

분포형 강우유출모형 KIMSTORM을 이용한 침수실적자료와의 비교를 통한 레이더강우의 효용성 연구

A Study on the Effectiveness of Radar Rainfall by Comparing with Flood Inundation Record Map Using KIMSTORM (Grid-based KInEMatic Wave STOrM Runoff Model)

안 소 라* / 정 충 길** / 김 성 준***

Ahn, So Ra / Jung, Chung Gil / Kim, Seong Joon

Abstract

The purpose of this study is to explore the effectiveness of dual-polarization radar rainfall by comparing with the flood inundation record map through KIMSTORM (Grid-based KInEMatic wave STOrM Runoff Model). For Namgang dam (2,293km²) watershed, the Bisl dual-polarization radar data for 3 typhoons (Khanun, Bolaven, Sanba) and 1 heavy rain event in 2012 were prepared. For both 28 ground rainfall data and radar rainfall data, the model was calibrated using observed discharge data at 5 stations with R², Nash and Sutcliffe Model Efficiency (ME) and Volume Conservation Index (VCI). The calibration results of R², ME and VCI were 0.85, 0.78 and 1.09 for ground rainfall and 0.85, 0.79, and 1.04 for radar rainfall respectively. The flood inundation record areas (SY and MD/SG district) by typhoon Sanba were compared with the distributed modeling results. The spatial distribution by radar rainfall produced more surface runoff from the watershed and simulated higher stream discharge than the ground rainfall condition in both SY and MD/SG district. In case of MD/SG district, the stream water level by radar rainfall near the flood inundation area showed 0.72 m higher than the water level by ground rainfall.

Keywords : radar rainfall, KIMSTORM, distributed rainfall-runoff model, storm runoff modeling, flood record map

요 지

본 연구의 목적은 이중편파 레이더 강우자료와 격자기반 분포형 강우-유출 모형인 KIMSTORM (KInEMatic wave STOrM Runoff Model)을 이용하여 유출해석을 수행하고, 침수실적자료와의 비교를 통해 레이더 강우자료의 효용성을 검토하는데 있다. 남강댐 유역(2,293 km²)을 대상으로, 2012년 4개의 강우 이벤트(집중호우, 카눈, 볼라벤, 산바)에 대하여 비슬산 레이더 강우자료를 사용하였다. 분포형 모형은 28개 지점 강우와 레이더 강우를 이용하여 보정되었으며, R² (coefficient of determination), ME (model efficiency), VCI (volume conservation index)를 이용하여 적용성을 평가하였다. 모형의 보정결과, R², ME, VCI의 평균이 지점강우를 이용한 경우 각각 0.85, 0.78, 1.09, 레이더 강우를 이용한 경우 각각 0.85, 0.78, 0.96의 결과를 보였다. 태풍 산바에 의한 하천범람 침수실적자료의 두 침수지역(신연지구와 문대/신기지구)과 레이더와 지상강우에 의한 유출분석 결과를 비교하였다. 신연지구와 문대/신기지구 두 침수지역에서 레이더강우가 지상강우보다 더 많은 지역강우를 발생시켜 지표유출량을 더 크게 모의하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 수위관측소가 존재하는 문대/신기지구의 경우, 지점강우보다 레이더 강우가 침수지역내 수위관측소의 실제 침투유출량에 가깝게 모의하였으며, 하천수위도 0.72 m 높게 모의하였다.

핵심용어 : 레이더 강우, KIMSTORM, 분포형 강우-유출모형, 홍수유출 모델링, 침수실적도

* 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사수료 (e-mail: ahnsora@konkuk.ac.kr)

Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

** 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (e-mail: wjd0823@konkuk.ac.kr)

Doctoral Student, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

*** 교신저자, 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수 (e-mail: kimsj@konkuk.ac.kr, Tel: 82-2-450-3749)

Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

1. 서론

소방방재청의 재해연보에 따르면 우리나라 자연재해의 주요 피해원인을 살펴보면 자연재해의 90% 이상은 풍수해이며, 태풍, 홍수, 호우, 강풍, 풍랑, 해일, 조수, 대설과 같은 풍수해의 주요 피해유형 중 홍수는 대표적인 자연재해로 막대한 인명 손실과 재산 피해를 야기하고 있다. 특히 우리나라의 경우 장마와 태풍으로 인한 여름철 집중호우가 발생하고, 하천의 경사가 급하여 호우가 하천 유역에 집중하는 재해특성을 가지고 있다. 또한 최근 기후변화에 따른 슈퍼태풍과 예측이 어려운 대규모 국지성 집중호우로 인해 홍수가 더욱더 빈번하게 발생되고 있으며, 홍수피해 규모가 커지고 발생 빈도도 증가하고 있다. 이와 같은 홍수재해의 예방 및 저감을 위하여 현재 우리나라에서는 침수흔적도, 침수예상도, 재해정보지도, 홍수위험지도 등 다양한 부처에서 재해지도를 작성하고 있다. 이는 재해예방대책 수립을 위한 자료로 활용되며, 침수예상분석 및 재해정보지도를 작성하는데 기본 자료로 활용되고 있다.

이러한 홍수재해 관리를 위해서는 폭 넓고 정확한 강우자료의 측정과 수집은 매우 중요하며, 침수지역에 대한 신속하고 정확한 현황 파악도 함께 이루어져야 한다. 홍수재해는 일정 지역을 대상으로 발생하는 공간적인 현상이므로, 레이더 강우와 같은 공간적 특성을 가지는 자료의 활용성은 매우 클 것으로 생각된다. 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 홍수진행 상황을 공간적으로 파악할 수 있는 장점이 있다(Ahn et al., 2013).

최근 국내에서는 레이더를 강우-유출모형에 적용하여 유출해석을 수행함으로써, 홍수범람 및 홍수예보 등에 레이더의 활용성을 검증하는 연구가 활발히 진행되고 있다. Choi et al. (2006)은 낙동강 감천유역을 대상으로 기상청 C-band 레이더를 이용하여 유역의 홍수량을 산정하고 홍수 범람모의를 수행하였으며, 그 결과 실제 홍수흔적과 홍수위 자료와 잘 일치됨을 확인하였다. Park et al. (2008)은 용담댐 유역을 대상으로 S-band 진도레이더 자료를 이용하여 분포형 모형인 Vflo에 적용하여 홍수유출분석을 수행하였으며, 실무에서의 홍수량 예측에 적용성을 확인하였다. Kim et al. (2008)은 임진강 유역을 대상으로 레이더

강우를 Vflo와 ModClark 모형에 적용하여 미계측유역의 홍수유출 모의를 수행하였으며, 미계측 유역에서의 유출모의를 위한 레이더 강우의 활용성을 분석하였다. Kim et al. (2008)은 한강유역을 대상으로 기상청 레이더 CAPPI 자료를 분포형 모형인 Vflo에 적용하여 수문해석에 활용하였으며, 홍수예보에 있어 활용성을 확인하였다. 국외 연구로 Finnerty et al. (1997)은 미국 Illinois 강 유역을 대상으로 레이더 강우를 SAC-SMA model에 적용하여 유역의 시공간적 유출해석을 수행하였으며, 유역의 유출량 예측에 활용성을 검토하였다. Getirana et al. (2001)은 아마존 Branco 강 유역을 대상으로 레이더 강우와 MGB-IPH model을 이용하여 유역의 유량을 모니터링 하였으며, 유출해석에 있어 공간강우의 활용성을 검토하였다. Cole and Moore (2009)와 Cole and Moore (2013)은 영국의 Kent와 Darwen 유역을 대상으로 레이더 강우를 분포형 모형인 G2G Model에 적용하여 홍수량을 산정하였으며, 미계측 유역에서의 활용성을 평가하였다.

위에서 언급한 많은 연구사례와 같이 레이더 강우를 유출모형에 적용하여 홍수유출 분석에 활용하고 있으며, 그 활용성이 많이 검증되어왔다. 본 연구에서는 레이더 강우를 더욱더 다양한 분야에 활용하고자 하는 측면에서 실제 침수실적자료와의 비교를 통한 레이더 강우의 효용성을 검토해보고자 한다.

따라서 본 연구에서는 지상 강우관측소의 지점 강우와 비슬산 이중편파 레이더 강우를 분포형 강우-유출모형인 KIMSTORM에 적용하여 남강댐 유역의 전체적인 홍수 진행상황을 공간적으로 파악하고, 지점 강우와 레이더 강우의 유출 재현가능성을 분석하고자 한다. 또한 남강댐 유역 내 태풍에 의한 하천범람이 발생했던 두 지역의 침수실적자료를 수집하여 지점 강우와 레이더 강우에 의한 유출분석 결과와의 비교를 통해 효용성을 평가하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상유역

본 연구의 대상유역인 남강댐 유역(2,293 km²)은 낙동강 제 1지류인 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(Jung et al., 2008). 남강댐 유역의 연평균 기온은 13°C, 연평균 강수량은 1,772 mm이며, 여름철에 몬순기후와 남

해안의 난류가 어우러져 태풍을 동반하는 다우지역으로 강우발생시 유량의 집중도가 높은 지역이다(Ahn et al., 2013). Fig. 1에는 대상유역 근처의 강우관측소(28개소) 및 수위관측소(5개소) 현황을 타나내고 있으며, 본 연구에 사용한 비슬산 레이더 관측소 반경 약 100km 내에 위치하고 있다.

2.2 분포형 모형의 개요

본 연구에서 적용한 KIMSTORM(Grid-based KlineMatic wave STORM Runoff Model)은 격자기반 분포형 강우-유출모형으로 Kim (1998)에 의해 처음으로 개발되었고, Jung et al. (2008)에 의해 수정 및 보완되어 그동안 여러 규모의 유역에 적용하여 평가된 바 있다. 본 연구에서 이용한 KIMSTORM은 Jung et al. (2008)에 의해 수정 및 보완된 최신버전이다. KIMSTORM 모형은 대상유역을 일정한 크기의 격자로 구성하고, 각각의 셀에 대한 지형, 지표 및 토양의 물리적인 특성들을 매개변수로 하여 주어진 시간간격별로 침투, 침루, 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 3계층(지표, 불포화 및 포화 지표하층)으로, 하천셀은 단일층으로 구성되어 있으며 각각의 셀에 대해 상기 식들에 의하여 계산된 결과들을 이용하여 격자물수지가 계산되며, 임의 시간

에 계산된 격자별 물수지 결과는 입력자료 및 모형의 매개변수와 함께 다음시간으로 전달되어 각 격자의 물수지 변화를 추적하게 된다(Kim, 1998). 모형의 격자물수지 구조는 Fig. 2와 같고 지표와 토양층에 대해 Eqs. (1) and (2)의 물수지식을 적용하고 있다(Jung et al., 2010).

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

$$= P(t)_i + \sum Q_{surf.in.i} + \sum Q_{sub.in.i} + Q_{bf.in.i} - Q_{surf.out.i} \quad \text{for stream flow}$$

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

여기서, i 는 셀주소, S_i 는 저류량(m^3), $P(t)_i$ 는 강우량(m^3), $F(t)_i$ 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 가정된 기저유입량(m^3/sec), SW_i 는 불포화층의 격자토양수분(m^3), $DR(t)_i$ 는 침루량(m^3), t 는 시간간격(sec)이다.

2.3 지점/레이더 강우 및 유량자료

분석에 사용될 지점 강우자료로 남강댐 유역에 영향을 받는 총 28개 관측소(국토부 7개소, 수자원공사 21개소)

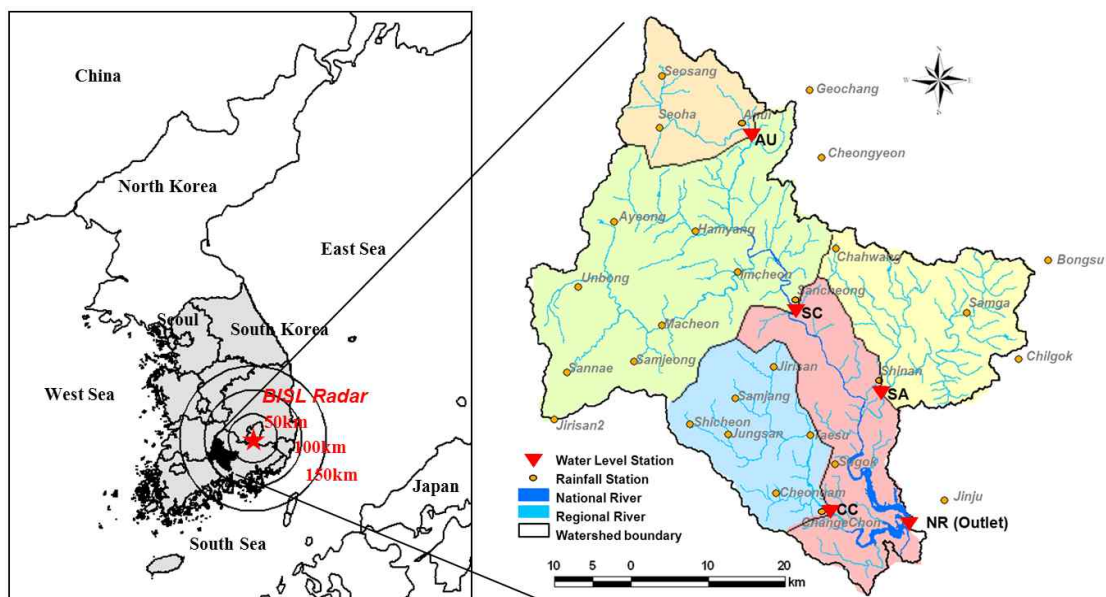


Fig. 1. Location of Namgang Dam Watershed (Ahn et al., 2013)

의 시단위 강우자료를 수집하여 사용하였다. 수집된 지점 강우자료를 분포형 모형인 KIMSTORM 모형에 적용하기 위해 IDW (Inverse Distance Weighting) 기법으로 공간내삽 하여 강우 공간분포도를 500 m 해상도로 구축하여 모형에 적용하였다.

레이더 강우자료는 2010년부터 비슬산에 설치되어 운영 중인 이중편파 레이더 자료를 사용하였다. 특히 비슬산 강우레이더는 선진외국에서도 활용초기 상태이고 우리나라에서는 처음으로 도입된 현업용 이중편파레이더로 낙동강 유역의 홍수예보에 주로 활용하고 있다(Jeon et al., 2012). 이중편파레이더 자료는 10분 간격, 250 m 해상도로 보정된 자료를 국토교통부 한강홍수통제소로부터 제공받았으며, KIMSTORM 모형의 적용을 위해 좌표변환, 격자크기 500 m, 1시간 단위로 재구축하였다. 레이더 자료의 보정에 관한 이론적 내용은 Jeon et al. (2012)에 자세히 수록되어 있다. 또한 구축된 레이더 강우가 지점 강우를 얼마나 잘 재현하는지에 대한 분석결과는 Ahn et al. (2013)에 자세히 기술되어 있으며, 유역의 강우예측에 활용성이 매우 큰 것으로 분석된 바 있다. Table 1은 분석에 적용된 강우 및 태풍사상의 특성을 정리한 것으로 2012년 4개의 강우사상(카눈, 집중호우, 블라벤, 산바)을 모형의 보정에 이용하였다.

모형의 보정 및 모의결과의 평가를 위한 하천유량자료는 남강댐 유역 내 4개 수위관측소인 안의(AU), 산청(SC),

신안(SA), 창촌(CC)의 시단위 수위자료를 유량자료로 환산하여 사용하였고, 유역 출구점에 위치한 남강댐방수로 지점(NR)의 시단위 댐 유입량을 사용하였다.

2.4 GIS 자료 및 공간매개변수

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, 토지피복도는 2000년 5월 8일 촬영된 Landsat ETM+ 위성영상을 사용하여 구축하였으며, 6개의 항목(수역, 도시, 나지, 산림, 논, 밭)으로 분류되어 있다. 전체면적의 78%는 산림, 12%는 논, 8%는 밭이 차지한다. 유효토심도 및 토양종류도는 농업과학기술원에서 제공하는 벡터형태의 1:50,000 개략토양도의 유효토심과 토양종류 속성을 격자화하여 사용하였다. 마지막으로 레이더 및 지점강우의 비교분석 및 모형의 보정을 위한 유역경계는 수위관측소를 기준으로 5개의 유역(AU, SC, SA, CC, NR)으로 분할하였다.

2.5 침수실적자료 및 침수지역 파악

모형의 보정에 이용된 4개의 강우 및 태풍사상 중 기간

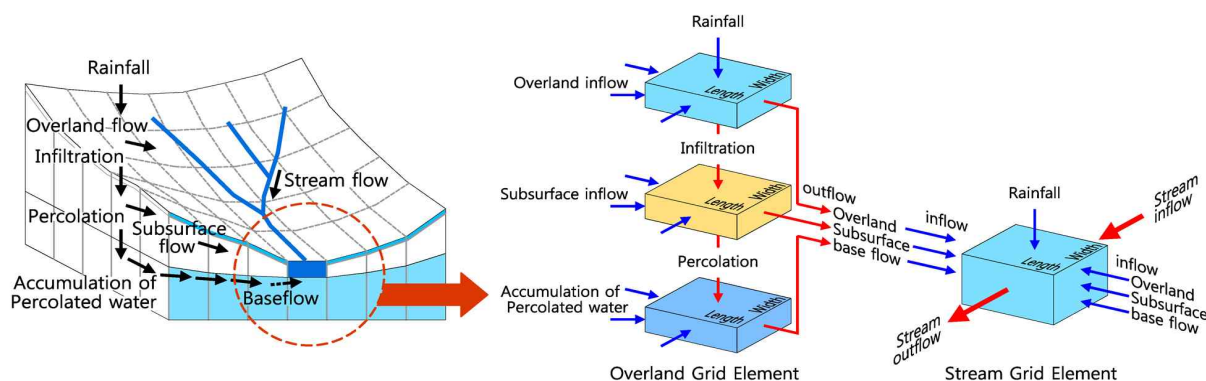


Fig. 2. The Water Balance Components of a Cell for Overland and Stream Grid Elements (Jung et al., 2008)

Table 1. Characteristics of Selected Events

| Event | Date of event | Duration (hr) | 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 |

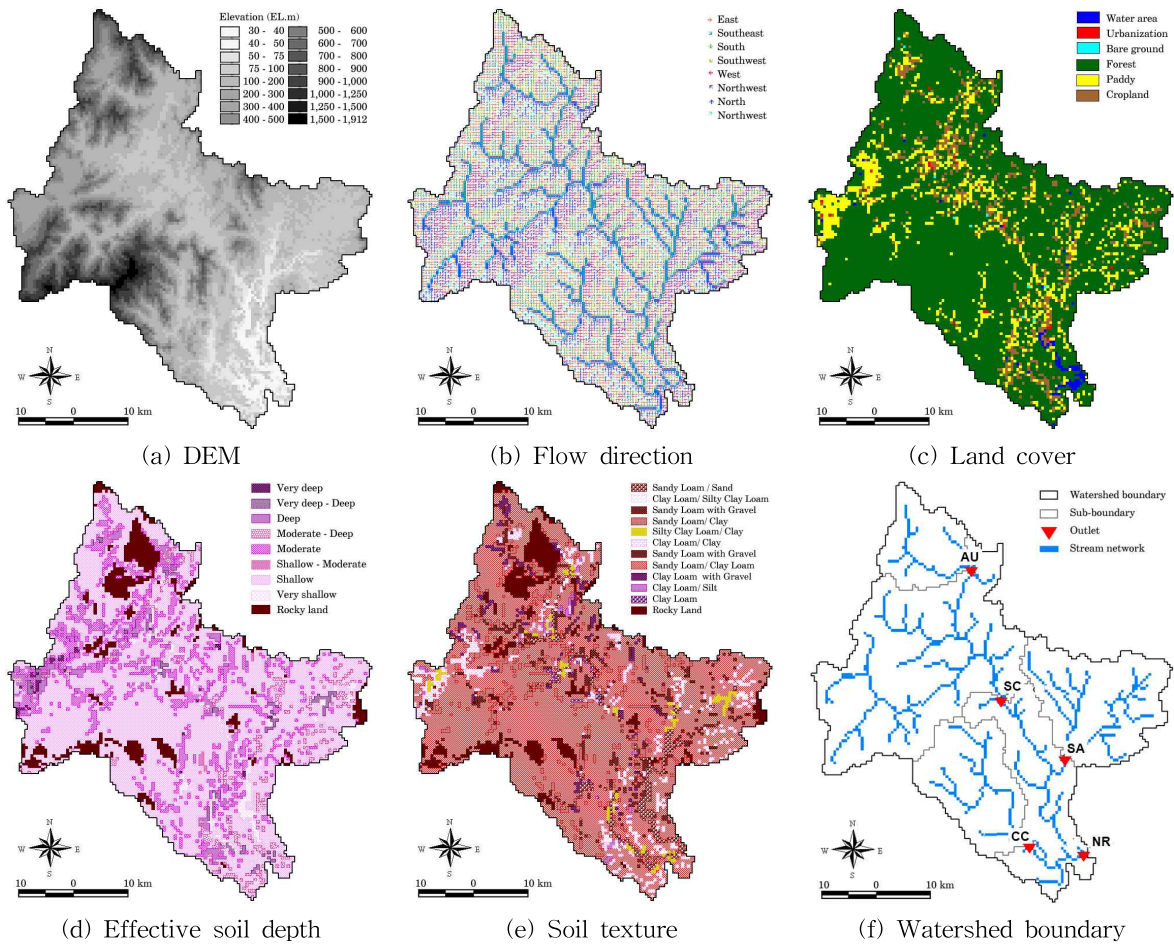


Fig. 3. GIS Input Data (Ahn et al., 2013)

이 일치하는 태풍 산바에 의한 침수실적자료를 대한 지적 공사로부터 제공받았다. 침수발생 기간은 2012년 9월 16~17일이며, 침수면적은 1.95 km², 침수원인은 집중호우 및 태풍 산바에 의한 하천범람이다(Fig. 4). 침수된 지역은 크게 두 지역으로 신연지구(SY)와 문대/신기지구(MD/SG)이다. 이중 문대/신기지구를 흐르는 남강은 신안면 신안리에서 양천과 합류하고 단성면 목곡리, 소남리로 흘러드는데 이곳은 과거 태풍 때마다 잦은 범람으로 침수 피해를 입어야 했던 곳이다. Fig. 4에서와 같이 두 지역의 침수지역은 하천부근으로 태풍에 의해 하천범람이 발생했음을 알 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 모형의 보정

본 연구에서는 2012년 7~9월 사이에 남강댐유역에 영향을 주었던 4개의 강우사상(카눈, 집중호우, 불라벤, 산

바)에 대하여 지점 강우와 레이더 강우를 적용하여 동일한 매개변수를 사용하여 모형의 보정을 수행하였다. 상류부터 안의(AU), 산청(SC), 신안(SA), 창춘(CC), 유역 출구점인 남강댐방수로 지점(NR)의 유량자료를 모의결과와 비교하는 방법으로 보정하였다. KIMSTORM 모형의 매개변수는 지표유출, 토양수분, 침투, 침루 및 기저유출과 관련된 13개 매개변수(지표조도계수 n_{surf} , 하천조도계수 n_{str} , 하천형상계수 C_{str} , 논둑과 담수심사이의 기준 여유고 h_{pf} , 조도계수 감소상수 b , 초기토양수분함량 SW_{imi} , 포화투수계수 K_{sat} , 유효투수계수 K_e , 습윤선 흡인수두 ψ_{wf} , 최대침투능 f_p , 침루조절계수 N , 기저발생위치 BF_{TH} , 기저기여상수 BF_{cns})로, 사용된 매개변수는 Table 2에 정리하였고 보정방법은 Ahn et al. (2013)에 자세히 기술되어 있다.

모형의 적용성 평가를 위해 유출량에 대한 결정계수 (R^2), Nash and Sutcliffe (1970)가 제안한 모형효율계수 (Model Efficiency, ME), Jinkang et al. (2007)이 적용한 바 있는 유출용적지수(volume conservation index, VCI)

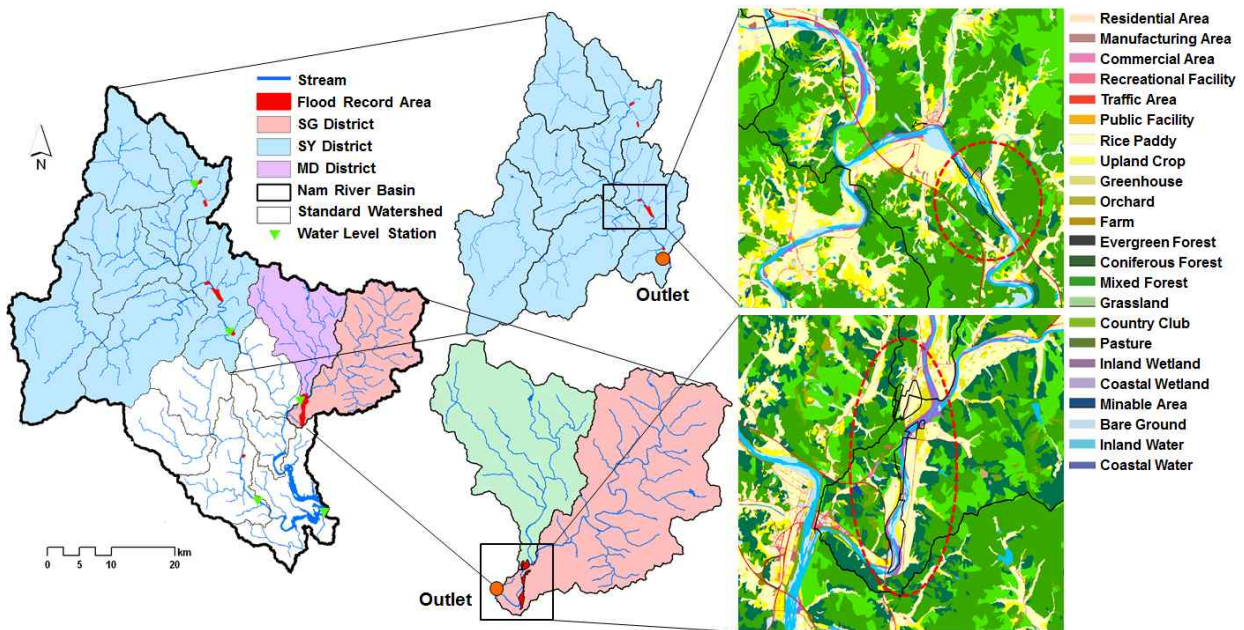


Fig. 4. The September 2012 Flood Record Area for by Typhoon Sanba

Table 2. Model Parameters For Model Calibration (Ahn et al., 2013)

| 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_{cnst} | - | 0.005 | 0.05 | Contribution constant of baseflow | 0.03 | Baseflow |

를 사용하였다. 4개 강우사상에 대한 지점별 보정 결과는 Table 3에 정리하였고, 레이더의 평가가 우수하게 나타난 대표적인 유출수문곡선을 Fig. 5에 나타내었다. 보정결과 R^2 , ME의 평균은 지점 강우의 경우 각각 0.85, 0.78로 모의되었고, 레이더 강우의 경우 0.85, 0.79로 두 가지 강우 모두 모의유량이 관측유량을 잘 재현하는 우수한 모의결과를 나타내었다. VCI의 평균은 지점 강우의 경우 1.09로 9%의 오차를 보였고, 레이더 강우의 경우 0.96로 4%의 오차를 보

였다. 침투유량도 관측치와 비교하여 지점강우에 비해 레이더 강우가 비교적 잘 모의하고 있으며, 유출용적편차가 두 강우 모두 10% 이내로 분석되어 남강댐유역의 홍수량산정, 침투유출 재현가능성을 확인하였다. 남강댐 유역의 지점 강우와 레이더를 이용한 시공간적 유출해석 결과는 Ahn et al. (2013)에 자세히 기술되어 있으며, 유출해석에 있어 레이더의 활용성이 매우 우수한 것으로 분석되었다.

Table 3. Comparison of Model Calibration Results between Radar and TM IDW

| Event | Average Rainfall (mm) | | Watch Point | Peak runoff (m ³ /s) | | | Runoff volume (106 m ³) | | | Model evaluation | | | | | |
|------------|-----------------------|-------|-------------|---------------------------------|----------|------------|-------------------------------------|---------|------------|------------------|-------|------|-------|------|-------|
| | TM | Radar | | Obs. | Sim. TM | Sim. Radar | Obs. | Sim. TM | Sim. Radar | R ² | | ME | | VCI | |
| | | | | | | | | | | TM | Radar | TM | Radar | TM | Radar |
| Khanun | 68.9 | 53.6 | AU | 314.1 | 285.9 | 247.9 | 17.0 | 20.1 | 17.2 | 0.90 | 0.90 | 0.88 | 0.86 | 1.18 | 1.01 |
| | 86.7 | 74.3 | SC | 1,191.3 | 1,590.8 | 1,499.0 | 80.7 | 108.4 | 99.3 | 0.97 | 0.95 | 0.74 | 0.85 | 1.34 | 1.23 |
| | 54.3 | 30.5 | SA | 245.0 | 309.6 | 165.4 | 21.4 | 25.3 | 16.3 | 0.77 | 0.75 | 0.70 | 0.55 | 1.18 | 0.76 |
| | 82.6 | 79.3 | CC | 448.5 | 520.5 | 612.6 | 28.1 | 27.7 | 28.3 | 0.78 | 0.67 | 0.77 | 0.61 | 0.99 | 1.01 |
| | 75.6 | 62.4 | NR | 2,322.3 | 2,359.8 | 2,077.7 | 149.4 | 204.5 | 183.5 | 0.95 | 0.95 | 0.77 | 0.89 | 1.37 | 1.23 |
| Heavy Rain | 156.6 | 122.9 | AU | 282.0 | 226.4 | 161.1 | 26.0 | 25.5 | 19.7 | 0.69 | 0.73 | 0.69 | 0.62 | 0.98 | 0.76 |
| | 207.9 | 183.5 | SC | 1,150.4 | 1,416.4 | 1,168.3 | 132.9 | 175.7 | 151.6 | 0.86 | 0.89 | 0.68 | 0.87 | 1.32 | 1.14 |
| | 272.3 | 290.7 | SA | 1,507.2 | 1,117.4 | 1,471.6 | 112.4 | 93.8 | 101.3 | 0.92 | 0.89 | 0.88 | 0.89 | 0.83 | 0.90 |
| | 345.5 | 372.1 | CC | 966.6 | 1,231.5 | 1,263.0 | 105.1 | 101.3 | 109.7 | 0.77 | 0.78 | 0.73 | 0.71 | 0.96 | 1.04 |
| | 257.3 | 250.9 | NR | 3,687.3 | 3,908.0 | 4,300.6 | 448.4 | 470.8 | 458.7 | 0.98 | 0.97 | 0.98 | 0.97 | 1.05 | 1.02 |
| Bolaven | 197.5 | 112.6 | AU | 562.8 | 706.6 | 643.8 | 48.7 | 49.8 | 26.1 | 0.74 | 0.81 | 0.66 | 0.80 | 1.02 | 0.98 |
| | 236.6 | 153.3 | SC | 4,024.9 | 3,839.3 | 4,028.1 | 244.5 | 275.6 | 158.6 | 0.96 | 0.97 | 0.95 | 0.97 | 1.13 | 1.01 |
| | 129.5 | 63.3 | SA | 346.2 | 497.6 | 271.2 | 41.0 | 56.6 | 21.4 | 0.58 | 0.54 | 0.24 | 0.52 | 1.38 | 0.86 |
| | 181.2 | 104.9 | CC | 678.2 | 869.7 | 652.3 | 69.1 | 59.4 | 28.5 | 0.70 | 0.69 | 0.69 | 0.58 | 0.86 | 0.66 |
| | 190.7 | 113.5 | NR | 3,673.7 | 5,206.7 | 4,855.6 | 367.7 | 427.4 | 216.3 | 0.88 | 0.87 | 0.70 | 0.76 | 1.16 | 1.03 |
| Sanba | 209.7 | 156.8 | AU | 737.7 | 921.2 | 547.8 | 42.6 | 42.6 | 32.5 | 0.91 | 0.93 | 0.87 | 0.84 | 1.00 | 0.76 |
| | 266.9 | 236.0 | SC | 6,770.0 | 5,908.6 | 5,822.8 | 288.3 | 291.5 | 269.0 | 0.96 | 0.93 | 0.95 | 0.90 | 1.01 | 0.93 |
| | 247.8 | 230.2 | SA | 3,262.6 | 2,496.3 | 3,321.2 | 110.8 | 105.1 | 100.3 | 0.85 | 0.88 | 0.83 | 0.87 | 0.95 | 0.91 |
| | 237.4 | 232.5 | CC | 2,261.0 | 1,903.8 | 2,186.2 | 85.3 | 77.2 | 76.5 | 0.86 | 0.83 | 0.85 | 0.82 | 0.91 | 0.90 |
| | 252.6 | 234.5 | NR | 13,950.5 | 11,118.2 | 12,547.7 | 569.1 | 618.8 | 594.6 | 0.98 | 0.99 | 0.96 | 0.98 | 1.09 | 1.05 |
| Average | 187.9 | 157.9 | - | 2,419.1 | 2,321.7 | 2,392.2 | 149.4 | 162.9 | 135.5 | 0.85 | 0.85 | 0.78 | 0.79 | 1.09 | 0.96 |

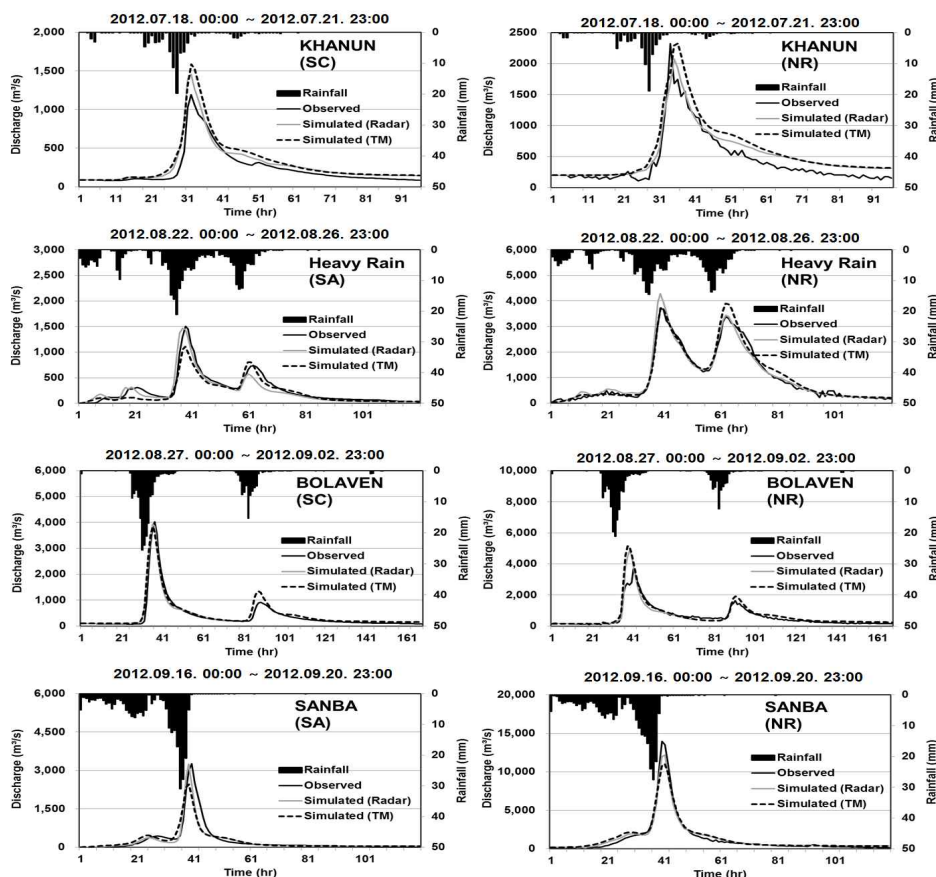


Fig. 5. Comparison of Observed and Predicted Hydrograph between TM IDW and Radar (Ahn et al., 2013)

3.2 침수기간 동안의 지점 및 레이더 강우 비교

앞서 남강댐 유역의 유출해석에 있어 지점 강우와 비교하여 레이더 강우의 우수한 활용성을 확인하였다. 2012년 태풍 산바에 의한 침수실적자료를 활용하여 침수분석에 있어 레이더 강우의 활용성을 분석해보고자 침수기간 동안의 지점 및 레이더 강우를 비교분석하였다. 침수가 발생한 2012년 9월 16~17일 동안 가장 큰 강우가 발생한 시간은 9월 17일 8시~15시(8시간)이다.

Fig. 6은 신연지구(SY)의 강우 및 누가강우 그래프, 산

점도를 나타내었고, 가장 큰 강우가 발생한 8시간 동안의 지점 및 레이더의 공간강우분포도를 비교하여 나타내었다. 누가강우량은 지점 강우에 비해 레이더 강우가 낮게 분석되었으나, R^2 가 0.94로 상당히 양호한 결과를 보였다. 공간강우의 경우 전체적인 강우패턴을 잘 재현하고 있으며, 비가 가장 많이 온 시간인 12시에 신연지구(SY)에 발생한 국지적인 강우를 레이더 강우가 비교적 잘 재현하고 있음을 알 수 있었다. Fig. 7은 마찬가지로 문대/신기지구(MD/SG)의 강우 및 누가강우 그래프, 산점도를 나타내었고, 가장 큰 강우가 발생한 8시간 동안의 지점 및 레이더

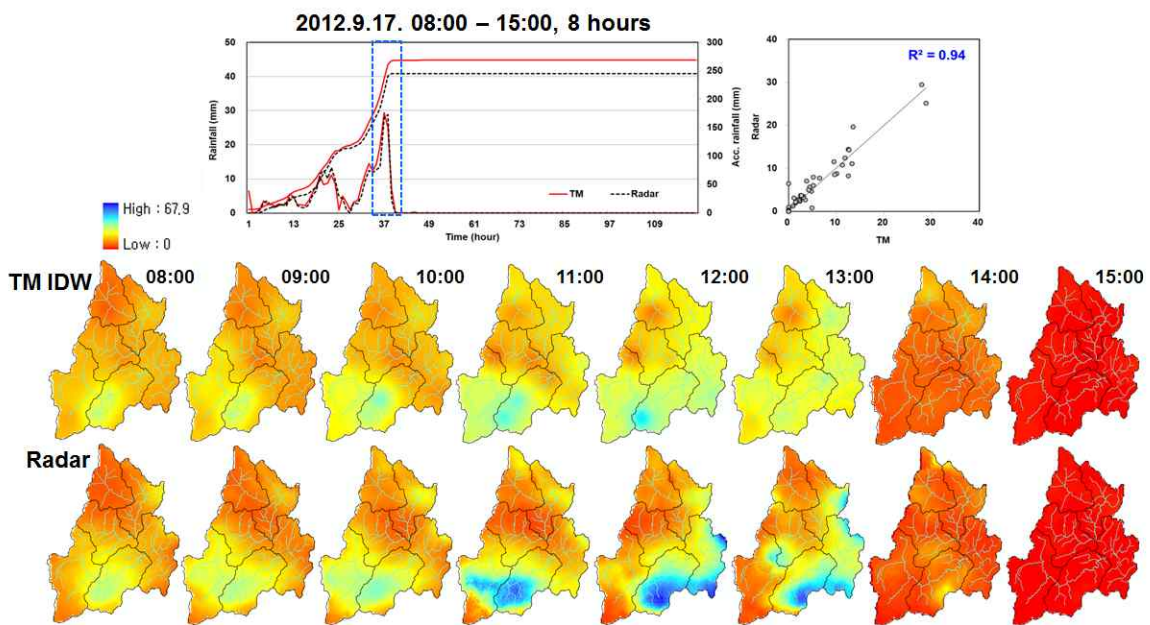


Fig. 6. Comparison of Spatial Distributions of Rainfall between TM IDW and Radar (SY district)

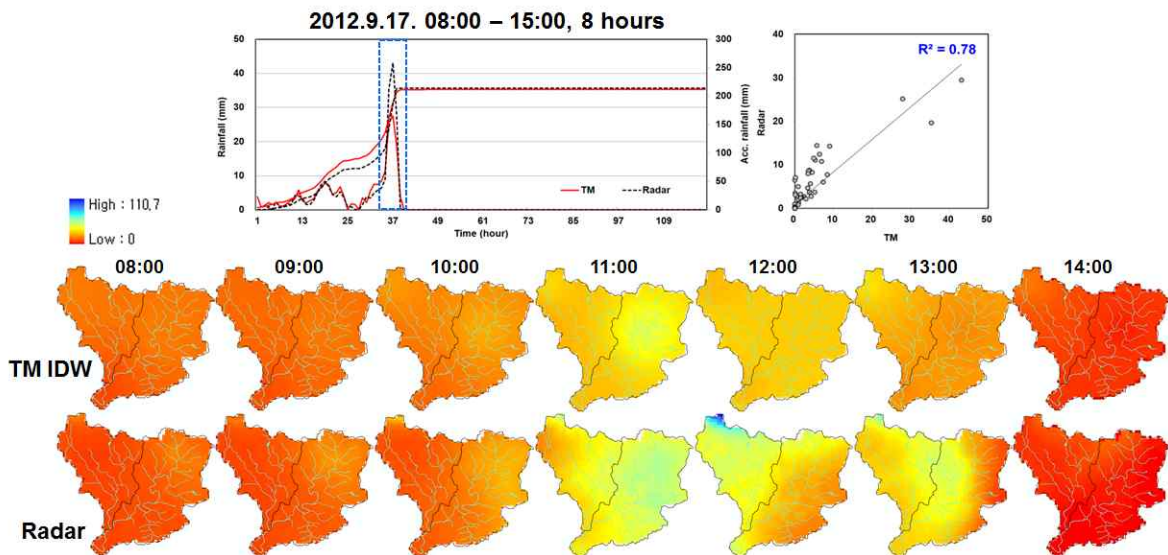


Fig. 7. Comparison of Spatial Distributions of Rainfall between TM IDW and Radar (MD/SG district)

의 공간강우분포도를 비교하여 나타내었다. 지점 강우와 레이더 강우의 누가강우량은 거의 흡사하게 모의되었고, 비가 가장 많이 온 시간인 12시의 경우 지점강우는 27.9mm, 레이더 강우는 43.1mm로 크게 분석되었다. 침투 강우량의 차이로 인해 R^2 는 0.78로 신연지구보다 낮았지만 양호한 결과를 보였다. 공간강우의 경우 전체적인 강우패턴을 잘 재현하고 있으며, 문대/신기지구(MD/SG)에서 발생한 비가 가장 많이 온 시간인 12시의 강우분포도를 보면 유역 전체적으로 공간적으로 많은 차이를 보였고, 레이더 강우가 훨씬 많은 강우가 발생한 것으로 분석되었다. 다음 장에서 문대/신기지구(MD/SG)의 이러한 강우의 차이를 유출해석 결과와 비교하여 설명하고자 한다.

3.3 분포형 모형을 이용한 침수지역 유출분석

분포형 모형을 이용한 유출해석의 장점은 유역 내 어느 지점이든지 유출해석이 가능하고, 홍수진행상황의 공간적인 파악이 가능하다는 것이다. 본 연구에서는 침수실적 자료를 활용하여 보정된 남강댐 유역의 유출해석 결과로부터 침수가 발생한 지역의 유출분석을 수행하였다. 침수가 발생한 2012년 9월 16~17일 동안 유량이 가장 많았던 9월 17일 10시~19시(10시간)에 대하여 분석하였다.

Fig. 8은 신연지구(SY)의 침수지점 전과 후의 수문곡선에 대하여 지점 강우와 레이더 강우에 의한 유출결과를 보여주며, 침투유량이 발생한 13시의 유출분포도를 비교하였다. 침수지점 전의 수문곡선은 지점 강우와 레이더 강우의 침투유량이 비슷하게 모의되었으며, 침수지점 후

의 수문곡선의 경우 레이더 강우를 적용한 유출결과가 침투유량이 비교적 크게 모의되었다. 침투유량이 발생한 13시의 유출 공간분포도 역시 침수가 발생한 지점 상류의 유역 및 하천유출량이 레이더를 적용한 경우에서 더 크게 분석되었다. Fig. 9도 마찬가지로 문대/신기지구(MD/SG)의 침수지점 전과 후의 수문곡선에 대하여 지점 강우와 레이더 강우에 의한 유출결과를 보여주며, 침투유량이 발생한 13시의 유출분포도를 비교하였다. 앞서 강우분석의 결과와 같이 문대/신기지구(MD/SG)는 레이더 강우가 지점 강우보다 공간적으로 넓게 많은 양의 비가 내린 것으로 분석되었는데, 침투유량 역시 레이더 강우가 침수지점 전과 후에서 모두 크게 모의되었다. 침투유량이 발생한 13시의 유출 공간분포도를 살펴보면, 전체적인 유역의 유출량과 하천유출량이 전반적으로 크게 모의되었다.

위의 결과를 토대로 실측유량과의 비교를 통해 침투유량 재현가능성을 자세히 살펴보고자 신안(SA)수위관측소가 침수지점 중간지점에 위치한 문대/신기지구(MD/SG)를 좀 더 자세히 살펴보았다. Fig. 10은 침수가 발생한 지역에 대하여 침수지점 전(Fig. 10(a)), 침수지점(Fig. 10(b)), 침수지점 후(Fig. 10(c))로 구분하고 수문곡선을 비교하였고, 수위차를 계산하여 제시하였다. 또한 11시부터 14시까지의 강우, 유출, 토양포화 분포도를 지점 강우와 레이더 강우의 경우를 비교하여 나타내었다. 침수지점 전(상류), 침수지점(신안 수위관측소), 침수지점 후(하류)의 경우 모두 레이더 강우를 적용한 경우가 침투유량이 크게 모의되었다. 침수지점 내 위치한 신안(SA)수위관측

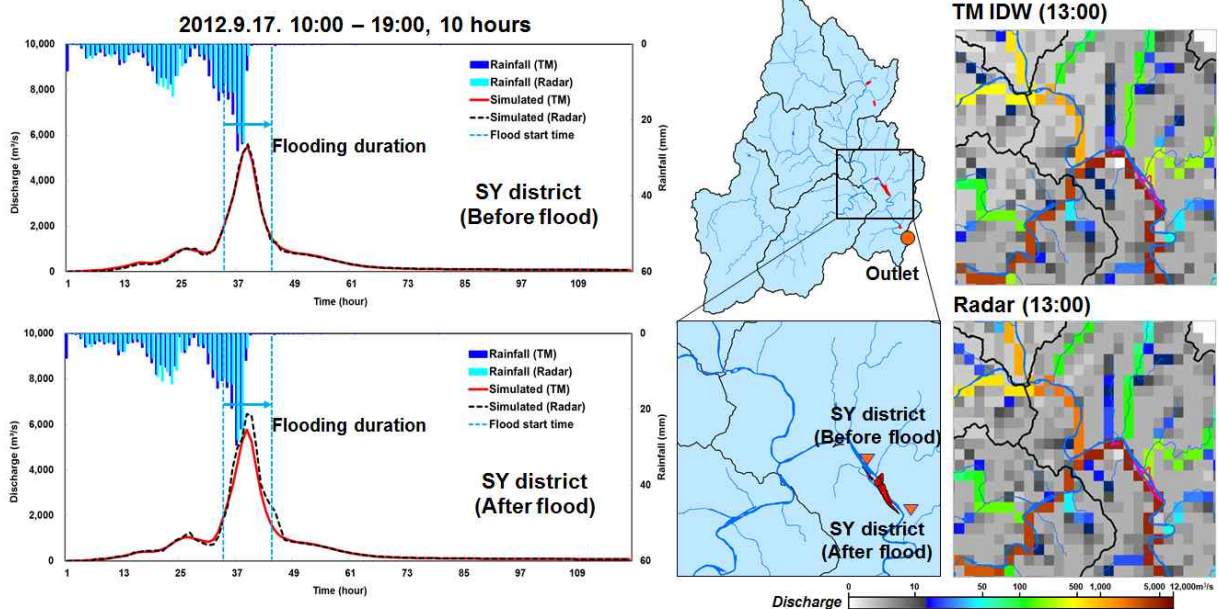


Fig. 8. Comparison of Rainfall and Discharge before with after Flood between TM IDW and Radar (SY district)

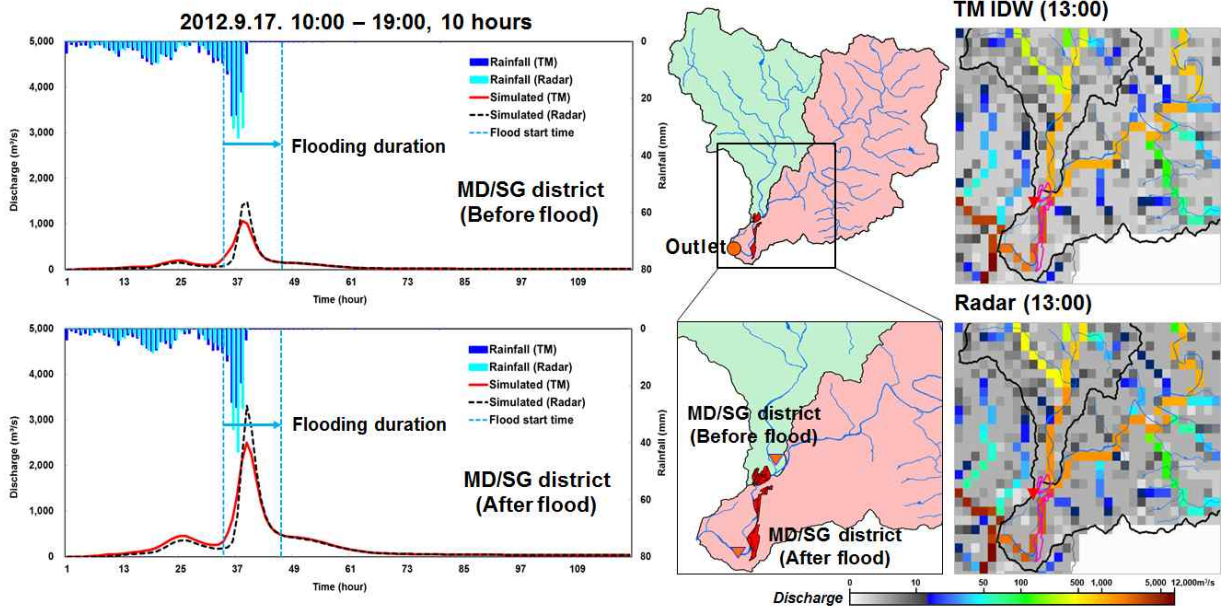


Fig. 9. Comparison of Rainfall and Discharge before with after Flood between TM IDW and Radar (MD/SG district)

소의 실측유량과 동일지점의 모의유량을 비교한 결과인 Fig. 10(b)와 같이 레이더 강우가 실측유량을 더 우수하게 재현하고 있음을 확인하였다. 또한 이들의 수위차는 침수 지점 전은 0.71m, 침수지점 및 침수지점 후는 0.72m로 레이더의 경우가 더 높았다. 11시부터 14시까지의 강우, 유출, 토양포화 분포도를 살펴보면 마찬가지로 레이더 강우를 적용한 경우가 공간적으로 넓고 많은 유량이 발생하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 남강댐 유역(2,293km²)을 대상으로 이 중편과 레이더 강우자료와 격자기반 분포형 강우-유출 모형인 KIMSTORM을 이용하여 홍수추적을 수행하고, 침수실적자료와 비교하여 레이더 강우자료의 효용성을 검토하였다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 남강댐 유역의 홍수량 산정을 위해 격자기반의 분포형 강우-유출모형인 KIMSTORM을 선정하였으며, 지형 자료로 DEM, 흐름방향도, 토지피복도, 유효토심도, 토양종류도를 구축하였다. 이후 5개의 유역(AU, SC, SA, CC, NR)으로 분할하여 격자크기 500×500 m 해상도의 156행×137열의 총 21,372개의 셀로 모형을 구축하였다.
- 2) 지점 강우와 비슬산 이중편과 레이더 자료를 이용하여 2012년 4개의 강우 이벤트(카눈, 집중호우, 불라

벤, 산바)에 대하여 동일한 매개변수를 적용하여 모형의 보정을 수행하였다. 상류부터 안의(AU), 산청(SC), 신안(SA), 창춘(CC), 유역 출구점인 남강댐방수로 지점(NR)의 유량자료를 비교하였으며, 그 결과 R², ME, VCI의 평균은 지점 강우의 경우 각각 0.85, 0.78, 1.09, 레이더 강우의 경우 0.85, 0.79, 1.96로 두 강우 모두 모의유량이 관측유량을 잘 재현하였다.

- 3) 태풍 산바에 의한 침수실적자료를 수집하여 분석한 결과 침수발생 기간은 2012년 9월 16~17일이며, 침수면적은 1.95 km²이다. 침수된 지역은 신연지구(SY)와 문대/신기지구(MD/SG) 두 지역이며, 침수된 지역의 토지이용을 살펴본 결과 하천부근으로 태풍에 의해 하천범람이 발생했음을 알 수 있었다.
- 3) 침수가 발생했던 9월 17일 8시~15시(8시간)의 지점 및 레이더 강우를 비교분석한 결과 신연지구(SY)의 경우 R²가 0.94로 강우패턴을 잘 재현하였으며, 비가 가장 많이 온 시간인 12시에 발생한 국지적인 강우를 레이더 강우가 비교적 잘 재현하였다. 문대/신기지구(MD/SG)의 경우 12시에 발생한 지점 강우는 27.9mm인 반면 레이더 강우는 43.1mm로 크게 분석 되었으며, R²는 0.78로 강우패턴을 잘 재현하였다. 특히 문대/신기지구(MD/SG)의 강우분포도는 레이더 강우가 공간적으로 넓게 훨씬 많은 강우가 발생한 것으로 분석되었다.
- 4) 침수가 발생했던 9월 17일 10시~19시(10시간)의 지점

및 레이더 강우를 적용한 유출을 비교분석한 결과 신연지구(SY)의 경우 침수지점 전의 수문곡선은 침두유량이 비슷하게 모의되었으며, 침수지점 후의 경우 레이더 강우를 적용한 유출결과가 침두유량이 비교적 크게 모의되었다. 문대/신기지구(MD/SG)의 경우 레이더 강우가 침수지점 전과 후에서 모두 크게 모의되었는데, 침수지점 내 위치한 신안(SA)수위관 측소의 실측유량과 동일지점의 모의유량을 비교한 결과 레이더 강우가 실측유량을 더 우수하게 재현하고 있음을 확인하였다. 또한 침수지점의 수위차는 지점 강우와 비교하여 레이더 강우의 경우가 0.72 m 더 높게 분석되어 그 차이를 확인하였다.

본 연구에서는 레이더 강우의 활용성을 확인하고자 수행된 연구로, 침수실적자료를 활용하여 레이더 강우의 공간적 분포, 공간적 규모의 효용성을 확인하였다. 분포형 강우-유출 모형에 레이더 공간 강우를 적용하여 유출해석을 한다면 유역내 이동하는 태풍에 의한 공간적 홍수유출 해석에 있어 보다 정확한 홍수진행상황의 파악이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

- Ahn, S.R., Jang, C.H., Kim, S.H., Han, M.S., Kim, J.H., and Kim, S.J. (2013). "Discussion for the Effectiveness of Radar Data Through Distributed Storm Runoff Modeling." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 55, No. 6, pp. 19-30.
- Choi, K.H., Han, K.Y., Kim, S.H., and Lee, C.H. (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*, Vol. 39, No. 4, pp. 347-362.
- Cole, S.J., and Moore, R.J. (2009). "Distributed hydrological modelling using weather radar in gauged and ungauged basins." *Advances in Water Resources*, Vol. 32, pp. 1107-1120.
- Cole, S.J., and Moore, R.J. (2013). "Hydrological modeling using raingauge- and radar-based estimators of areal rainfall." *Journal of Hydrology*, Vol. 358, pp. 159-181.
- Finnertya, D.B., Smith, M.B., Seo, D.J., Koren, V., and Moglen, G.E. (1997). "Space-time scale sensitivity of the Sacramento model to radar-gage precipitation inputs." *Journal of Hydrology*, Vol. 203, pp. 21-38.
- Getirana, A.C.V., Bonnet, M.P., Calmant, S., Roux, E., Filho, O.C.R., and Mansur, W.J. (2009). "Hydrological monitoring of poorly gauged basins based on rainfall-runoff modeling and spatial altimetry." *Journal of Hydrology*, Vol. 379, pp. 205-219.
- 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*, Vol. 12, No. 2, pp. 215-224.
- Jinkang, D., Shunping, X., Youpeng, X., Chong-yu, X., and Singh, V.P. (2007). "Development and testing of a simple physically-based distributed rainfall-runoff model for storm runoff simulation in humid forested basins." *Journal of Hydrology*, Vol. 336, pp. 334-346.
- Jung I.K., Park, J.Y., Park, M.J., Shin, H.J., Jung, H.K., and Kim, S.J. (2010). "Application of a grid-based rainfall-runoff model using SRTM DEM." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 13, No. 4, pp. 157-169.
- Jung, I.K., Lee, M.S., Park, J.Y., and Kim, S.J. (2008). "A Modified Grid-based KIneMatic Wave STOrM Runoff Model (ModKIMSTORM) (I) - Theory and Model-." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 6B, pp. 697-707.
- Kim, B.S., Bae, Y.H. Park, J.S., and Kim, K.T. (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*, Vol. 11, No. 3, pp. 52-67.
- Kim, S.J. (1998). "Grid-Based KIneMatic Wave STOrM Runoff Model (KIMSTORM) (I) - theory and model -." *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 31, No. 3, pp. 303-308.

Kim, W.I., Oh, K.D., Ahn, W.S., and Jun, B.H. (2008). "Study on flood prediction system based on radar rainfall data." *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 11, pp. 1153-1162.

Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.

Park, J.H., Kang, B.S., and Lee, G.S. (2008). "Application

analysis of GIS based distributed model using radar rainfall." *Journal of the Korean Society for Geospatial Information System*, Vol. 16, No. 1, pp. 23-32.

paper number : 15-047

Received : 18 June 2015

Revised : 9 September 2015 / 21 September 2015

Accepted : 21 September 2015