

이중편파 레이더의 홍수예보 활용성 평가 Assessment of Dual-Polarization Radar for Flood Forecasting

김 정 배* / 최 우 석** / 배 덕 호***

Kim, Jeong-Bae / Choi, Woo-Seok / Bae, Deg-Hyo

Abstract

The objective of this study is to assess the dual-polarization radar for flood forecasting. First, radar rainfall has temporal and spatial errors, so estimated radar rainfall was compared with ground observation rainfall to assess accuracy improvement, especially, considering the radar range of observation and increase of the rainfall intensity. The results of this study showed that the error for estimated dual-polarization radar rainfall was less than single-polarization radar rainfall. And in this study, dual-polarization radar rainfall for flood forecasting was assessed using MAP (Mean Areal Precipitation) and SURR (Sejong University Rainfall Runoff) model in Namkang dam watershed. The results of MAP are more accurate using dual-polarization radar. And the results of runoff using dual-polarization radar rainfall showed that peak flow error was reduced approximately 12~63%, runoff volumes error was reduced by approximately 30~42%, and also the root mean square error decreased compared to the result of runoff using single-polarization radar rainfall. The results revealed that dual-polarization radar will contribute to improving the accuracy of the flood forecasting.

Keywords : Dual-polarization, Single-polarization, Bisulsan radar, SURR model, flood forecasting

요 지

본 연구에서는 이중편파 레이더 추정강우의 홍수예보 활용성을 평가하였다. 비슬산 강우레이더 100km 반경 내 AWS (Automatic Weather System) 123개 관측소를 대상으로 레이더 추정강우의 오차를 레이더 반경 및 강우강도의 증가에 따라 평가하였다. 이중편파 레이더 추정강우가 단일편파 레이더 추정강우에 비해 오차가 작은 것으로 확인되었다. 또한, 이중편파 레이더 추정강우의 홍수예보 활용성 평가 및 적용을 위해 유역평균강우량을 산정하여 평가하였다. 평가 결과, 이중편파 레이더 추정강우가 단일편파 레이더 추정강우에 비해 관측치에 유사하게 나타났으며, 강우형태에 관계없이 강우 강도가 강한 부분에서 이중편파 레이더의 정확도가 향상됨을 보였다. 그러나 차등반사도를 통해 산정된 강우는 과대추정되는 경향이 나타났다. 연속형 지류합수모형인 SURR 모형에 적용하여 남강댐 유역에 대한 유출해석을 수행하였다. 이중편파 레이더 추정강우를 통한 유출량이 단일편파 레이더 추정강우에 비해 유출용적오차는 약 12~63%, 첨두유량오차는 약 30~42% 감소하였으며, 평균제곱근오차 또한 감소하는 것으로 나타났다. 또한 이중편파 레이더에 의해 산정된 유역평균강우량을 유출모형에 적용할 경우 AWS 강우로부터 추정된 유출결과보다 더 우수한 경우가 있어 향후 홍수예보 활용 시 예보의 정확도 향상에 기여하리라 판단된다.

핵심용어 : 이중편파, 단일편파, 비슬산 강우레이더, SURR모형, 홍수예보 활용

* 세종대학교 건설환경공학과 공학석사 (e-mail: morningdewjb@naver.com)

Master. Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ., Seoul 143-747, Korea

** 세종대학교 건설환경공학과 공학석사 (e-mail: cleaningsoul@gmail.com)

Master. Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ., Seoul 143-747, Korea

*** 교신저자, 세종대학교 물자원연구소, 건설환경공학과 교수 (e-mail: dhbae@sejong.ac.kr, Tel: 82-2-3408-3814)

Corresponding Author, Department of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ., Seoul 143-747, Korea

1. 서론

최근 이상기후의 영향으로 인해 홍수피해가 증가하고 있다. 국내에서는 효율적인 홍수피해 저감 대책으로 홍수 예보시스템을 개발 및 운영하고 있다. 통상, 실시간 홍수 예보시스템은 관측 및 예측 강우정보를 실시간으로 수집하고 이를 유출해석모형에 적용하여 생산되는 홍수정보로부터 발생할 침수피해를 사전에 예측하는 절차로 행해진다. 홍수예보시스템은 강우와 유출모형의 연계해석을 통해 홍수량을 생산하고 홍수위험 정보를 제공하기 때문에 예보자료의 정확도 확보를 위해서는 수문모델링 과정에서 존재하는 불확실성을 최소화해야 한다. 수문모델링에서의 불확실성 요소로는 모형의 구조, 모형 매개변수, 입력자료가 있으며(Beck, 1987), 그 중 강우정보는 홍수예보의 첫 시발점으로 정확도 확보에 있어 매우 중요한 요소이다(Sun et al., 2000). 대표적인 강우정보로는 지상관측강우가 적용되고 있으나, 최근에는 강우의 변동성 심화로 신속한 관측능력과 우수한 시·공간적 해상도를 장점으로 한 레이더 추정 강우의 홍수예보 활용이 증대되고 있다. 이에 따라 각 부처에서는 위험기상 감시 및 예보, 수문관리 및 홍수예보 등 목적에 따라 기상레이더를 운영중이며, 현재 국토교통부의 비슬산과 소백산 강우레이더를 제외하고는 모두 단일편파 기상레이더로서 취득되는 수평반사도 자료를 통해 강우강도를 추정하고 있다.

하지만, 단일편파에서 나오는 반사도 자료를 강우강도로 처리하는 과정에는 Z-R 관계식의 변동성 및 지형에코, 빙 차폐 등으로 인해 실제 강우량과 오차가 발생하며, 이로 인해 레이더로부터 추정된 강우량이 지상관측우량계에서 관측된 강우량보다 과소추정되는 경향이 있어 홍수예보의 활용에 어려움을 겪고 있다. 이러한 지상관측강우와의 오차를 줄이고자 Bae et al. (2005)은 편차보정 기법을 적용하여 레이더 강우를 개선하고 불확실성이 유출 모형에 미치는 영향을 평가하였으며, Yoon (2011)은 지형효과를 고려한 레이더 강우 최적 추정 기법을 제시하였다. 이와 같이 정확한 강우추정을 위해 여러 가지 편의보정 기법들이 제시되어 오고 있으나, 근본적인 정확도 향상을 위해서는 레이더 하드웨어의 개선이 요구됨에 따라 국내외에서는 이중편파 레이더를 도입 및 운영을 확대하고 있다.

이중편파 레이더는 단일편파 레이더와 달리 수직반사도, 차등반사도, 비차등위상차 등 다양한 변수들의 취득이 가능하여 강우입자의 형태를 더욱 정확하게 추정함으로써 강우를 보다 정확히 산정할 수 있어 그 활용성이 대두

되고 있다. 국외에서는 주로 이중편파 레이더의 수문연계 해석 연구(Jordan et al., 2003) 및 홍수예보를 위한 이중편파 레이더 추정강우의 성능평가 연구(Marios et al., 2010)가 활발히 수행되어 오고 있다. 국내의 경우에는 기상청의 연구용 X-band 이중편파 레이더와 국토교통부의 비슬산 및 소백산 기상 레이더가 운영되면서 이중편파 레이더에 대한 연구가 진행되고 있으며, Jeon et al. (2012)은 비슬산 이중편파 레이더 자료를 이용하여 이중편파 레이더의 관측오차가 기존의 단일편파 보다 약 13% 정도 감소되는 것을 제시함으로써 이중편파 레이더의 정확도 개선정도를 입증하였다.

이러한 연구결과를 바탕으로 이중편파 레이더를 정성적인 강우감시 정보로 홍수예보에 활용하고 있으며(Lee, 2013), 수문분야 적용에 대한 연구가 진행되고 있다. Ann et al. (2013)은 비슬산 레이더 강우를 분포형 모형인 KIMSTORM에 적용하여 홍수 모의를 수행하였고, Jung et al. (2014)은 이중편파 레이더의 유출해석을 위하여 비슬산 이중편파 레이더 강우를 분포형 유출모형에 적용하여 유출모의 시 활용성을 분석한 바 있다. 이중편파 레이더 연구는 강우량 추정 및 수문분야의 적용에 관한 내용이 대부분으로, 아직까지 홍수예보 활용을 위한 이중편파 레이더 추정 강우에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 특정 호우사상에 대하여 이중편파 레이더의 홍수예보 활용성을 평가하고자 한다. 한강홍수통제소에서 운용되고 있는 비슬산 이중편파 강우 레이더의 다양한 관측변수들 중 차등반사도와 비차등위상차를 이용한 강우 추정(이하 이중편파 레이더 추정강우라 한다) 및 수평반사도 정보만을 이용한 강우 추정(이하 단일편파 레이더 추정강우라 한다)을 수행하였으며, 지상관측자료와의 비교를 통한 시공간적인 오차 및 이중편파 레이더 추정강우의 정확도 향상정도를 제시하고자 한다. 또한, 추정된 레이더 강우로부터 유역평균강우량을 산정하고 이를 유출해석에 적용하여 이중편파 레이더 추정강우의 홍수예보 활용가능성에 대해 분석 및 제시하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 개요

이중편파 레이더의 강우 추정과 이의 홍수예보 활용성 평가절차는 Fig. 1과 같다. 먼저 적용대상 레이더 지점의 호우 사상별 레이더 반사도 자료에 단일편파와 이중편파 레이더의 강우 추정 알고리즘을 적용하여 강우를 추정한다. 이중편파 레이더 강우의 홍수예보 활용을 위해서는

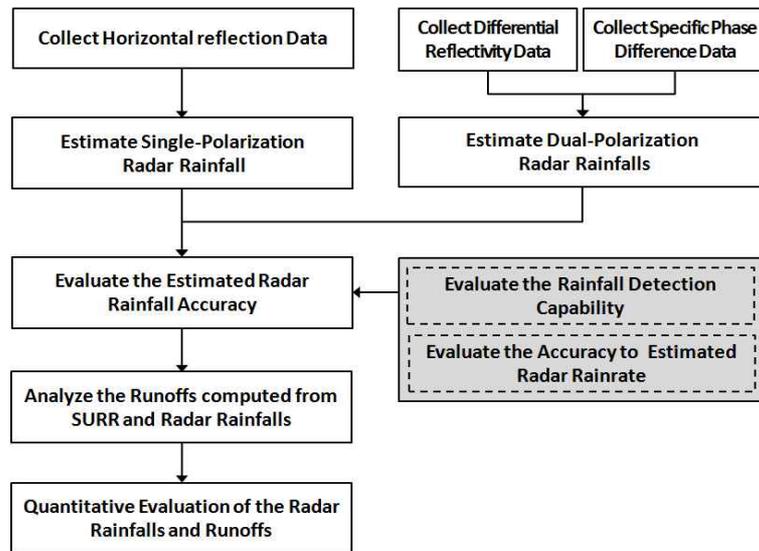


Fig. 1. Schematic of Dual-Polarization Radar Rainfall Estimates and Their Flood Forecasting Process

추정강우의 정확도 확보 및 평가가 선행되어야 한다. 레이더에 수신된 전파에 의해 추정되는 레이더 강우는 강우탐지 능력에 있어서 빔 차폐, 전파 이상 등의 영향으로 오차를 유발할 수 있으므로 지상관측 강우자료와의 비교를 통해 강우탐지 능력을 평가한다. 통상, 레이더 강우는 지상관측강우에 비해 과소추정되는 경향이 있어 정성적인 정확도 평가뿐만 아니라 정량적인 평가가 요구된다. 레이더와 지상강우관측소는 강우관측방법이 상이하므로 지상강우와의 선형상관성 및 오차를 평가한다. 또한, 홍수를 유발하는 태풍, 집중호우 등 강한 강우강도에서 레이더 추정 강우를 평가하기 위해 강우강도의 증가에 따른 정확도를 분석한다.

추정된 레이더 강우는 수문모형과의 연계해석을 통해 홍수예보에 활용되며, 이때 강우 입력자료로 활용되는 유역평균강우량은 홍수예보의 정확도 확보에 있어서 중요하다. 이를 위해 산정된 레이더의 유역평균강우량에 대한 정확도를 평가하고, SURR (Sejong University Rainfall Runoff) 모형에 적용하여 유출결과를 비교분석한다.

2.2 레이더 자료를 이용한 강우 산정

레이더 추정강우의 정확도 평가 및 홍수예보 활용성을 평가하기 위해 레이더 반사도와 강우강도간의 관계식을 사용하여 레이더 강우추정을 수행하였다. 단일편파 레이더의 경우 주로 사용되는 Z-R 관계식($Z = aR^b$)을 사용하였으며, 이 때 계수는 $a=300$, $b=1.4$ 로 여름철 호우특성에 맞게 대류성 강우에 적합한 경험적인 계수를 활용하였다. 본 연구에서는 단일편파 레이더 강우를 $R(Z)$ 로 표현하였으며, 다음 Eq. (1)과 같다.

$$R(Z) = 1.70 \times 10^{-2} Z^{0.714} \quad (1)$$

여기서, Z 는 단일편파 레이더로 관측한 수평반사도(dBZ)와 동일하며, 강우강도 $R(Z)$ 의 단위는 mm/hr이다.

이중편파 레이더 강우추정에서는 일반적으로 레이더 수평반사도(Z), 차등반사도(Z_{DR}), 비차등위상차(K_{DP})를 사용한다. 본 연구에서는 Bringi and Chandrasekar (2001)가 제안한 수평반사도와 차등반사도를 이용하여 관측강우와의 관계를 찾아 제시한 Eq. (2)를 적용하였다.

$$R(Z, Z_{DR}) = 6.70 \times 10^{-3} Z^{0.714} \times Z_{DR}^{-3.43} \quad (2)$$

또한, Ryzhkov et al. (2005)은 강우강도에 따라 강우입자의 크기분포가 달라지는 점을 고려하여 강우강도 변환 오차를 보정하기 위해 $R(Z)$ 로 계산된 강우강도를 크기에 따라 구분하여 차등반사도, 비차등위상차와 함께 다음 Eqs. (7a), (7b) and (7c)와 같이 사용하였다.

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

$$\overline{Z}_{dr} = 10^{0.1 \overline{Z}_{DR}(\text{dB})} \quad (4)$$

$$f_1(\overline{Z}_{DR}) = 0.4 + 5.0 |\overline{Z}_{dr} - 1|^{1.3} \quad (5)$$

$$f_2(\overline{Z}_{DR}) = 0.4 + 3.5 |\overline{Z}_{dr} - 1|^{1.7} \quad (6)$$

$$R = \overline{R(Z)} / f_1(\overline{Z}_{DR}) \quad \text{if } \overline{R(Z)} < 6 \text{ mm/hr} \quad (7a)$$

$$= \overline{R(K_{DP})} / f_2(\overline{Z}_{DR}) \quad \text{if } 6 < \overline{R(Z)} < 50 \text{ mm/hr} \quad (7b)$$

$$= \overline{R(K_{DP})} \quad \text{if } \overline{R(Z)} > 50 \text{ mm/hr} \quad (7c)$$

여기서, Eqs. (4), (5) and (6)은 입자의 모양에 따른 보정

인자이다.

2.3 SURR (Sejong University Rainfall Runoff) 모형

SURR 모형은 저류량에 대한 물수지 방정식으로 이루어진 연속방정식과 저류함수로 이루어진 운동방정식을 이용하여 강우량으로부터 유출량을 산정하는 저류함수모형에 유출수문성분 모의 모듈을 연계한 모형이다. 이 유출모형은 유역 및 하도유출량 산정모형으로 구성되며, 토양수분 및 수문성분을 이용하여 기존의 사상형 저류함수모형을 연속형 저류함수모형으로 개선한 것이다. 유역유출의 운동방정식은 기존의 저류함수모형과 동일하나, 평균유입량과 지체시간을 고려한 유역평균강우량의 곱으로 표현한 유효유량대신 유출수문성분으로 대체하여 Eqs. (8) and (9)와 같이 연속방정식과 운동량 방정식을 개선함으로써 연속형 저류함수모형으로 개발된 것이다.

$$\frac{dS_s(t)}{dt} = [Q_{sur}(t-\tau) + Q_{int}(t-\tau) + Q_{gw}(t-\tau)] - Q_s(t) \quad (8)$$

$$Q_s(t) = \left(\frac{S_s(t)}{K_{sb}} \right)^{1/P_{sb}} \quad (9)$$

여기서, $S_s(t)$ 는 유역 저류량(mm), $Q_{sur}(t-\tau)$, $Q_{int}(t-\tau)$

및 $Q_{gw}(t-\tau)$ 는 각각 지표, 중간 및 지하수 유출량, $Q_s(t)$ 는 유역 유출량(mm/h), K_{sb} 와 P_{sb} 는 유역에 대한 저류상수, τ 는 유역 지체시간(h)을 의미한다.

SURR 모형의 적용성은 낙동강 유역을 대상으로 이미 검증된바 있으며, 지표유출, 중간유출 및 지하수 유출에 대한 보다 상세한 설명은 Bae and Lee (2011)를 참고하기 바란다. 유역과 하도 유출량 산정에 필요한 모형 입력변수는 8개, 매개변수는 11개이며 각 변수에 대한 설명을 Table 1에 제시하였다.

2.4 정확도 평가방법

레이더 추정강우의 정확도 평가를 위해 정성적인 평가 방법으로 강우의 유무 판단능력에 대해 제시하는 Hit rate를 사용하였으며, 다음 Table 2에 따라 Eq. (10)을 적용하였다.

$$Hit\ rate = \frac{Z+H}{Z+F+M+H} \quad (10)$$

정량적인 평가방법으로 상관계수(Correlation Coefficient, 이하 CC) 및 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, 이하 RMSE)를 적용하였다. CC는 추정치(R_i)와 관측치(Q_i)의 차이의 선형상관성을 측정하는 계수이며,

Table 1. Description of Model Variables (Bae and Lee, 2011)

Variable name		Definition	Unit	Estimation method
Input data	AKM	Subbasin area	km ²	GIS data
	SLP	Mean slope of the subbasin	m/m	"
	Z	Depth of soil layer	m	"
	SAT	Rate of water content at saturation	mm/mm	"
	FC	Rate of water content at field capacity	mm/mm	"
	WP	Rate of water content at wilting point	mm/mm	"
	KS	Saturated hydraulic conductivity	mm/h	"
	CN2	Runoff curve number under AMC II	-	"
Parameter	SURLAG	Surface runoff lag coefficient	-	Calibration
	LHIL	Mean slope length	m	"
	LATLAG	Lateral flow lag coefficient	-	"
	GWDELAY	Delay time for aquifer recharge	h	"
	ALPHA_BF	Baseflow recession constant	-	"
	AQMIN	Threshold water level in shallow aquifer for baseflow	mm	"
	K _{sb}	Storage function constant of the subbasin	h ^{P_{sb}}	"
	P _{sb}	Storage function constant of the subbasin	-	"
	LAGSB	Lag time of the subbasin	h	"
	K _{ch}	Storage function constant of the channel	s ^{P_{ch}}	"
P _{ch}	Storage function constant of the channel	-	"	

Table 2. Contungency Table for Qualitative Rainfall Estimate

Verifying analysis		Radar rainfall	
		No rain (=0)	Rain (>0)
Observed rainfall	No rain (=0)	Z (Zero)	F (False)
	Rain (>0)	M (Miss)	H (Hit)

RMSE는 추정치와 관측치의 차이를 제공근하여 평균을 취한 것으로 잔차, 불확실성 등에 따라 좌우되는 강우추정 정확도의 척도이다.

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R}_i)(O_i - \bar{O}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)^2}} \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - O_i)^2} \quad (12)$$

한편, 유량모의결과의 정량적 정확도 평가를 위해서는 CC, RMSE 이외에 유출용적오차(Relative Error in Volume, 이하 REV), 첨두유량오차(Relative Error in Peak Flow, 이하 REPE)를 활용하였다. REV는 총 관측유량에 대한 모의유량의 오차를 백분율로 나타낸 값이며, REPE는 첨두유량오차는 모의기간동안 첨두유량에 대한 관측치와 모의치의 오차를 관측치에 대한 백분율로 나타낸 것이다.

$$REV = \frac{\sum (R_i - O_i)}{\sum O_i} \times 100 \quad (13)$$

$$REPF = \frac{R_{peak} - Q_{peak}}{Q_{peak}} \times 100 \quad (14)$$

여기서, R_{peak} 는 레이더 강우를 통해 모의된 첨두유량이며, Q_{peak} 는 관측유량의 첨두치이다.

3. 대상유역 선정 및 자료 구축

3.1 대상유역

본 연구에서는 비슬산 레이더 사이트에서 반경 100 km 지역을 대상으로 추정된 레이더 강우의 특성을 평가하고자 하며, 홍수해석을 위해 대상유역으로 남강댐 상류유역을 선정하였다. 남강댐 상류유역은 지리산(E.L. 1,915 m)과 덕유산(E.L. 1,507 m) 등 대부분 고도가 높은 산지로 구성되어 있으며, 집중호우 및 태풍에 의한 피해가 잦은 지역이다. 특히, 남강댐 최상류 부근에는 돌발홍수 피해가 빈번한 지리산 일대가 포함되어 있어 홍수예보 활용성 평

가에 적합한 지역으로 판단된다. SURR 모형 적용을 위해 남강댐 소유역을 6개로 구분하였으며, 구분 현황 및 하도망 구성은 Fig. 2와 같다. 총 유역면적은 2,294.69 km²이며, 평균 소유역 면적은 382.45 km²이다.

3.2 수문기상자료 구축

지상강우 관측자료는 기상청에서 운영 중인 547개소 AWS 관측소 중에서 본 연구 대상유역인 비슬산 레이더 반경 내 존재하는 123개소를 Fig. 2와 같이 추출하였으며, 60분 간격의 강우강도를 산출하여 활용하였다. 레이더 반사도 자료의 경우 비슬산 레이더가 설치된 이후 자료 품질이 안정적으로 제공되기 시작한 2012년 이후의 자료를 활용하였으며, 이들 자료는 국토교통부의 레이더 품질관리 절차에 따라 처리된 UF 형태의 이진(binary) 자료이다. 수집된 AWS 및 레이더 추정강우로부터 홍수예보의 활용성 평가를 위한 적정 이벤트를 선정하였으며, 주요 현황은 Table 3과 같다. Case 1~Case 3은 장마, Case 4 및 Case 5는 태풍사레이며, AWS에 측정된 시간당 최대 강우량은 33.0~85.5 mm/hr로 확인되었다.

SURR 모형에서는 Penman-Monteith 방법을 이용하여 잠재증발산량을 산정하는데 이를 위해서는 기온, 상대습도, 풍속, 일사량의 기상자료가 요구된다. 현재 우리나라에서는 기상청에서 이들 자료를 제공하고 있으며, 남강댐 유역에서는 6개의 기상관측소가 가용하였다. 기상자료를 분석한 결과 일사량 자료에서 결측치가 상당수 존재하여 연속적인 자료를 구축 및 적용에는 어려움이 있는 것으로 판단되었다. 이에 본 연구에서는 일조시간과 관측소 위도 정보만으로 일사량을 추정할 수 있는 Angstrom formular 방법(Allen et al., 1989)을 활용하였다. 또한, 모형 매개변수 추정을 위해 2006~2010년 남강댐 관측 유입량 자료를 구축하였다.

3.3 모형 입력변수 구축 및 매개변수 검보정

남강댐 유역에 대한 유출해석을 수행하기 위해 SURR 모형의 입력변수로 활용될 지형자료를 구축하였다. DEM과 토지피복도는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)으로부터 구축하였으며, 정밀토양도와 속성정보는 농업과학기술원으로부터 구축하였다. 본 연구에서는 GIS를 활용하

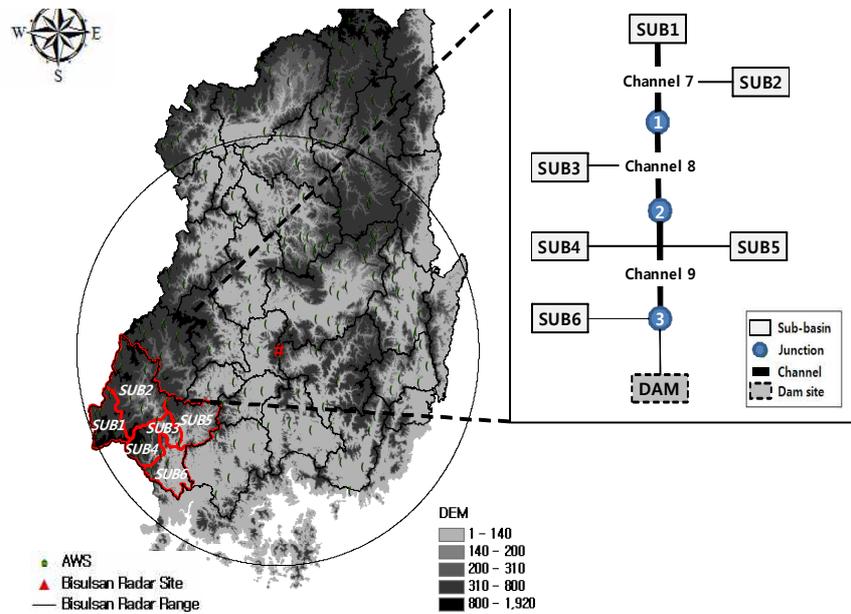


Fig. 2. Available Data Sites and Channel Networks on the Study Area

Table 3. Rainfall Events Selected in this Study

Event Number	Period	Maximum rainfall (mm/hr)	Rain type
Case 1	2012/06/30 01:00 ~ 2012/06/30 23:00	42.5	Monsoon
Case 2	2012/07/05 01:00 ~ 2012/07/06 23:00	33.0	Monsoon
Case 3	2012/07/14 09:00 ~ 2012/07/16 23:00	85.5	Monsoon
Case 4	2012/08/27 14:00 ~ 2012/08/30 13:00	46.0	Typhoon "BOLAVEN"
Case 5	2012/09/16 01:00 ~ 2012/09/17 22:00	64.5	Typhoon "SANBA"

여 구축된 지형자료로부터 각 소유역 별 평균값을 산정하였으며, 그 결과는 Table 4와 같다. 소유역 면적(AKMD) 및 유역평균경사(SLP)는 DEM을 이용하였고, 토양근권역 깊이(Z), 포화된 상태에서의 토양수분 비(SAT), 포장용수량 상태에서의 토양수분 비(FC), 영구위조점 상태에서의 토양수분 비(WP), 포화수리전도도(KS)는 정밀토양도와 속성정보를 이용하여 산정하였다. 또한 AMC II 조건에서의 유출곡선지수(CN2)는 토지피복도와 정밀토양도의 수문학적인 토양군 정보를 이용하여 산정하였고, 이때 각 토지피복조건과 수문학적인 토양군 조건에 따른 유출곡선지수(CN)값은 Bae et al. (2003)과 Lee et al. (2003)이 제안한 결과를 이용하였다.

모형의 매개변수인 지표유출 지체계수(SURLAG), 측방흐름 경사길이(LHIL), 중간유출 지체계수(LATLAG), 지하수함양지체시간(GWLDELAY), 기저유출 감수상수(ALPHA_BF), 지하수유출 발생 가능한 임계수위(AQMIN),

유역저류상수(K_{sb}), 유역저류상수(P_{sb}), 유역도달시간(LAGSB), 하도 저류상수(K_{ch}), 하도 저류상수(P_{ch})는 관측유량과의 매개변수 검토정 과정을 통해 추정하였다. 유역 유출매개변수 산정결과는 Table 4와 같고, 하도추적 매개변수 K_{ch} 및 P_{ch} 는 각각 4000, 1.0으로 추정되었다.

통상 수문모형을 이용하여 유출해석을 수행할 경우 실측 호우사상에 근거하여 해당 모형에 대한 매개변수 검토 후 유출해석을 수행하게 된다. 본 연구에서 SURR 모형에 대한 매개변수 보정기간은 2006년 7월 1일부터 8월 18일, 검증기간은 2007년 8월 1일부터 9월 30일 및 2010년 7월 7일부터 9월 30일로 선정하였다. 다만, 2008년과 2009년의 자료는 댐 관측 유입량의 시 변동성이 크고 정상적인 수문곡선 형태를 갖지 못하여 평가에서 제외하였다. Fig. 3은 남강댐 관측지점을 대상으로 보정 및 검증기간의 관측 유량과 모의유량을 도시한 것이다. 보정 및 검증기간이 모두 한 달 이상 장기간의 모의결과임에도 불구하고 모의유

Table 4. Estimated Model Input data & Parameters at Each Sub-basin

-	Variable name	Sub-basin No.					
		1	2	3	4	5	6
Input data	AKM(km ²)	651.7	824.5	122.1	256.4	425.5	344.5
	SLP(m/m)	0.292	0.261	0.267	0.361	0.216	0.191
	Z(mm)	765.5	875.3	826.1	640.6	669.8	771.9
	SAT(mm/mm)	0.377	0.381	0.399	0.376	0.407	0.401
	FC(mm/mm)	0.26	0.221	0.239	0.259	0.25	0.244
	WP(mm/mm)	0.091	0.079	0.09	0.088	0.111	0.109
	KS(mm/h)	58.5	43.4	61.2	81.7	38.4	72.5
	CN2	56.8	58.1	62.3	64	69.6	73.8
Parameter	SURLAG	2.0	2.0	4.0	4.0	4.0	2.0
	LHIL	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	LATLAG	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	GWDELAY	100	100	100	100	100	100
	ALPHA_BF	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	AQMIN	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	Ksb	50	50	60	50	50	50
	Psb	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	LAGSB	2	2	1	1	1	2

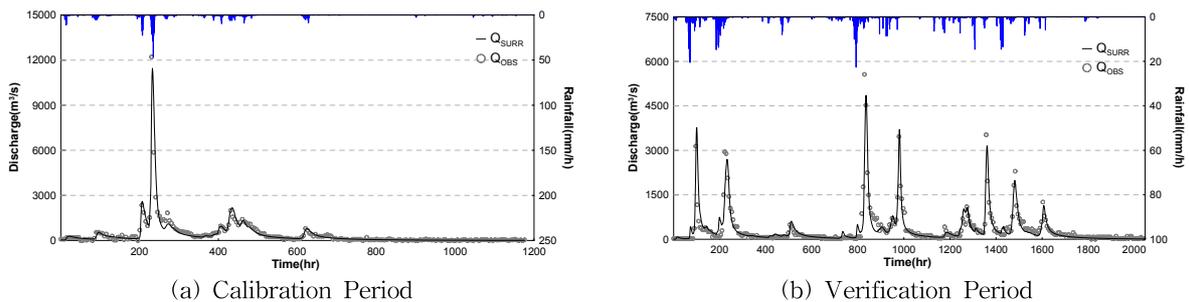


Fig. 3. Model Calibration and Verification for SURR Parameters

량이 관측유량과 유사한 거동을 보이는 것으로 나타났다.

4. 레이더 추정강우 결과 및 분석

레이더 관측반경과 강우강도 증가에 따른 이중 및 단일 편파 레이더 추정강우의 정확도 평가를 수행하였다. 정확도 비교를 위해 레이더 관측반경인 100 km 이내의 지상관측지점을 활용하였으며, Hit rate 기법을 이용하여 거리에 따른 단일 및 이중편파 레이더의 강우탐지 능력을 비교·평가하였다. Fig. 4는 지상관측강우를 참값이라는 가정 하에 거리에 따른 단일 및 이중편파 레이더 강우의 Hit rate를

나타낸 것이다. 100 km 이내에서 단일 및 이중편파 레이더의 Hit rate의 차이는 미비하였으며, 평균 Hit rate는 0.84, 표준편차는 0.03으로 나타났다. 거리에 따라서는 관측반경 10 km 이내에서 0.88, 90~100 km에서 0.84로 산정되어 거리가 증가함에 따라 강우탐지 능력이 감소하는 것으로 나타났다.

CC와 RMSE를 이용하여 단일 및 이중편파 레이더 추정강우와 지상관측강우의 정확도를 정량적으로 평가하였으며, 비교대상은 레이더 반경 내 123개 AWS 관측소이다. Table 5는 사상별로 레이더 강우와 지상강우의 CC와 RMSE를 명시한 것이며, 이 중 굵게 표현된 수치는 CC가

가장 높거나 RMSE가 가장 작은 경우를 뜻한다. 모든 호우사상에서 이중편파 레이다 추정강우는 단일에 비해, CC는 크고 RMSE는 작게 나타났다. 또한, 비차등위상차(R_{KDP})는 차등반사도(R_{ZDR})에 비해 Case 5를 제외한 모든 사상에서 정확도 높음을 알 수 있었다.

한편, 강우강도 증가에 따른 단일 및 이중편파의 오차를 평가하였다. 선정된 호우사상에 대해 AWS 관측소별 평균 강우강도를 계산하고, AWS 지점에 해당하는 레이다 격자점에서의 평균 강우강도를 산정하였다. 강우강도 증가에 따른 오차를 평가하기 위해 RMSE 증가율(기울기)을 활용하였으며, 이를 Fig. 5에 도시하였다. 차등반사도 추정강우의 RMSE 증가율은 0.83, 비차등위상차 추정강우의 RMSE 증가율은 0.92로 나타났다. 그에 반해 단일편파 레이다 추정강우의 평균증가율은 1.17로 확인되어 강우강도 증가에 따른 오차의 변화는 이중편파 레이다가 더 작은 것으로 판단된다.

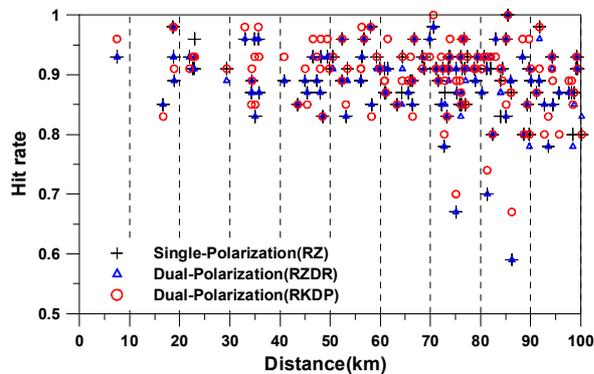


Fig. 4. Hit rates of Radar Rainfalls depending on Reflectivity Type and Observation Distance for the Selected Event (Case 5)

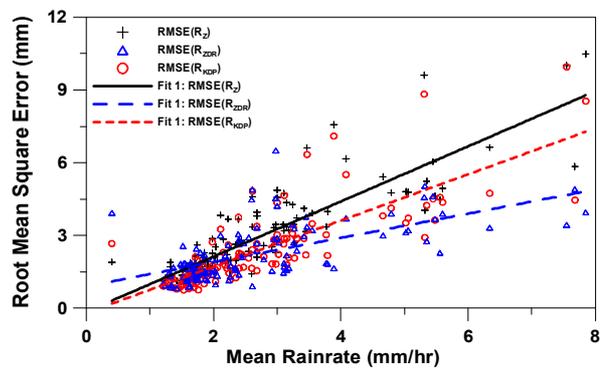


Fig. 5. Increase Rate of RMSE according to Rainrate (Case 3)

5. 이중편파 레이다 추정강우의 홍수에보 활용성 평가

5.1 유역평균강우량 산정 평가

5개 호우사상을 이용하여 남강댐 유역에 대한 유역평균 강우량을 산정 및 평가하였다. 다만, Case 1, Case 2 및 Case 5의 경우 남강댐 관측 유입량 자료품질이 낮아 평가에서 제외하였다. Fig. 6은 Case 3, 4를 대상으로 남강댐 유역 내 각 소유역별 AWS 및 레이다 추정강우로부터 유역평균강우량(MAP)을 산정한 후, 이를 산포도로 도시한 결과이다. 단일편파 레이다는 이중편파에 비해 과소추정되었으며, 차등반사도를 통해 선정된 강우는 일부 과대추정되는 경향을 보였다. 반면, 약 5 mm/hr보다 낮은 강우강도일 경우 단일 및 이중편파 레이다 유역평균강우량의 차이가 미비하였다. 또한, Case 3의 경우 비차등위상차의 유역평균강우량, Case 4에서는 차등반사도의 유역평균강우량이 AWS에 가장 근접하였으며, 소유역 1, 2의 경우

Table 5. Statistical Analysis of Estimated Radar Rainfalls with AWS Rainfall

Events		Single-Pol. (R_Z)	Dual-Pol. (R_{ZDR})	Dual-Pol. (R_{KDP})
Case 1	CC	0.83	0.85	0.85
	RMSE	1.72	1.57	1.45
Case 2	CC	0.76	0.74	0.81
	RMSE	1.86	2.09	1.67
Case 3	CC	0.84	0.72	0.86
	RMSE	2.48	2.92	2.10
Case 4	CC	0.75	0.77	0.78
	RMSE	2.09	1.93	1.82
Case 5	CC	0.74	0.76	0.78
	RMSE	4.94	4.26	4.34

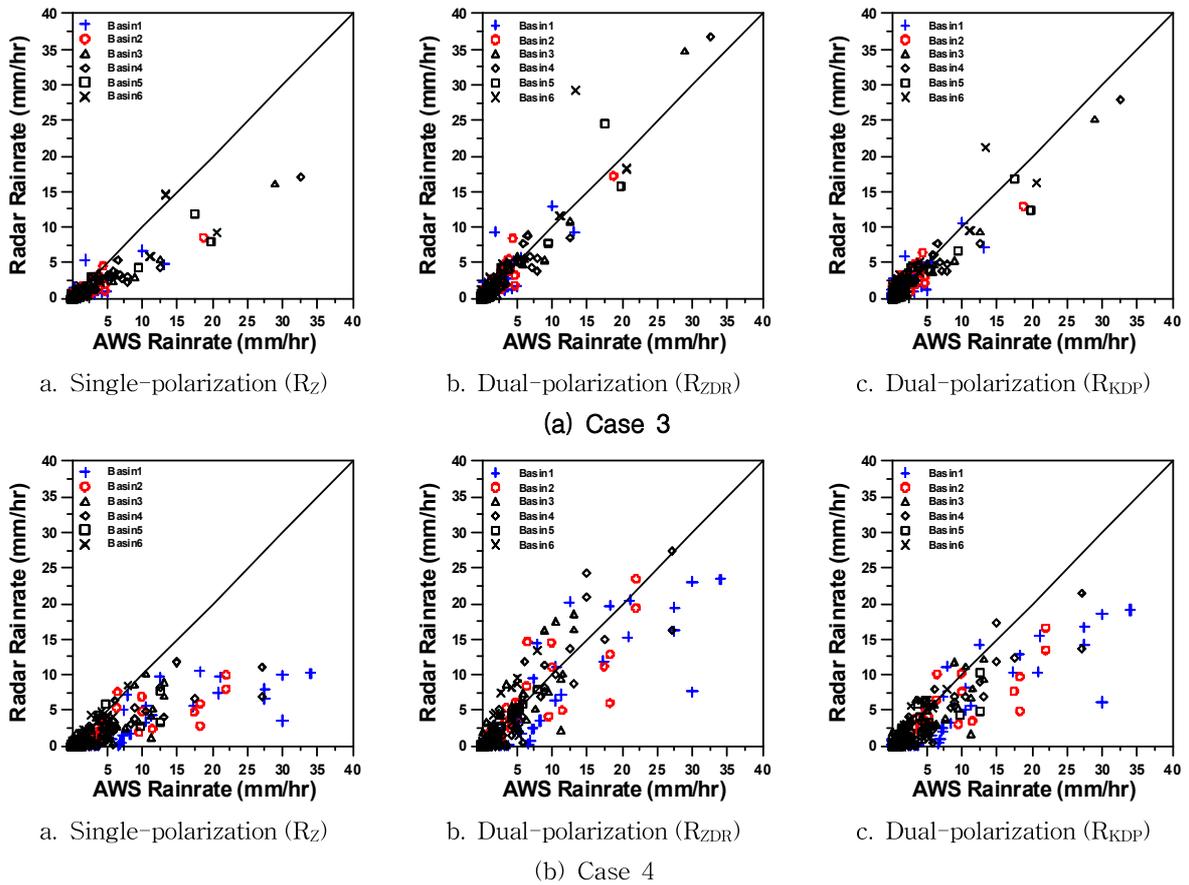


Fig. 6. Computed MAPs in Namkang Dam Basin for the Selected Events

다른 유역에 비해 레이더 추정강우가 AWS에 비해 과소 추정되는 것으로 나타났다.

5.2 SURR 모델을 통한 유출해석 결과

강우-유출모형은 강우량을 입력자료로 하여 특정지점의 하천유출량의 시간적 변화를 계산하는 도구이다. 여기서 강우량 입력자료는 모형의 목적에 따라 과거 관측자료, 강우예보자료 등이 사용될 수 있으며, 특히 레이더 추정 강우도 홍수예보 목적에 직접 활용될 수 있다. 본 연구에서는 이중편파 레이더 추정강우의 홍수예보 활용성을 검토하고자 평가 호우사상에 대하여 대상유역인 남강댐 유역의 매 시간별 유출량을 산정하였다. 전체 모의기간 동안(2012년 6~8월)에 추정된 매개변수와 AWS 강우를 입력하여 유출량을 모의한 후, 이벤트 기간에서는 레이더 강우로 교체하여 유출량을 재산정하였다. 유출모의결과 통계적 평가를 위해 REV, REPE, RMSE, CC를 산정하였다.

Fig. 7은 선정된 호우사상별 유출량 산정결과를 나타낸 것으로 남강댐의 관측유출량, AWS 지상관측강우를 이용한

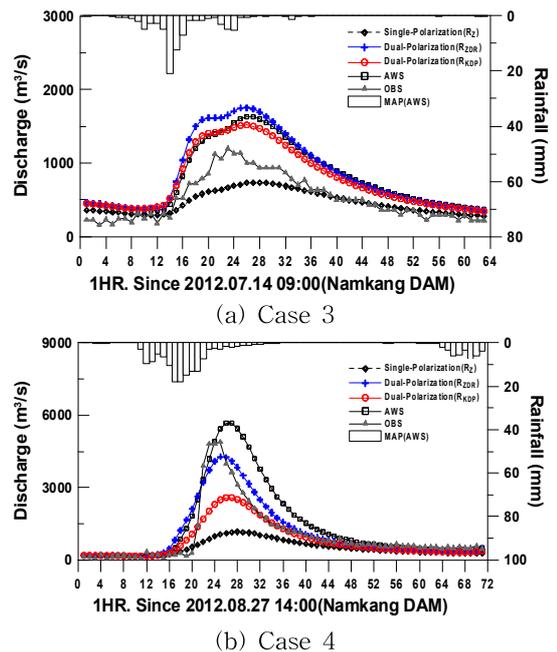


Fig. 7. Result of Simulated Flow Using SURR Model

유출량, 레이더 추정강우를 이용한 유출량 산정 결과이다. 또한, 비교평가를 위해 티센법을 활용하여 산정한 남강댐 유역의 AWS 유역평균강우량을 함께 표현하였다. Case 3의 경우 단일편파 레이더 강우를 통한 유출량은 관측에 비해 과소추정되었고, 이중편파의 경우 과대추정됨을 알 수 있다. 그러나 이중편파 레이더 추정강우를 활용한 유출량 산정은 AWS 지상강우량에 의한 유출량 산정결과와 유사함을 알 수 있다. 통계적 평가 결과, REV는 AWS 38.55, 단일편파 -10.79, 차등반사도 64.69, 비차등위상차 50.30%, REPF는 16.16, -38.64, 46.92, 27.05%, RMSE는 5.11, 16.69, 30.04, 28.01 mm/hr이며, CC는 0.92, 0.94, 0.97, 0.98로 각각 나타났다. Case 4에서는 단일편파 보다 이중편파 레이더 추정강우에서의 유출량이 관측유량과 유사하였으며, 특히, 차등반사도를 활용한 유출모의 시 AWS 보다 관측유량의 거동과 더 유사하였다. REV는 AWS 38.55, 단일편파 -51.98, 차등반사도 9.96, 비차등위상차 -22.06%로 나타났으며, REPF는 16.16, -76.35, -12.90, -47.23%, RMSE는 5.11, 5.19, 5.13, 5.12 mm/hr, CC는 0.92, 0.83, 0.93, 0.90으로 차등반사도의 정확도가 높은 것으로 확인되었다.

이의 원인을 분석하고자 본 연구에서는 Case 4(2012. 08.27 14:00~30 13:00)를 대상으로 남강댐 유역을 포함한 레이더 반경 내(100 km) AWS 및 레이더 누적강우의 분포도를 도시하였으며(Fig. 8), 그 중 AWS에 대해서는 관측소별 점유면적인 티센망도를 같이 나타내었다. 레이더 강우의 경우 차등반사도, 비차등위상차 및 단일편파 순으로 추정강우 값이 크게 나타났다. 또한, AWS에 비해 레이더 추정 강우량 값은 모두 작았으나 레이더가 강우의 공간적인 분포를 더 잘 나타내었으며, 이러한 특징은 소유역 1, 2에서 두드러지게 나타났다.

통상, 지상관측 강우의 경우 해당 지점에서는 실제 강우량으로 볼 수 있지만 유역평균강우량 계산에 있어서는 이 강우량이 점유면적을 대표하게 되어 홍수량 추정에 오

차를 유발할 수 있다. 소유역 1, 2의 경우 AWS가 다른 유역들에 비해 밀도가 낮고 상대적으로 많은 강우량이 관측되었다. 이로 인해 Fig. 7(b)에서와 같이 홍수량 산정 시 AWS에 의한 모의유량이 관측유량에 비해 과대 추정되었고, 차등반사도에 의한 모의유량은 관측유량과 거의 유사하게 나타난 것이다. 이는 홍수예보에 있어 기존에는 AWS 관측강우만을 이용하여 홍수모의를 하였는데, 이중편파 레이더 추정강우를 활용할 경우 AWS 관측강우를 사용할 때 보다 더 나은 유량모의가 가능할 수 있다는 사례로 볼 수 있다. 따라서 홍수예보를 위한 유출해석 시, AWS와 함께 이중편파 레이더 강우도 함께 활용되어야 한다고 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 홍수예보에 있어서 이중편파 레이더 추정강우의 활용성을 분석하였다. 이를 위해 비슬산 레이더 반경(100 km)를 대상으로 사례기간을 선정하여 단일편파 및 이중편파 레이더 강우를 추정하고, 거리 및 강우강도 증가에 따른 정확도를 분석하였다. 또한, 레이더 추정강우의 유역평균강우량을 산정 및 평가하고, 남강댐 유역을 대상으로 SURR (Sejong University Rainfall Runoff) 모형에 적용하여 유출해석을 수행하였다. 본 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 이중편파 및 단일편파 레이더의 강우탐지 능력을 Hit rate 기법을 이용하여 평가한 결과, 관측반경 10 km 이내의 Hit rate 값은 0.88, 90~100 km 사이의 0.84로 거리가 증가함에 따라 강우탐지 능력이 감소하는 것으로 나타났다. 다만, 100 km 이내의 평균 Hit rate는 모두 0.84, 표준편차는 0.03으로 단일편파와 이중편파 레이더의 강우탐지 능력은 차이가 미미하였다.
- 2) 비슬산 레이더 전체반경 내의 지상관측 강우강도와 레이더 추정 강우강도를 비교한 결과 단일에 비해

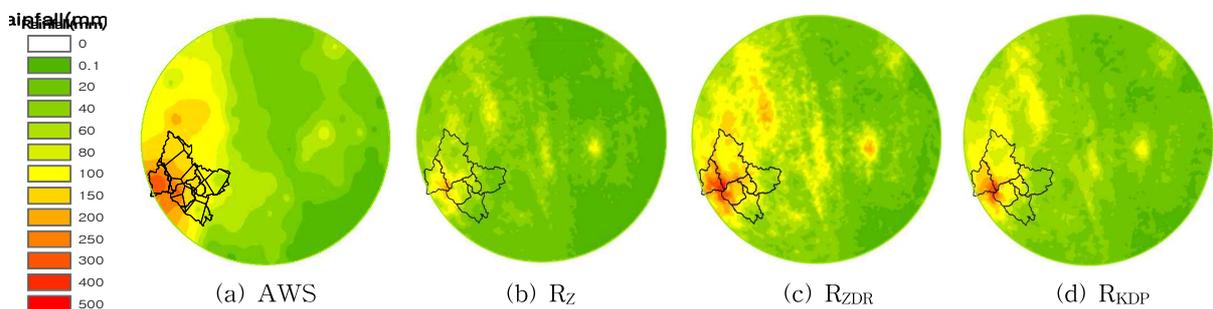


Fig. 8. Accumulated Rainfalls Distribution in Bisulsan Radar Range (Case 4)

이중편파 레이더 추정강우가 지상관측강우와 선형 상관성이 더 높게 나타났다. 단일편파 레이더 추정강우와 이중편파 레이더 추정강우의 강우강도 증가에 따른 오차를 평균제곱근오차 증가율을 통해 분석한 결과, 차등반사도의 오차증가율은 0.83, 비차등위상차는 0.92로 나타났다. 그에 반해 단일편파 레이더 추정강우의 평균증가율은 1.17로 나타나 강우강도 증가에 따른 오차의 변화는 이중편파 레이더 추정강우가 더 작은 것으로 판단된다.

- 3) 단일 및 이중편파 레이더 유역평균강우량을 지상관측강우의 값과 비교한 결과 이중편파 레이더 추정강우가 단일편파 레이더 추정강우에 비해 관측치에 유사한 것으로 확인되었다. 강한 강우강도에서 이중편파 레이더 추정강우의 정확도가 향상됨을 보였다.
- 4) SURR 모형의 유출모의 수행결과, 관측유량자료의 품질이 불량한 호우사상을 제외하면 단일편파 레이더 추정강우의 모의유출량에 비해 이중편파의 REV는 12~63%, REPF는 30~42% 감소하였으며, RMSE 또한 감소하는 것으로 나타났다.

본 연구 수행결과, 홍수예보 측면에서 기존에 활용되었던 단일편파 레이더 추정강우에 비해 이중편파 레이더 추정강우의 활용성이 높은 것을 확인하였다. 특히, AWS의 강우관측 밀도가 낮고 강우의 공간적인 분포가 매우 상이한 경우에는 기존의 지상관측강우 보다 이중편파 레이더를 활용한 유출모의 결과가 더 정확한 사례가 있어 이를 통해, 홍수예보 시 이중편파 레이더 추정강우가 AWS와 연계하여 활용될 수 있음을 제시하였다. 향후 지상강우관측소의 개수가 유역평균강우량에 미치는 영향과 호우특성별 강우사상을 추가한다면 홍수예보에 있어서 이중편파 레이더 추정 강우의 정량적인 활용기준을 제시할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발사업(CATER 2012-3100)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Allen, R.G., Jensen, M.E., Wright, J.L., and Burman, R.D. (1989). "Operational estimates of evapotranspiration." *Agronomy Journal*, Vol. 81, pp. 650-662.

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, pp. 19-30.

Bae, D.H., Lee, B.J., and Jeong, I.W. (2003). "Runoff Curve Number Estimation for Cover and Treatment Classification of Satellite Image (I)-CN Estimation." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 36, No. 6, pp. 985-997.

Bae, D.H., Kim, J.H., and Yoon, S.S. (2005). "Hydrologic Utilization of Radar-Derived Rainfall (I) Optimal Radar Rainfall Estimation." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 38, No. 12, pp. 1039-1049.

Bae, D.H., Tran, A.P., and Yoon, S.S. (2009). "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.

Bae, D.H., and Lee, B.J. (2011). "Development of Continuous Rainfall-Runoff Model for Flood Forecasting on the Large-Scale Basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 1, pp. 51-64.

Beck, M.B. (1987). "Water-quality modeling—a review of the analysis of uncertainty." *Water Resources Research*, Vol. 23, pp. 1393-1442.

Bringi, V.N., and Chandrasekar, V. (2001). "Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications." Cambridge University Press.

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*, KOSHAM, Vol. 12, No. 2, pp. 215-224.

Jeong, J.Y., Yu, M.S., and Yi, J.E. (2014). "Runoff Analysis Using Dual Polarization RADAR and Distributed Model." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 47, No. 9, pp. 801-812.

Jordan, P., Seed, A., May, P., and Keenan, T. (2003). "Evaluation of dual polarization radar for rainfall-runoff modelling: a case study in Sydney, Australia." *IUGG2003 at Sapporo*, IAHS, No. 282, pp. 11-18.

Lee, B.J., Bae, D.H., and Jeong, C.S. (2003). "Runoff Curve Number Estimation for Cover and Treatment

- Classification of Satellite Image (II)-Application and Verification.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 36, No. 6, pp. 999-1012.
- Lee, B.J. (2010). Development of Stochastic Continuous Storage Function Model with Distributed Ensemble Kalman Filtering Techniques. Ph. D. dissertation, Sejong University, Seoul, Korea, pp. 13-51.
- Lee, C.K. (2013). “Construction, Current status of the operation and utilization of rainfall radar observation network of the Ministry of Land, Transport and Maritime.” *The Journal of Korea Institute of Electronics Engineers*, Vol. 40, No. 2, pp. 32-40.
- Ryzhkov, A.V., Giangrande, S.E., and Schuur, T.J. (2005). “Rainfall Estimation with a Polarimetric Prototype of WSR-88D.” *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 44, pp. 502-515.
- Sun, X., Mein, R.G., Keenan, T.D., and Elliott J.F. (2000). “Flood estimation using radar and raingauge data.” *Journal of Hydrology*, Vol. 239, pp. 4-18.
- Yoon, S.S. (2011). Development of Optimal Radar Rainfall Estimation with Orographic Effect and Urban Flood Forecasting Application Technique. Ph. D. dissertation, Sejong University, Seoul, Korea, pp. 110-151.

<p>paper number : 14-113 Received : 11 November 2014 Revised : 2 February 2015 Accepted : 25 February 2015</p>
