분포형 홍수유출 모델링을 통한 레이더 강우자료의 효과분석

Discussion for the Effectiveness of Radar Data through Distributed Storm Runoff Modeling

안소라* · 장철희** · 김상호*** · 한명선**** · 김진훈***** · 김성준*****†

Ahn, So Ra · Jang, Cheol Hee · Kim, Sang Ho · Han, Myoung Sun · Kim, Jin Hoon · Kim, Seong Joon

ABSTRACT

This study is to evaluate the use of dual-polarization radar data for storm runoff modeling in Namgang dam (2,293 km²) watershed using KIMSTORM (Grid-based KInematic wave STOrm Runoff Model). The Bisl dual-polarization radar data for 3 typhoons (Khanun, Bolaven, Sanba) and 1 heavy rain event in 2012 were obtained from Han River Flood Control Office. Even the radar data were overall less than the ground data in areal average, the spatio-temporal pattern between the two data was good showing the coefficient of determination (R^2) and bias with 0.97 and 0.84 respectively. For the case of heavy rain, the radar data caught the rain passing through the ground stations. The KIMSTORM was set to 500×500 m resolution and a total of 21,372 cells (156 rows×137 columns) for the watershed. Using 28 ground rainfall data, the model was calibrated using discharge data at 5 stations with R^2 , Nash and Sutcliffe Model Efficiency (ME) and Volume Conservation Index (VCI) with 0.85, 0.78 and 1.09 respectively. The calibration results by radar rainfall showed R^2 , ME and VCI were 0.85, 0.79, and 1.04 respectively. The VCI by radar data was enhanced by 5 %.

Keywords: Radar rainfall; KIMSTORM; distributed hydrologic model; storm runoff modeling

1. 서 론

최근 기후변화에 따른 위험기상과 예측이 어려운 국지성 집중호우로 인해 홍수가 빈번하게 발생되고 있으며, 홍수피해 규모가 커지고 발생 빈도도 증가하고 있다. 이러한 홍수피해를 경감하기 위해서는 무엇보다도 강우의 시간적, 공간적인 특성의 파악 및 신속하고 정확한 홍수예보가 중요하다. 강우-유출 해석에 있어 일반적으로 사용되는 지상 강우관측소는 유역 내 한정된 지점에 설치되어 있기 때문에 국지적으로 발생하는 집중호우의 경우 강우의 시공간적인 분포를 정확히 파악하기에 어려움이 있다. 국지성 집중호우에 의한 홍수를 관리하기 위해서는 매우 조밀하게 관측된 우량 자료가 필요한데, 유역 내에 많은 우량관측

소를 설치하여 조밀한 우량관측을 실시하는 것은 관측소의 설치 및 유지관리 비용측면을 고려할 때 현실적으로 쉽지 않다 (전병국 등, 2012). 따라서 이러한 문제점에 대한 보완책으로 레이더 강우자료의 중요성이 대두되고 있으며, 강우-유출과 같은 수문학적 해석에 레이더 강우를 활용함으로써 강우의 시공간적 분포에 대한 정확성을 높이고 또한 홍수예측의 정밀도를 향상시키려는 노력이 이루어지고 있다.

레이더 강우자료는 격자기반의 분포형 시계열 자료이므로, 레이더 자료의 정보극대화를 위해서는 격자기반의 분포형 강우-유출모형을 이용하여야 한다. 분포형 강우-유출모형의 적용결과는 시계열 공간 유출분포로 생성이 되므로, 집중형 강우-유출모형에서는 파악할 수 없는 유역 내에서의 홍수진행상황을 공간적으로 파악할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 레이더 강우와 분포형 모형을 연계하여 강우자료의 효과분석 및 분포형 모형의 적용성을 검증하고자 하였다.

최근 레이더를 유출모형에 적용하여 유출해석에 사용한 연구가 많이 진행되고 있다. 최규현 등 (2006)은 낙동강 감점유역을 대상으로 기상청 C-band 레이더를 이용하여 홍수 범람모의를 위한 유역의 홍수량 산정에 레이더 자료를 이용하였고, 박진혁 등 (2008)은 S-band 진도레이더 자료를 이용하여 분포형 모형인 Vflo에 적용하여 용담댐유역의 홍수유출분석을 수행하였다. 김원일 등(2008)은 기상청 레이더 CAPPI 자료를 분포형 모형

* 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 박사과정
** 한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구원
*** 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 박사수로
**** 한국건설기술연구원 수자원연구실 전임연구원
***** 한강홍수통제소 강우레이더 통합운영센터 시설연구사
***** 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수
† Corresponding author Tel.: +82-2-450-3749
Fax: +82-2-444-0186
E-mail: kimsj@konkuk.ac.kr

2013년 9월 12일 투고
2013년 9월 23일 심사완료
2013년 9월 26일 게재확정

인 Vflo에 적용하여 한강유역 수문해석에 활용함으로써 레이더 강우의 활용성을 확인하였으며, 김병식 등 (2008)은 1 km 임진강 강우레이더를 Vflo와 ModClark 모형에 적용하여 미계측유역의 홍수유출 모의를 수행하였다. 배영혜 등 (2010)은 안성천 유역을 대상으로 칼만필터 기법을 이용하여 지상 강우와 레이더 강우를 조합하여 Vflo와 ModClark 모형에 적용한 뒤 홍수유출을 모의하였고, 김수전 등 (2010)은 1 km 임진강 강우레이더를 이용하여 신경망에 의해 보정된 레이더와 보정하지 않은 레이더 강우를 ModClark 모형에 입력하여 안성천 유역의 홍수유출을 비교분석하였다. 김연수 등 (2011)은 내린천 유역을 대상으로 광덕산 레이더자료를 ModClark 모형에 입력하여 레이더 강우의 500 m~10 km 해상도별 유출량 모의를 수행하여 비교분석하였고, 노희성 등 (2012)은 비슬산 레이더를 분포형 모형인 Vflo에 적용하여 낙동강 감천유역의 홍수모의를 수행하였다. 국외 연구로 Winchell et al. (1998), Johnson et al. (1999), Bedient et al. (2000), Sun et al. (2000), Hunter et al. (2003), Smith et al. (2007)은 레이더 강우자료와 강우-유출모형을 이용하여 유역에서의 유출모의를 수행하여 레이더 강우의 적용성을 분석하였다.

본 연구에서는 우리나라에서 처음으로 도입되어 2010년부터 운영되기 시작한 비슬산 이중편파 레이더를 이용하여, 레이더 강우자료와 지상 강우관측소의 지점 강우자료를 비교분석하고 강우특성을 파악하여 그 정확도를 분석하고자 한다. 또한 레이더와 지점 강우자료를 국내에서 개발된 분포형 강우-유출모형인 KIMSTORM에 적용하여 유역 내에서의 홍수진행상황을 공간적으로 파악하고 레이더 강우의 활용성을 평가하는데 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

1. 분포형 모형의 개요

본 연구에서는 적용한 KIMSTORM2 모형은 김성준 (1998)

이 개발하여 그동안 여러 규모의 유역에 적용하여 평가된 바 있는 격자기반 분포형 강우-유출모형 KIMSTORM (Grid-based KInematic wave STOrn Runoff Model)을 개선한 Mod-KIMSTORM (정인균 등, 2008)의 최신버전이다. KIMSTORM2 모형은 대상유역을 일정한 크기의 격자로 구성하고, 각각의 셀에 대한 지형, 지표 및 토양의 물리적인 특성들을 매개변수로 하여 주어진 시간간격별로 침투, 침투, 지표 및 지표하 유출, 가정된 기저유량을 산정한 후 격자물수지법에 의해 흐름경로를 따라 인접한 셀들로부터의 유입량과 중심 셀에서의 유출량에 대한 물수지를 계산함으로써 유역의 전반적인 수문량에 대한 시간적 변화와 공간적인 분포를 파악할 수 있는 모형이다. 유출해석을 위하여 지표셀은 3개층 (지표, 불포화 및 포화 지표하층)으로, 하천셀은 단일층으로 구성되어 있으며 각각의 셀에 대해 상기 식들에 의하여 계산된 결과들을 이용하여 격자물수지가 계산되며, 임의 시간에 계산된 격자별 물수지 결과는 입력자료 및 모형의 매개변수와 함께 다음시간으로 전달되어 각 격자의 물수지 변화를 추적하게 된다 (김성준, 1998). 모형의 격자물수지 구조는 Fig. 1과 같고 지표와 토양층에 대해 Eq. (1)과 Eq. (2)의 물수지식을 적용하고 있다 (정인균 등, 2010).

$$\begin{aligned} \frac{dS_i}{dt} &= P(t)_i - F(t)_i + \sum Q_{surf.in.i} - Q_{surf.out.i} \\ &\quad \text{for overland flow} \\ &= P(t)_i + \sum Q_{surf.in.i} + \sum Q_{sub.in.i} + Q_{bf.in.i} - Q_{surf.out.i} \\ &\quad \text{for stream flow} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{dSW_i}{dt} = F(t)_i + \sum Q_{sub.in.i} - Q_{sub.out.i} - DR(t)_i \quad (2)$$

여기서 i 는 셀주소, S_i 는 저류량 (m^3), $P(t)_i$ 는 강우량 (m^3),

Fig. 1 The water balance components of a cell for overland and stream grid elements

Fig. 2 Study area

Table 1 Characteristics of selected events

Event		Date of event	Duration (hr)	Average Rainfall (mm)	Maximum Intensity (mm)
1	Khanun	2012.07.18. 00:00～2012.07.21. 23:00	54	77.5	21.4
2	Heavy Rain	2012.08.22. 00:00～2012.08.26. 23:00	84	257.2	22.4
3	Bolaven	2012.08.27. 00:00～2012.09.02. 23:00	71	190.9	24.7
4	Sanba	2012.09.16. 00:00～2012.09.20. 23:00	49	252.4	30.9

$F(t)_i$ 는 침투량 (m^3), $Q_{surf.in.i}$ 는 셀 i 에 인접한 셀의 지표층으로부터의 유입량 (m^3/sec), $Q_{surf.out.i}$ 는 지표층의 유출량 (m^3/sec), $Q_{sub.in.i}$ 는 셀 i 에 인접한 셀의 불포화 지표하층으로부터의 유입량 (m^3/sec), $Q_{sub.out.i}$ 는 불포화 지표하층의 유출량 (m^3/sec), $Q_{bf.in.i}$ 는 포화 지표하층으로 침투된 용적으로부터 가정한 기저 유입량 (m^3/sec), SW_i 는 불포화층의 격자토양수분 (m^3), $DR(t)_i$ 는 침투량 (m^3), t 는 시간간격 (sec)이다.

2. 대상유역

본 연구의 대상유역인 남강댐 유역 ($2,293 km^2$)은 낙동강 제1지류인 남강의 낙동강 합류점으로부터 약 80 km 상류지점에 위치한 남강다목적댐의 직상류부에 위치하고 있다. 해발 300 m 이상의 지역이 유역면적의 56 %를 차지하고 있으며, 약 33 %가 지리산을 중심으로 분포하고 있다 (정인균 등, 2008). 남강댐 유역의 연평균 기온은 $13 ^\circ C$, 연평균 강수량은 1,772 mm이며, 여름철에 몬순기후와 남해안의 난류가 어우러져 태풍을 동반하는 다우지역으로 강우발생시 유량의 집중도가 높은 지역이다.

Fig. 2는 대상유역 내 강우관측소 및 수위관측소 현황과 본 연구에 사용한 비슬산 레이더 관측소 위치를 나타낸 그림이다.

3. 강우 및 유량자료

모형의 보정에 사용하기 위한 강우자료로 남강댐 유역에 영향을 받는 총 28개 관측소 (국토부 7개소, 수자원공사 21개소)의 시간당 강우자료를 국가수자원관리종합정보 시스템 (WAMIS)과 기상청으로부터 수집하여 사용하였다. 수집된 지점 강우자료는 IDW (Inverse Distance Weighting) 기법으로 공간내삽 하여 사용하였으며, Table 1은 분석에 적용된 강우 및 태풍사상의 특성을 정리한 것으로 2012년 1개의 강우사상과 3개의 태풍사상 (카눈, 볼라벤, 산바)을 적용하였다.

모형의 보정 및 모의의결과의 평가 위한 유량자료는 남강댐 유역 내 4개 수위관측소인 안의 (AU), 산청 (SC), 신안 (SA), 창춘 (CC)의 시간당 수위자료와 유역 출구점에 위치한 남강댐방수로 지점 (NR)의 시간당 댐 유입량을 사용하였다. 4개 수위관측소의 시간당 수위자료를 홍수통제소에서 제공받아 각 관측소별

수위유량관계식을 적용하여 유량자료로 환산하였으며 (Table 2), 남강댐 방수로의 댐 유입량은 국가수자원관리종합정보 시스템 (WAMIS)으로부터 제공받았다.

Table 2 Stage-discharge relation curves

Watch Point		Stage-discharge relation curve		Year
1	AU	$0.44 \leq h \leq 1.70$	$Q = 26.202 \times (h - 0.440)^{3.063}$	2010
		$1.70 < h \leq 3.88$	$Q = 24.733 \times (h - 0.395)^{2.887}$	
2	SC	$0.14 \leq h \leq 0.60$	$Q = 163.524 \times (h - 0.140)^{3.164}$	2011
		$0.60 < h \leq 13.40$	$Q = 61.647 \times (h - 0.113)^{2.068}$	
3	SA	$0.15 \leq h \leq 1.36$	$Q = 14.206 \times (h - 0.150)^{7.863}$	2010
		$1.36 < h \leq 4.56$	$Q = 18.832 \times (h + 0.213)^{2.633}$	
4	CC	$0.30 \leq h \leq 1.30$	$Q = 274.058 \times (h - 0.299)^{2.286}$	2011
		$1.30 < h \leq 6.30$	$Q = 242.318 \times (h - 0.224)^{1.752}$	

4. GIS 자료 및 모형매개변수

모형에는 DEM, 흐름방향도, 토지피복도, 유효토심도, 토양종류도, 유역경계가 필수 GIS 자료로 입력된다. 각각의 GIS 입력 자료는 Fig. 3과 같이 ESRI ArcInfo W/S를 이용하여 격자크기 500×500 m 해상도의 ESRI ASCII Grid 형식으로 구축하였고, 156행×137열의 총 21,372개의 셀로 구성되었다. DEM은 1 : 5,000 NGIS (National Geographic Information System) 수치지도를 사용하여 구축하였으며, 흐름방향, 흐름누적 및 하천망이 실제하천의 형태를 고려하면서 정의될 수 있도록 Agree Burn (Hellweger, 1997; 정인균과 김성준, 2003) 기법을 적용하여 DEM을 전처리하였다. 물의 흐름방향을 정의하는데 이용되는 흐름방향도는 FLOWDIRECTION 함수를 이용하여 DEM으로부터

Fig. 3 GIS input data

구축하였으며, 격자물수지 계산순서, 유역 및 하천을 정의하는데 이용되는 흐름누적도는 FLOWACCUMULATION 함수를 이용하여 흐름방향으로부터 구축하였다. 토지피복도는 2000년 5월 8일 촬영된 토지이용도는 Landsat ETM+ 위성영상을 사용하여 6개의 항목(수역, 도시, 나지, 산림, 논, 밭)으로 최대우도 감독분류(Maximum Likelihood Supervised Classification)하여 작성하였으며, 산림이 78%, 논이 12%, 밭이 8%를 차지한다. 유효토심도 및 토양종류도는 농업과학기술원에서 제공하는 벡터형태의 1:50,000 개략토양도의 유효토심과 토양종류 속성을 격자화하여 사용하였다. 토지피복도, 유효토심도 및 토양종류도는 모두 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공받아 사용하였으며, 공간해상도 30m의 자료를 RESAMPLE 함수를 이용하여 공간해상도 500m의 자료로 변환하여 구축하였다. 마지막으로 레이더 및 지점강우의 비교분석 및 모형의 보정을 위한 유역경계는 수위관측소를 기준으로 5개의 유역(AU, SC, SA, CC, NR)으로 분할하였다.

위에서 구축한 기본 GIS 입력자료 중 토지피복도는 Manning 조도계수를 공간적으로 분포시키는 기준이 되며 조도계수는 격자별 유출에서 유속을 제어하는 역할을 한다. 유효토심도 및 토양종류도는 토양의 특성과 관련된 매개변수(유효토심, 유효공극률, 포장용수량, 영구위조점, 포화투수계수, 유효투수계수, 습윤선 흡인수, 초기침투율, 종기침투율)를 공간적으로 분포시키는 기준이 되고 이들 특성은 강우의 침투 및 토양수 흐름을 제어하는 역할을 한다(정인균 등, 2008).

5. 레이더 강우자료 및 처리

과거 전통적으로 사용해 온 레이더는 수평성분의 전파만을 사용한 것에 반해 근래에는 수평과 수직성분의 전파를 동시에 사용하여 목표물에 대한 특성정보의 정확도를 향상시켰다. 위상변화 정보는 특히 이중편파 레이더에서 중요하다. 수평과 수직 전파가 대기 중 강우입자의 크기나 분포밀도에 따라 다른 경로를 가지기 때문에 차이가 발생하는데, 이 위상 변화량은 집중호우 지역을 분별하고 정확한 강우량을 추정하는데 매우 중요하다. 우리나라 국토교통부는 현재 공간적 강우관측의 정확도 제고를 위하여 강우레이더 관측망을 구축하고 있으며 일차적으로 낙동강 비슬산에 이중편파레이더를 설치하여 2010년부터 운영을 하고 있다. 특히 비슬산 강우레이더는 선진외국에서도 활용초기 상태이고 우리나라에서는 처음으로 도입된 현업용 이중편파레이더로 낙동강 유역의 홍수예보에 주로 활용하고 있다(전병국 등, 2012).

본 연구에서는 KIMSTORM2 모형에 입력하기 위한 분포형 강우자료를 위해 낙동강 유역의 비슬산 이중편파 레이더자료를 한

강홍수통제소로부터 10분 간격, 250m 해상도로 제공받았다. 레이더자료의 보정에 관한 이론적 내용은 전병국 등(2012)에 자세히 수록되어 있다. 남강댐 유역은 Fig. 2와 같이 비슬산 강우레이더에 의해 관측되는 반경 100km 내에 포함되며, 분석에 사용된 강우사상은 앞서 구축된 지점 강우자료와 동일한 4개의 이벤트(카눈, 집중호우, 불라벤, 산바)이다. 또한 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 10분 단위로 제공받은 자료를 1시간 단위로 재구축하고, 분포형 모형의 입력자료 해상도와 동일한 격자크기(500m)로 재구축하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 레이더 강우와 지점 강우의 비교

유출량 분석에 앞서 레이더 강우가 지점 강우를 얼마나 잘 재현하는지 비교하기 위해 4개의 강우사상(카눈, 집중호우, 불라벤, 산바)에 대하여 남강댐 유역의 면적평균 강우량, 면적평균 누가 강우량 및 강우 공간분포도를 분석하였다. Fig. 4에는 전체유역의 면적평균 강우량 비교결과를 나타내었고, Table 3에는 유출량산정 지점별(5개 유역) 면적평균 강우량을 비교하여 나타내었다. 집중호우와 태풍 산바의 경우 편의가 각각 0.902, 0.894로 태풍 카눈과 불라벤의 0.796, 0.576에 비해 상당히 양호한 결과를 보였다. 전반적으로 총량은 집중호우 때 신안(SA), 창촌(CC) 유역을 제외하고 모든 유역에서 지점 강우보다 레이더 강우가 낮은 값으로 분석되었다.

강우의 공간분포를 비교하기 위해 지점 강우자료는 IDW(Inverse Distance Weighting) 기법으로 공간내삽한 분포도를 이용하였다. 남강댐 유역에 걸쳐있는 집중호우 및 태풍의 영향을 알아보기 위해 본 연구에서 선정한 총 28개 관측소 외에 주변 16개 관측소를 추가하여 총 44개 관측소의 자료를 사용하여 Fig. 5와 같이 좀 더 넓은 영역에 대하여 비교하였다. Fig. 5는 4개의 강우사상에 대하여 각각 비가 가장 많이 온 날을 선정하여 강수량을 합산한 결과로, 강우의 공간적 패턴은 상당히 일치하지만 지점 강우를 이용한 IDW 공간내삽으로는 레이더 강우의 상세한 공간적 분포는 따라가지 못하는 한계점을 보였다. 특히, 2012년 8월 22일 발생한 집중호우의 경우처럼 호우의 공간적 패턴이 긴 띠 형식을 보이며 남강댐을 통과하는 경우 많은 공간적 오차가 발생했다. 실제로 신안(SA) 유역에서 집중호우가 통과하고 있는 지역은 유역 내 관측소가 거의 없어 IDW 공간분포도에는 강우

가 내리지 않는 것으로 분석되었다. 이처럼 레이더 강우는 지점 관측소가 없는 지역의 강우예측에 활용성이 매우 큰 것으로 분석되었다.

2. 지점 강우를 이용한 분포형 모형의 보정

본 연구에서는 2012년 7월~9월 사이에 남강댐유역에 영향을 주었던 4개의 강우사상 (카눈, 집중호우, 블라벤, 산바)에 대하여 지점 강우를 사용하여 모형의 보정을 수행하였으며, 상류부터 안의 (AU), 산청 (SC), 신안 (SA), 창촌 (CC), 유역 출구점인 남강댐방수로 지점 (NR)의 유량자료를 모의결과와 비교하는 방법으로 보정하였다. 모형의 보정을 수행하기 전에 지표유출, 토양수분, 침투, 침투 및 기저유출과 관련된 13개 매개변수 (지표 조도계수 n_{surf} , 하천조도계수 n_{str} , 하천형상계수 C_{str} , 논둑과 담수심사이의 기준 여유고 h_{pf} , 조도계수 감소상수 b , 초기토양 수분함량 SW_{ini} , 포화투수계수 K_{sat} , 유효투수계수 K_e , 습윤선 흡인수두 ψ_{wf} , 최대침투능 f_p , 침투조절계수 N , 기저발생위치 BF_{TH} , 기저기여상수 BF_{cns})에 대하여 민감도를 분석을 먼저 수행하였다. 지표유출과 관련된 하천조도계수와 지표조도계수는 침투유량에 영향을 미치고, 토양수분과 관련된 초기토양수분함량은 유출용적에 영향을 미치는 가장 민감한 변수로 분석되었다.

Table 3 Comparing area-average rainfall of each subbasin

Event	Watch Point	Area-Average Rainfall (mm)		Bias
		Radar	TM	
Khanun	AU	53.6	68.9	0.778
	SC	74.3	86.7	0.857
	SA	30.5	54.3	0.562
	CC	79.3	82.6	0.960
	NR	62.4	75.6	0.825
Heavy Rain	AU	122.9	156.6	0.785
	SC	183.5	207.9	0.883
	SA	290.7	272.3	0.937
	CC	372.1	345.5	0.929
	NR	250.9	257.3	0.975
Bolaven	AU	112.6	197.5	0.570
	SC	153.3	236.6	0.648
	SA	63.3	129.5	0.489
	CC	104.9	181.2	0.579
	NR	113.5	190.7	0.595
Sanba	AU	156.8	209.7	0.748
	SC	236.0	266.9	0.884
	SA	230.2	247.8	0.929
	CC	232.5	237.4	0.979
	NR	234.5	252.6	0.928
Average		157.9	187.9	0.840

Fig. 4 Area-average rainfall of each event

모형의 보정을 위해 지표유출 및 토양관련 매개변수를 시행착오법에 의해 보정을 수행하였다. 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)를 사용하였다. Table 4에는 보정에 사용된 매개변수를 정리하였으며, 4개 강우사상에 대한 지점별 보정 결과는 Table 5와 같다. 보정결과 유출수문곡선은 Fig. 6에 검정색 실선과 점선으로 나타내었다. 보정결과 R^2 , ME, VCI의 평균은 각각 0.85, 0.78, 1.09 %로 모의유량이 관측유량을 잘 재현하는 우수한 모

Fig. 5 Comparison of rainfall spatial distributions between Radar and TM IDW

Table 4 Model parameters for model calibration

Parameters	Unit	Min	Max	Definition	Value	Process
n_{surf}	AF	0.5	2.0	Manning's roughness coefficient of overland	1.00	Runoff
n_{str}	-	0.03	0.08	Manning's roughness coefficient of stream	0.051	Runoff
C_{str}	-	0.34	0.37	Channel shape constant	0.352	Runoff
h_{pf}	cm	0	30	Maximum freeboard of paddy field	15	Runoff
b	-	1	3	Control coefficient for paddy roughness	2	Runoff
SW_{ini}	%	10	100	Initial degree of soil saturation	76	Soil water
K_{sat}	cm/hr	0.5	10	Saturated hydraulic conductivity	2	Soil water
K_e	cm/hr	0.25	5	Effective hydraulic conductivity	0.6	Infiltration
Ψ_{wf}	cm	0.5	5	Wetting front suction head	1	Infiltration
f_p	cm/hr	0.01	0.1	Maximum percolation rate	0.65	Percolation
N	-	2	3	Coefficient for percolation	3	Percolation
BF_{TH}	-	0.25	0.65	Threshold constant for baseflow generation	0.42	Baseflow
BF_{cst}	-	0.005	0.05	Contribution constant of baseflow	0.03	Baseflow

의결과를 나타내었다. 침투유량도 비교적 잘 모의하고 있으며, 유출용적편차가 10 % 이내로 분석되어 남강댐유역의 홍수량산정에 적용성이 있는 것으로 판단된다.

3. 레이더 강우를 활용한 분포형 유출해석 결과

앞서 구축된 1시간 단위의 해상도 500 m의 레이더 강우자료를 KIMSTORM2 모형에 적용하여 분포형 유출해석 결과를 지점 강우를 적용했을 경우와 비교분석하고 레이더 강우의 활용성을 분석하였다. 지점 강우에 의해 보정된 매개변수를 그대로 적용하여 각 강우사상에 대하여 유출모의 결과에 따른 모형평가 결과를 비교하여 Table 6에 나타내었으며, 레이더의 평가가 우수하게 나타난 대표적인 유출수문곡선을 Fig. 6에 나타내었다. 태풍 카눈의 경우 평균 모형효율계수 ME는 레이더와 지점 강우가 각각 0.75, 0.77로 비슷한 수준으로 평가되었고, 유출용적편차는 지점 강우가 21 % 가량 크게 예측된 반면 레이더는 0.5 % 정도로 관측치와 거의 흡사하게 모의되었다. 집중호우의 경우 R^2 는 레이더는 0.85, 지점 강우가 0.84로 분석되었고, ME는 레이더가 0.81, 지점 강우가 0.79로 레이더를 적용한 유출결과가 더 우수하게 나타났다. 태풍 볼라벤의 경우에도 ME가 레이더는 0.73,

지점 강우는 0.65로 레이더가 훨씬 더 우수한 결과를 보였으며, 유출용적오차 역시 레이더를 적용한 경우가 2 % 가량 감소했다. 마지막으로 태풍 산바의 경우 레이더와 지점 강우의 R^2 와 ME의 평균이 거의 비슷한 값으로 나타나 유출해석에 있어 레이더의 활용성이 매우 우수한 것으로 분석되었다. Fig. 6의 유출수문곡선에서도 침투유량과 리세션 부분에서 레이더를 적용한 경우가 관측치에 더 근접하게 예측되었음을 알 수 있었다.

앞서 레이더와 지점강우의 공간분포를 비교분석한 결과 2012년 8월 22일 발생한 집중호우의 경우처럼 호우가 남강댐 유역 내 관측소가 없는 지역을 통과하는 경우 많은 공간적 오차가 발생함을 알 수 있었다. 이와 같이 지점 강우 관측소의 부재로 인해 정확한 강수량이 관측될 수 없었던 8월 22일~24일 동안 발생한 유출의 공간분포를 Fig. 7과 같이 비교하여 나타내었다. 레이더 강우와 지점 강우 분포도는 일별로 합산된 결과이고, 아래 유출분포도는 해당 시간에 유출변화를 나타내었다. 그 결과 8월 22일과 23일에 신안 (SA) 유역을 통과하는 강우에 의한 유출량은 레이더를 적용한 경우가 유출량이 더 많이 발생한 것을 알 수 있으며, 24일은 레이더와 지점 강우 분포도가 상당히 유사하게 예측되어 유출분포 또한 유사하게 모의되었다.

Table 5 Summary of model calibration

Event	Average Rainfall (mm)	Watch Point	Peak runoff (m ³ /s)		Runoff volume (10.06 m ³)		Model evaluation		
			Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	R ²	ME	VCI (%)
Khanun	68.9	AU	314.1	285.9	17.0	20.1	0.90	0.88	1.18
	86.7	SC	1191.3	1590.8	80.7	108.4	0.97	0.74	1.34
	54.3	SA	245.0	309.6	21.4	25.3	0.77	0.70	1.18
	82.6	CC	448.5	520.5	28.1	27.7	0.78	0.77	0.99
	75.6	NR	2322.3	2359.8	149.4	204.5	0.95	0.77	1.37
Heavy Rain	156.6	AU	282.0	226.4	26.0	25.5	0.69	0.69	0.98
	207.9	SC	1150.4	1416.4	132.9	175.7	0.86	0.68	1.32
	272.3	SA	1507.2	1117.4	112.4	93.8	0.92	0.88	0.83
	345.5	CC	966.6	1231.5	105.1	101.3	0.77	0.73	0.96
	257.3	NR	3687.3	3908.0	448.4	470.8	0.98	0.98	1.05
Bolaven	197.5	AU	562.8	706.6	48.7	49.8	0.74	0.66	1.02
	236.6	SC	4024.9	3839.3	244.5	275.6	0.96	0.95	1.13
	129.5	SA	346.2	497.6	41.0	56.6	0.58	0.24	1.38
	181.2	CC	678.2	869.7	69.1	59.4	0.70	0.69	0.86
	190.7	NR	3673.7	5206.7	367.7	427.4	0.88	0.70	1.16
Sanba	209.7	AU	737.7	921.2	42.6	42.6	0.91	0.87	1.00
	266.9	SC	6770.0	5908.6	288.3	291.5	0.96	0.95	1.01
	247.8	SA	3262.6	2496.3	110.8	105.1	0.85	0.83	0.95
	237.4	CC	2261.0	1903.8	85.3	77.2	0.86	0.85	0.91
	252.6	NR	13951.5	11118.2	569.1	618.8	0.98	0.96	1.09

Fig. 6 Comparison of observed and predicted hydrograph between Radar and TM IDW

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 2012년 강우 및 태풍사상에 대하여 레이더 강우자료와 지점 강우자료를 비교분석하고, 이를 분포형 강우-유출모형인 KIMSTORM2에 적용하여 유역 내의 홍수진행상황을 공간적으로 파악하고 레이더 강우의 활용성을 분석하였으며, 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 낙동강 비슬산 이증편과 강우레이더에 의해 관측되는 반경 100 km 내에 포함되는 남강댐 유역을 대상유역

으로 선정하였으며, 4개의 강우 이벤트 (카눈, 집중호우, 볼라벤, 산바)에 대하여 한강홍수통제소로부터 보정된 레이더 강우자료를 제공받았다. 레이더 강우를 분포형 모형에 적용하기 위해 LCC 좌표를 Bessel TM 좌표체계로 투영하고, 1시간 단위, 500 m 격자로 재구축하여 준비하였다.

2. 레이더 강우와 지점 강우를 비교분석한 결과, 유출량산정 지점별 면적평균 강우량은 대체적으로 레이더가 지점 강우보다 더 낮은 값으로 예측되었지만, 강우의 패턴은 상당히 일치하는 것으로 나타났으며, 평균 R^2 는 0.97, 편차가 0.84로 매우 우수

하게 분석되었다. 공간분포를 비교한 결과 특히 2012년 8월 22 일 발생한 집중호우의 경우 실제 유역에 지점 관측소의 부재로 인해 남강댐을 통과하는 호우를 레이더는 잘 나타내고 있지만 지점 강우는 잘 재현하지 못하였다.

3. 분포형 유출해석을 위해 유역의 전반적인 수문량에 대한 시간적 변화와 공간적인 분포를 파악할 수 있는 격자기반의 분포형 강우-유출모형인 KIMSTORM2를 선정하였으며, 지형 자료로 DEM, 흐름방향도, 토지피복도, 유효토심도, 토양종류도, 유역경계를 준비하고 5개의 유역 (AU, SC, SA, CC, NR)으로 분할하였다. 최종적으로 격자크기 500×500 m 해상도의 156행×137열의 총 21,372개의 셀로 모형을 구축하였다.

4. 지점 강우를 이용하여 모형의 보정을 수행하였으며, 상류부터 안의 (AU), 산청 (SC), 신안 (SA), 창춘 (CC), 유역 출구점인 남강댐방수로 지점 (NR)의 유량자료를 비교한 결과 R^2 , ME, VCI의 평균은 각각 0.85, 0.78, 1.09 %로 모의유량이 관측유량을 잘 재현하였다. 침투유량도 비교적 잘 모의하였으며, 유출용적편차가 10 % 이내로 분석되었다.

5. 레이더와 지점 강우를 분포형 모형에 적용하여 유출을 비교분석한 결과 평균 R^2 는 0.85로 같은 값을 보였고, ME는 레이더와 지점 강우 각각 0.79, 0.78로 레이더가 우수한 결과로 나타났다. 유출용적오차는 레이더가 4 %, 지점 강우가 9 %로 유출해석에 있어 레이더의 활용성이 매우 우수한 것으로 분석되었다.

Table 6 Comparison of model results between Radar and TM IDW

Event	Watch Point	Model evaluation					
		R^2		ME		VCI (%)	
		Radar	TM	Radar	TM	Radar	TM
Khanun	AU	0.90	0.90	0.86	0.88	1.01	1.18
	SC	0.95	0.97	0.85	0.74	1.23	1.34
	SA	0.75	0.77	0.55	0.70	0.76	1.18
	CC	0.67	0.78	0.61	0.77	1.01	0.99
	NR	0.95	0.95	0.89	0.77	1.23	1.37
Heavy Rain	AU	0.73	0.69	0.62	0.69	0.76	0.98
	SC	0.89	0.86	0.87	0.68	1.14	1.32
	SA	0.89	0.92	0.89	0.88	0.90	0.83
	CC	0.78	0.77	0.71	0.73	1.04	0.96
	NR	0.97	0.98	0.97	0.98	1.02	1.05
Bolaven	AU	0.81	0.74	0.80	0.66	0.98	1.02
	SC	0.97	0.96	0.97	0.95	1.01	1.13
	SA	0.54	0.58	0.52	0.24	0.86	1.38
	CC	0.69	0.70	0.58	0.69	0.66	0.86
	NR	0.87	0.88	0.76	0.70	1.03	1.16
Sanba	AU	0.93	0.91	0.84	0.87	0.76	1.00
	SC	0.93	0.96	0.90	0.95	0.93	1.01
	SA	0.88	0.85	0.87	0.83	0.91	0.95
	CC	0.83	0.86	0.82	0.85	0.90	0.91
	NR	0.99	0.98	0.98	0.96	1.05	1.09
Average		0.85	0.85	0.79	0.78	0.96	1.09

Fig. 7 Comparison of spatial distributions of rainfall and discharge between Radar and TM IDW (heavy rain)

본 연구에서 활용된 비슬산 이중편파 레이더자료는 강우의 오차분석과 유출량 비교 및 모형효율 평가에 따른 결과로 보았을 때 레이더 강우의 공간적 분포와 규모의 활용성이 우수한 것으로 분석되었다. 또한 레이더 강우와 분포형 모형에 의한 공간유출 및 침투유출의 재현 가능성을 확인하였다. 앞으로 지점 강우 관측소의 강우량과 레이더 강우량, 분포형 모형이 함께 고려되어 홍수예측에 활용된다면 유역 내 보다 정확한 홍수진행상황의 공간적인 파악이 가능할 것으로 판단된다.

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

REFERENCES

1. 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 (in Korean).
2. Bedient, P. B., Hoblit, B. C., Gladwell, D. C., and Vieux, B. E., 2000. NEXRAD radar for flood prediction in Houston. *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE* 5(3): 269-277.
3. Choi, K. H., K. Y. Han, S. H. Kim, and C. H. Lee, 2006. Development of a flood runoff and inundation analysis system associated with 2-D rainfall data generated using radar: III. 2-D flood inundation simulation. *Journal of the Korea Water Resources Association* 39(4): 347-362 (in Korean).
4. Hellweger, F. L., 1997. AGREE-DEM Surface Reconditioning System. University of Texas, <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishydro/ferdi/research/agree/agree.html>.
5. Hunter S., Vieux B., Ogden, F., Niedzialek J., Downer, C., Addiego, J., Daraio, J., 2003. A test of two distributed hydrologic models with WSR-88D radar precipitation data input in Arizona. 31st Intl. Conf. on Radar Meteorology, 6-12 Aug. 2003, Seattle, Washington.
6. Jeon, B. K., C. K. Lee, and Y. S. Kim, 2012. Evaluation of rainfall measurement capability of dual polarization radar 12(2): 215-224 (in Korean).
7. Jinkang D., Shunping X., Youpeng X., Chong-yu X., Singh VP, 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.
8. Johnson, D., Smith, M., Koren, V., and Finnerty, B. 1999. Comparing mean areal precipitation estimates from NEXRAD and rain gauge networks. *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE* 117-124.
9. Jung I. K., and S. J. Kim. 2003. Comparison of DEM preprocessing method for efficient watershed and stream network extraction, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 23(3D): 393-400 (in Korean).
10. Jung I. K., H. J. Shin, J. H. Park and S. J. Kim, 2008. A Modified grid-based KIneMatic wave STOrM Runoff Model (ModKIMSTORM) (II) - application and analysis -. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 28(6B): 709-721 (in Korean).
11. Jung I. K., J. Y. Park, M. J. Park, H. J. Shin, H. K. Jung, 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 (in Korean).
12. 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 (in Korean).
13. Kim Y. S., K. H. Jang, 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 (in Korean).
14. 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 (in Korean).
15. 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 (in Korean).

16. Kim, S. J., Y. S. Kwon, K. H. Lee, and H. S. Kim, 2010. Radar rainfall adjustment by artificial neural network and runoff analysis. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 30(2B): 159-167 (in Korean).
17. Kim, W. I., K. D. Oh, W. S. Ahn, and B. H. Jun, 2008. Study on flood prediction system based on radar rainfall data. *Journal of the Korea Water Resources Association* 41(11): 1153-1162 (in Korean).
18. 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 (in Korean).
19. 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 (in Korean).
20. Smith, J. A., M. L. Baeck, K. L. Meierdiercks, A. J. Miller, and W. F. Krajewski, 2007. Radar rainfall estimation for flash flood forecasting in small urban watersheds. *Advances in Water Resources* 30: 2087-2097.
21. Sun, S., R. G. Mein, T. D. Keenan, and J. F. Elliott, 2000. Flood Estimation using radar and raingage data. *Journal of Hydrology* 239: 4-18.
22. Winchell, M., H. V. Gupta, and S. Sorooshian, 1998. On the simulation of infiltration and saturation excess runoff using radar based estimations: Effects of algorithm uncertainty and pixel aggregation. *Water Resources Research* 34(10): 2655-2670.