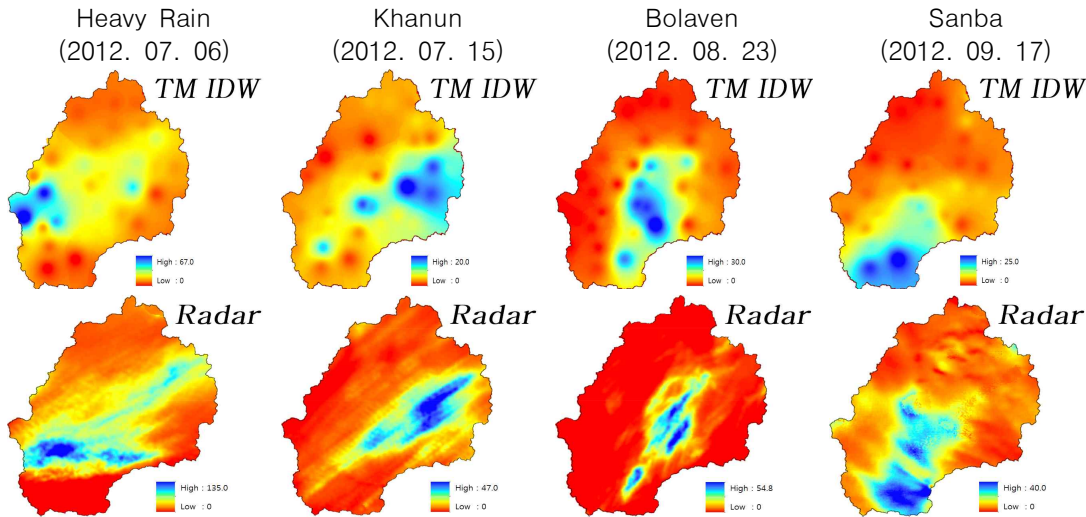


FIGURE 5. Comparison of rainfall spatial distributions between radar and TM IDW

간적 분포는 따라가지 못하는 한계점을 보였다. 특히나 태풍이 지나가는 영춘수위관측소의 우측 위 지역은 상대적으로 지상강우관측소가 부족한 지역으로 레이더강우가 태풍의 공간적 강우분포를 좀 더 자세하게 표현하였다. 이러한 분석결과는 미세측 지역에 대한 홍수량 산정에 활용성이 클 것으로 판단된다. 또한 Ahn *et al.* (2013)의 연구에서도 레이더가 지상관측소가 없는 지역의 강우예측 활용성이 우수하게 나타난 바 있다.

## 2. KIMSTORM 모형의 보정

본 연구에서는 2012년 7월~9월 기간 동안 충주댐유역을 통과했던 4개의 강우사상(집중호우, 카눈, 볼라벤, 산바)에 대하여 영월 1(YW1), 영춘(YC), 충주댐(CJD) 지점에서 모형의 보정을 수행하였다. KIMSTORM 모형은 지표유출, 토양수분, 침투, 침루 및 기저유출과 관련된 13개 매개변수(지표조도계수  $n_{surf}$ , 하천조도계수  $n_{str}$ , 하천형상계수  $C_{str}$ , 논둑과 담수침사이의 기준 여유고  $h_{pf}$ , 조도계수 감소상수  $b$ , 초기토양수분함량  $SW_{ini}$ , 포화투수계수  $K_{sat}$ , 유효투수계수  $K_e$ , 습윤선 흡인수두  $\psi_{wf}$ ,

최대침루능  $f_p$ , 침루조절계수  $N$ , 기저발생위치  $BF_{TH}$ , 기저기여상수  $BF_{cst}$ )를 가진다. 민감도를 분석을 수행한 결과, 초기토양수분함량은 유출량에 가장 민감한 변수로 분석되고, 지표조도계수, 하천조도계수 역시 민감하였다. 초기토양수분함량은 값이 증가할수록 토양으로의 침투가 작게 발생하여 유출용적이 커지게 되고, 조도계수는 값이 증가할수록 유속이 감소하여 유량의 발생이 감소하게 되어 유출용적이 감소하는 것으로 나타났다. 유효투수계수는 값이 증가할수록 유출용적이 감소하는 것으로 나타났다.

모형의 보정은 시행착오법에 의해 보정을 수행하였고, 주요 매개변수들에 대하여 4개의 강우사상을 대상으로 지상강우와 레이더강우에 대하여 각각 보정하였다(표 3). Ahn *et al.* (2013)의 연구에서는 분포형모형에 지상강우를 적용하여 모형을 보정하고, 보정된 매개변수를 레이더강우에 그대로 적용하여 적용성을 평가했으나, 본 연구에서는 지상강우와 같은 매개변수를 사용할 경우 레이더강우가 홍수유출을 잘 재현하지 못하였다. 따라서 지상강우와 레이더강우에 대하여 각각 보정하였다. 지상강우에 의해 보정된 매개변수 값에 비해 레이더에 의해 보정된 매개변수는 하천조도계수  $n_{str}$ 는 높



TABLE 3. Model parameters for model calibration

Event	Watch point	TM					Radar				
		$n_{surf}$	$n_{str}$	$SW_{ini}$	$K_c$	$f_p$	$n_{surf}$	$n_{str}$	$SW_{ini}$	$K_c$	$f_p$
Heavy rain	YW1	2.0	0.065	50.0	2.50	0.022	2.0	0.075	40.0	4.50	0.022
	YC	2.0	0.065	57.0	2.50	0.022	2.0	0.075	40.0	4.50	0.022
	CJD	2.0	0.045	67.0	1.50	0.026	2.0	0.075	40.0	4.50	0.026
Khanun	YW1	2.0	0.065	50.0	2.50	0.022	2.0	0.065	50.0	3.50	0.022
	YC	2.0	0.060	52.0	2.50	0.022	2.0	0.065	50.0	3.50	0.022
	CJD	2.0	0.040	69.0	1.50	0.026	2.0	0.040	70.0	0.50	0.026
Bolaven	YW1	2.0	0.060	55.0	2.50	0.022	2.0	0.065	50.0	4.50	0.022
	YC	2.0	0.060	57.0	2.50	0.022	2.0	0.065	50.0	4.50	0.022
	CJD	2.0	0.040	70.0	1.50	0.026	2.0	0.040	77.0	4.50	0.026
Sanba	YW1	2.0	0.060	57.0	2.50	0.022	2.0	0.075	40.0	2.50	0.022
	YC	2.0	0.055	67.0	2.50	0.022	2.0	0.075	70.0	4.50	0.022
	CJD	2.0	0.040	77.0	0.77	0.026	2.0	0.040	60.0	2.50	0.026
Average	YW1	2.0	0.063	53.0	2.50	0.022	2.0	0.070	45.0	3.75	0.022
	YC	2.0	0.060	58.2	2.50	0.022	2.0	0.070	52.5	4.25	0.022
	CJD	2.0	0.041	70.7	1.32	0.026	2.0	0.049	61.8	3.00	0.026

TABLE 4. Summary of model calibration

Event	Rainfall amount (mm)	Watch point	Peak runoff ( $m^3/s$ )			Runoff volume ( $10^3 m^3$ )		
			Obs.	Sim.		Obs.	Sim.	
				TM	Radar		TM	Radar
Heavy rain	214.8	YW1	1,036.1	1,800.7	1,977.8	144,539.0	185,790.3	178,928.0
	195.7	YC	3,920.4	4,366.0	6,856.7	396,411.6	535,194.5	621,847.3
	198.6	CJD	7,635.6	5,900.4	7,804.1	661,449.5	772,868.7	836,165.7
Khanun	130.3	YW1	662.9	750.3	783.9	149,231.6	144,505.7	76,548.9
	134.9	YC	2,228.5	2,437.6	2,485.5	346,139.2	414,317.5	263,955.3
	128.6	CJD	3,171.6	2,715.9	2,883.9	629,335.6	532,646.9	351,977.4
Bolaven	268.7	YW1	723.3	862.7	820.6	312,404.2	322,572.3	233,386.5
	258.6	YC	1,647.3	1,814.9	1,627.7	664,217.6	891,761.8	663,204.1
	267.6	CJD	3,223.2	3,073.9	4,482.6	1,396,264.0	1,223,950.0	1,036,445.5
Sanba	51.5	YW1	171.0	278.3	266.7	55,468.1	60,369.89	55,669.3
	94.8	YC	1,717.2	1,865.7	1,273.1	219,991.2	270,932.8	233,578.2
	83.6	CJD	3,349.2	3,204.3	3,159.5	468,497.5	383,705.0	399,164.5

계, 초기토양수분함량  $SW_{ini}$ 은 낮게, 유효투수 계수  $K_c$ 는 높게 보정되었다. 앞서 분석된 것처럼 레이더강우의 경우 지점강우보다 상대적으로 강우량이 많게 나타났기 때문에 유출량에 영향을 미쳐 유출용적 및 침투유출이 높게 나타났다. 따라서 하천조도계수를 높게 하여 유속을 감소시키고, 초기토양수분함량을 낮게 하여 토양침투 저류능을 크게 하였으며, 유효투수계수를 크게 하여 유출용적 및 침투유출을 낮추

어 실측유량과 유사하게 보정할 수 있었다.

모형의 적용성 평가를 위해 유출량에 대한 결정계수( $R^2$ ), Nash and Sutcliffe(1970)가 제안한 모형효율계수(Model Efficiency, ME), Jinkang *et al.*(2007)가 적용한 바 있는 유출용적지수(Volume conservation index, VCI), 침투유량의 상대오차( $EQ_p$ )를 사용하였다. 지상강우로 보정한 결과, 평균  $R^2$ , ME, VCI,  $EQ_p$ 가 각각 0.83, 0.68, 1.10, 0.21을 나타내었

며, 레이더강우로 보정한 결과 각각 0.80, 0.62, 1.08, 0.29로 나타나 유량이 관측유량을 잘 재현하는 모의결과를 나타내었다(표 4).

### 3. 지상강우와 레이더강우를 이용한 유출해석 적용성 검토

지상강우와 레이더강우자료를 KIMSTORM 모형에 적용하여 유출해석 결과를 비교하고 적용성을 검토하기 위해, 각 강우사상에 대한 유출모의 결과에 따른 모형평가 결과를 비교하여 나타내었다(표 5).

집중호우의 경우  $R^2$ 는 지상강우는 0.81, 레

이더강우는 0.75로 분석되었고, ME는 지상강우가 0.70, 레이더강우는 0.40로 지상강우를 적용한 유출결과가 비교적 우수하게 나타났다. 집중호우는 경우 태풍과 같이 경로 이동이 비교적 뚜렷하지 않고 산발적으로 내리는 강우형태로 태풍사상에 비하여 모형효율은 낮게 분석되었다. 태풍 카눈의 경우 평균 모형효율계수  $R^2$ 는 0.88로 지상강우와 레이더강우가 동일하게 모의되었다. ME는 지상강우와 레이더강우가 각각 0.82, 0.83으로 레이더강우가 효율이 더 우수한 것으로 나타났으며, VCI는 지상강우가 1.01, 레이더강우가 0.95로 각각 유출용적편차

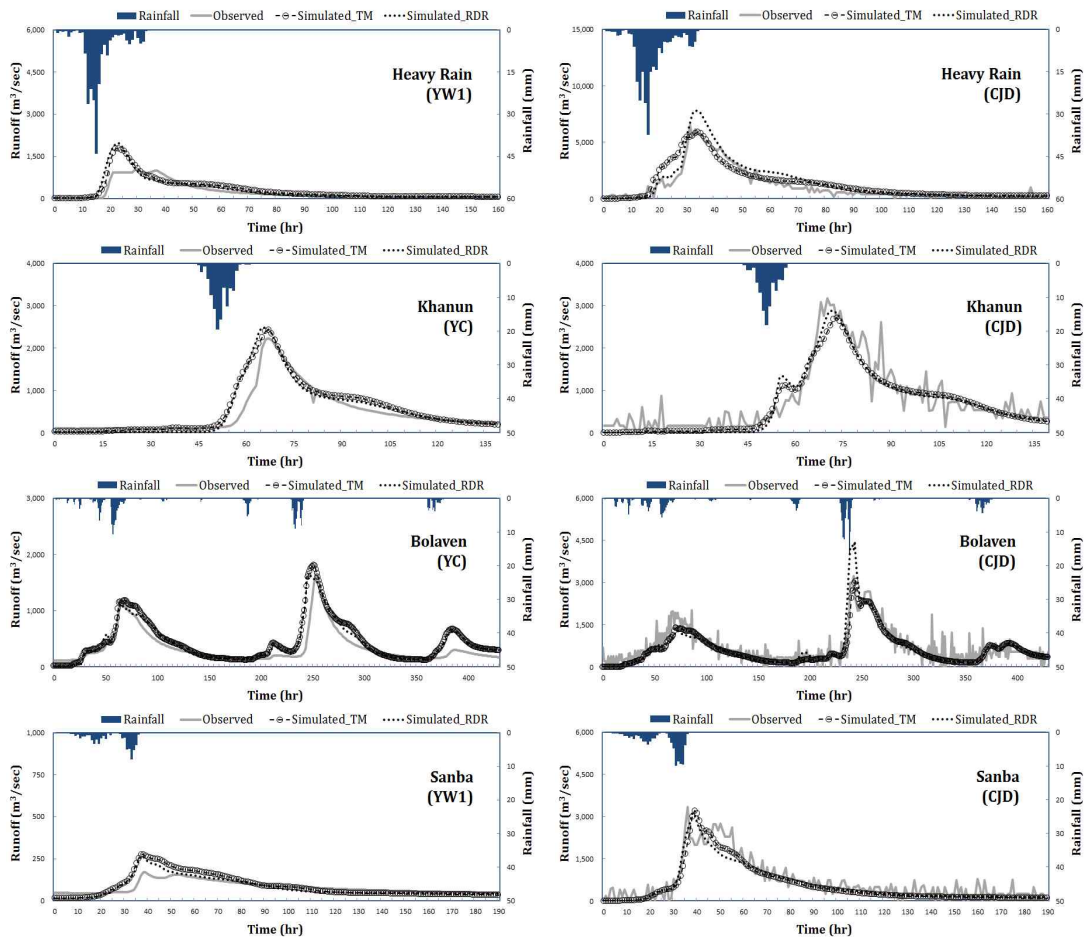


FIGURE 6. Comparison of observed and predicted hydrograph between radar and TM IDW

TABLE 5. Comparison of model results between Radar and TM IDW

Event	Watch point	Model evaluation							
		R <sup>2</sup>		ME		VCI		EQ <sub>p</sub>	
		TM	Radar	TM	Radar	TM	Radar	TM	Radar
Heavy rain	YW1	0.80	0.71	0.57	0.36	1.29	1.24	0.74	0.91
	YC	0.75	0.63	0.66	0.00	1.35	1.57	0.11	0.75
	CJD	0.87	0.93	0.86	0.84	1.17	1.26	0.23	0.02
Average		0.81	0.75	0.70	0.40	1.27	1.36	0.36	0.56
Khanun	YW1	0.88	0.89	0.82	0.83	0.97	0.86	0.13	0.18
	YC	0.89	0.87	0.80	0.79	1.20	1.10	0.09	0.12
	CJD	0.87	0.89	0.85	0.87	0.85	0.88	0.14	0.09
Average		0.88	0.88	0.82	0.83	1.01	0.95	0.12	0.13
Bolaven	YW1	0.76	0.72	0.64	0.57	1.03	0.95	0.19	0.14
	YC	0.80	0.81	0.45	0.65	1.34	1.24	0.10	0.01
	CJD	0.82	0.77	0.79	0.68	0.88	0.93	0.05	0.39
Average		0.79	0.77	0.63	0.64	1.08	1.04	0.11	0.18
Sanba	YW1	0.84	0.80	0.28	0.25	1.09	1.00	0.63	0.56
	YC	0.75	0.68	0.55	0.67	1.23	1.06	0.09	0.26
	CJD	0.86	0.85	0.83	0.83	0.82	0.85	0.04	0.06
Average		0.82	0.78	0.55	0.59	1.05	0.97	0.25	0.29
Total average		0.83	0.80	0.68	0.62	1.10	1.08	0.21	0.29

가 레이더가 더 크게 모의되었다. 태풍 볼라벤의 경우의 ME는 지상강우는 0.63, 레이더는 0.64으로 레이더강우가 더 우수한 결과를 보였으며, VCI 역시 레이더강우를 적용한 경우 유출용적편차가 4%로 우수하게 나타났다. 마지막으로 태풍 산바의 경우 지상강우와 레이더강우의 ME는 0.55와 0.59로 레이더강우를 적용한 경우가 더 우수한 것으로 나타났으며, VCI 역시 3%로 레이더강우가 지상강우보다 우수하게 모의되었다. 앞서 지상강우와 레이더강우의 비교에서도 언급했듯이, 특히 카눈과 볼라벤과 같이 일정한 지역에 강우가 집중되거나 태풍의 형태가 긴 띠형식을 보이는 경우 지상강우보다 레이더강우가 강우예측이 우수하게 나타난 것처럼 보정결과도 카눈과 볼라벤의 경우 모형효율이 우수하게 나타난 것으로 판단된다. 그림 6의 유출수문곡선에서도 전반적으로 유출해석에 있어 간접적으로 관측된 레이더강우도 직접적으로 관측한 지상강우 정도의 수준을 갖는 것으로 분석되었다.

지상강우와 레이더강우자료의 적용성 검토를 위해 강우, 유출, 토양포화 공간분포도를 비교

분석하였다. 앞서 지상강우와 레이더강우의 공간 분포를 비교분석한 결과 볼라벤 태풍과 같이 일정지역에 강우가 집중되는 경우 공간적 오차가 발생함을 알 수 있었다. 이처럼 지점강우로는 정확한 강수량이 관측될 수 없었던 볼라벤(8월 22일~25일) 태풍의 강우-유출-토양포화의 공간분포를 비교하였다(그림 7). 지상강우와 레이더강우의 분포도는 일별로 합산된 결과이고, 아래 유출 분포도와 토양수분 분포도는 해당 시간의 변화를 나타내었다. 그 결과 8월 22일은 지상강우와 레이더가 비교적 유사한 패턴을 보였고, 23일의 경우 영춘(YC) 유역을 통과하는 태풍형상은 레이더강우가 일정지점에 집중되어 내리는 형상으로 나타나 지점강우와 비교하여 양적, 공간적 오차가 발생했다. 이로 인해 지표 유출량과 토양포화는 레이더강우가 강우 집중 지역에 더 크게 모의되었다. 24일~25일은 지상강우와 레이더강우 분포도는 유사하지는 않은 것처럼 보이지만 강수량이 상당히 줄어 태풍이 거의 소멸되는 상태이며, 유출분포와 토양포화는 비교적 유사하게 모의되었다.

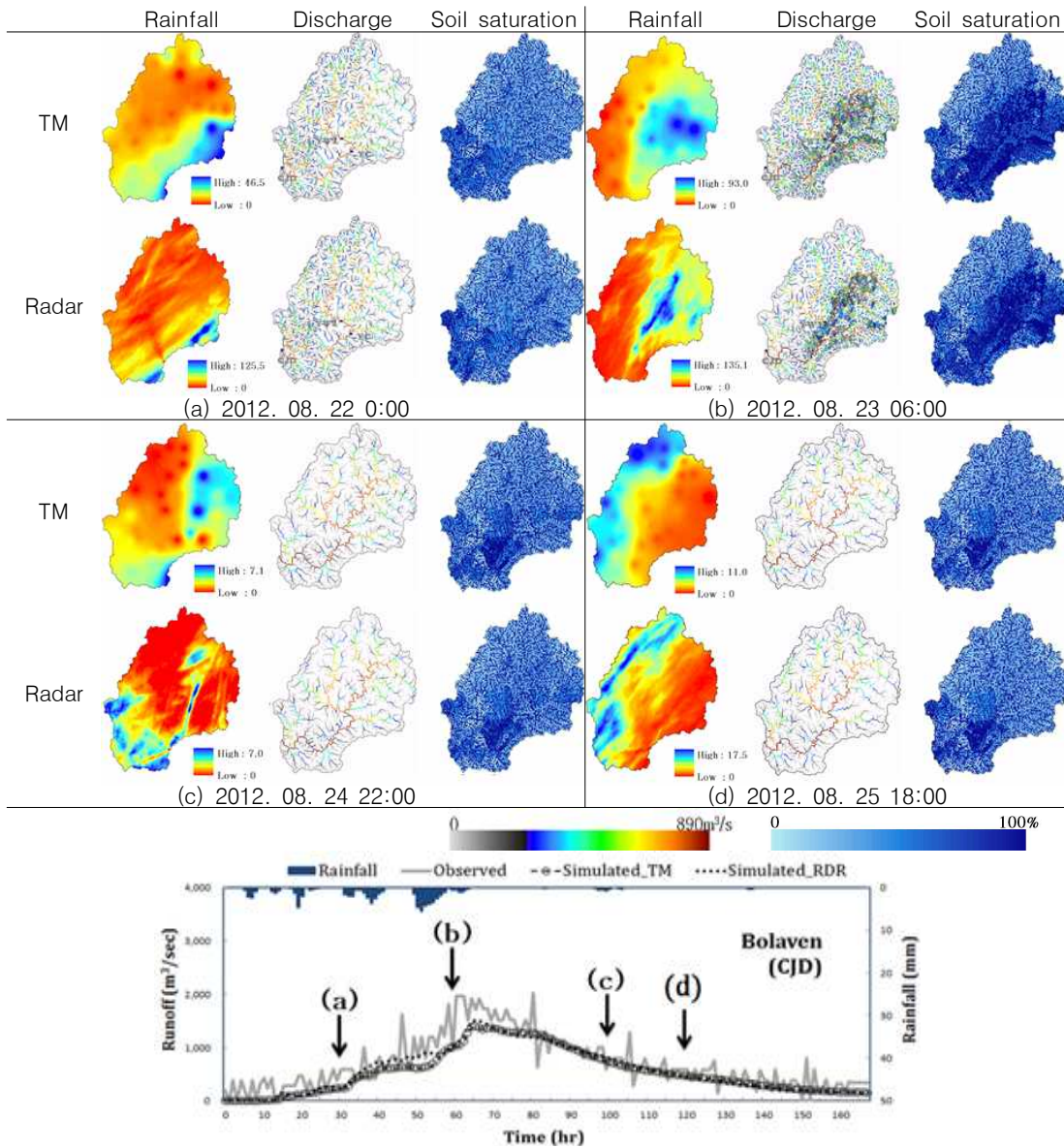


FIGURE 7 Comparison of spatial distributions of rainfall, discharge and soil saturation between radar and TM IDW(Bolaven)

**요약 및 결론**

본 연구에서는 충주댐유역을 대상으로 지상강우와 소백산 레이더강우자료를 비교분석하였고, 이후 분포형 강우-유출모형인 KIMSTORM에

적용하여 유역 내에서의 홍수진행상황을 공간적으로 파악하고 레이더강우의 적용성을 검토하였다. 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 소백산 이중편파 강우레이더의 적용성을 검토하고자 충주댐 유역을 대상유역으로 선

정하고, 4개의 강우사상(집중호우, 카눈, 블라벤, 산바)에 대하여 한강홍수통제소로부터 보정된 레이더 강우자료를 수집하였다. 레이더 강우를 분포형 모형에 적용하기 위해 LCC 좌표를 Bessel TM 좌표체계로 투영하고, 1시간 단위, 500m 격자로 재구성하여 준비하였다.

둘째, 유출해석을 위해 격자기반의 분포형 강우-유출모형인 KIMSTORM 모형을 선정하였으며, 모형의 구축을 위한 지형자료로 DEM, 흐름방향도, 토지피복도, 토심도, 토성도, 유역경계를 준비하고 3개의 유역(YW1, YC, CJD)으로 분할하였다. 최종적으로 격자크기 500×500m 해상도의 198행×231열의 총 45,738개의 셀로 모형을 구축하였다.

셋째, 지상강우와 레이더강우를 이용하여 모형의 보정을 각각 수행하였으며, 모형효율 검토 결과  $R^2$ , ME, VCI,  $EQ_p$ 의 평균은 지상강우의 경우 각각 0.83, 0.68, 1.10, 0.21로, 레이더강우의 경우 각각 0.80, 0.62, 1.08, 0.29로 모의유량이 관측유량을 잘 재현하였다.

넷째, 4개의 호우사상에 대하여 지상강우와 레이더강우를 비교분석한 결과, 유출량산정 지점별 면적평균 강우량은 집중호우와 태풍 블라벤, 산바의 경우 레이더강우가 지상강우보다 높게 관측되었고, 태풍 카눈의 경우 지상강우가 더 높게 예측되었으나 패턴은 매우 유사하게 나타났다. 하지만 상대적으로 집중호우는 태풍에 비해 강우예측 정확성이 떨어지는 것으로 나타났다. 특히 블라벤 태풍의 경우 8월 23일 영춘(YC) 유역에 발생한 강우에 대하여 레이더강우는 지점강우가 재현하지 못한 일정지점에 집중되어 내리는 형상을 보다 잘 예측하였다. 지상강우관측소가 상대적으로 부족한 지역이나 미계측 지역의 홍수량 산정에 활용성이 클 것으로 판단된다.

다섯째, 지상강우와 레이더강우를 분포형 모형에 적용하여 유출해석을 수행한 결과 평균  $R^2$ 와 ME는 레이더 강우에 비해 지상강우가 우수하게 나타났지만, 유출용적오차인 VCI는 지상강우가 10%, 레이더강우가 8%로 레이더강

우가 더 우수하게 나타났다. 이는 앞서 지상강우와 레이더강우의 공간분포 비교분석에서 레이더강우가 우수하게 나타난 결과가 분포형 홍수추적에 반영되어 유출용적오차가 2%가량 작게 나타난 결과로 해석된다.

본 연구에서 활용된 소백산 이중편파 레이더 자료는 공간적 분포와 규모의 활용성이 우수하였으며, 지상강우를 적용하였을 경우와 근사한 결과를 나타내어 적용성을 확인하였다. 지상강우 관측소는 20km 정도의 간격으로 설치되어 있는데 반해, 레이더강우자료는 관측 해상도가 250m로 더 조밀하여 지상관측소가 없는 지역이나 관측소의 수가 적은 소유역에서 활용성이 클 것으로 판단된다. [KAGIS](#)

## REFERENCES

- Ahn, S.R., C.H. Jang, S.H. Kim, M.S. Han, J.H. Kim and S.J. Kim. 2013. Discussion for the effectiveness of radar data through distributed storm runoff modeling. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(6):19-30 (안소라, 장철희, 김상호, 한명선, 김진훈, 김성준. 2013. 분포형 홍수유출 모델링을 통한 레이더 강우자료의 효과분석. *한국농공학회지* 55(6):19-30).
- Bae, Y.H., B.S. Kim and H.S. Kim. 2010. The study on flood runoff simulation using runoff model with gauge-adjusted radar data. *Journal of the Korean Wetlands Society* 12(1):51-61 (배영혜, 김병식, 김형수. 2010. 보정 레이더 자료와 유출 모형을 이용한 홍수유출모의에 관한 연구. *한국습지학회지* 12(1):51-61).
- Bringi, V.N. and V.C. Chandrasekar. 2001. *Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications*. Cambridge University Press. UK.

- Collier, C.G. 1989. Applications of Wether Radar Systems—A Guide to Uses of Radar Data in Meteorology and Hydrology. Ellis Horwood Limited, England.
- Ha, K.J., H.M. Oh, A.S. Suh and J.H. Kim. 2002. Comparison between TRMM/PR and ground-based radar. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 5(4):1-8 (하경자, 오현미, 서애숙, 김정희. 2002. TRMM/PR 자료와 지상 레이더와의 비교. 한국지리정보학회지 5(4):1-8).
- Hitchfeld, W. and J. Bordan. 1954. Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths. Journal of the Atmospheric Sciences 11:58-67.
- Hong, S.J., B.S. Kim and C.H. Hahk. 2010. Spatial-temporal interpolation of rainfall using rain gauge and radar. Journal of the Korean Society for Geospatial Information System 18(3):37-48 (홍승진, 김병식, 함창학. 2010. 강우계와 레이더를 이용한 강우의 시공간적인 활용. 한국지형공간정보학회지 18(3):37-48).
- Jinkang, D., X. Shunping, X. Youpeng, X. Chong-yu and V.P. Singh. 2007. Development and testing of a simple physically-based distributed rainfall-runoff model for storm runoff simulation in humid forested basins. Journal of Hydrology 336:334-346.
- Jung, I.K., J.Y. Park, M.J. Park, H.J. Shin, H.G. Jeong and S.J. Kim. 2010. Application of a grid-based rainfall-runoff model using SRTM DEM. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 13(4):157-169 (정인균, 박종윤, 박민지, 신형진, 정현교, 김성준. 2010. STRM DEM을 이용한 격자기반 강우-유출모의. 한국지리정보학회지 13(4):157-169).
- Jung, I.K., M.S. Lee, J.Y. Park and S.J. Kim. 2008. A modified grid-based KIneMatic Wave STORM Runoff Model(ModKIMSTORM) (I) - theory and model -. Journal of the Korean Society of Civil Engineers 28(6B):697-707 (정인균, 이미선, 박종윤, 김성준. 2008. 격자기반의 운동파 강우유출모형 KIMSTORM의 개선(I) - 이론 및 모형 -. 대한토목학회지28(6B):697-707).
- Kang, S.H., J.I. Choi and J.Y. Park. 2007. The runoff characteristics due to heavy rainfall in mountainous river. Journal of GIS Association of Korea 15(2):159-167 (강상혁, 최종인, 박종영. 2007. 산지하천의 집중강우에 따른 유출특성에 관한 연구. 한국GIS학회지 15(2):159-167).
- Kim, B.S., Y.H. Bae, J.S. Park and K.T. Kim. 2008. Flood runoff simulation using radar rainfall and distributed hydrologic model in un-gauged basin : Imjin river basin. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 11(3):52-67 (김병식, 배영혜, 박정술, 김경탁. 2008. 레이더 강우와 분포형 수문모형을 이용한 미계측 유역의 홍수 유출모의; 임진강 유역. 한국지리정보학회지 11(3):52-67).
- Kim, S.J. 1998. Grid-based KIneMatic Wave STORMRunoff Model (KIMSTORM) (I) - theory and model -. Journal of the Korea Water Resources Association 31(3):303-308 (김성준. 1998. 격자기반의 운동파 강우유출모형 개발(I) - 이론 및

- 모형 -. 한국수자원학회지 31(3):303-308).
- Kim, Y.S., K.H. Chang, B.S. Kim and H.S. Kim. 2011. Decision of GIS optimum grid on applying distributed rainfall-runoff model with radar resolution. Journal of the Korean Wetlands Society 13(1):105-116 (김연수, 장권희, 김병식, 김형수. 2011. 레이더 자료의 해상도를 고려한 분포형 강우-유출 모형의 GIS 자료 최적 격자의 결정. 한국습지학회지 13(1):105-116).
- Marshall, J.S. and W.M. Palmer. 1948. The distribution of raindrop with size. Journal of Meteorology 5:165-166.
- Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models : part 1 - a discussion of principles. Journal of Hydrology 10(3):282-290.
- Noh, H.S., N.R. Kang, B.S. Kim and H.S. Kim. 2012. Flood simulation using Vflo and radar rainfall adjustment data by statistical objective analysis. Journal of the Korean Wetlands Society 14(2):243-254 (노희성, 강나래, 김병식, 김형수. 2012. 통계적 객관 분석법에 의한 레이더강우 보정 및 Vflo를 이용한 홍수모의. 한국습지학회지 14(2):243-254).
- Park, J.H., B.S. Kang and G.S. Lee. 2008. Application analysis of GIS based distributed model using radar rainfall. Journal of the Korean Society for Geospatial Information System 16(1):23-32 (박진혁, 강부식, 이근상. 2008. 레이더강우를 이용한 GIS기반의 분포형모형 적용성 분석. 한국지형공간정보학회지 16(1):23-32).
- Wilson, J.W. and E.A. Brandes. 1979. Radar measurement of rainfall: a summary. Bulletin of the American Meteorological Society 60(9):1048-1058. **KAGIS**