

## 이중 편파 레이더 자료를 이용한 강수 추정 알고리즘의 오차 분석 Comparison of Quantitative Precipitation Estimation Algorithms using Dual Polarization Radar Measurements in Korea

노성진\* · 임상훈\*\* · 최신우\*\*\* · 황석환\*\*\*\* · 이동률\*\*\*\*\*

Noh, Seong Jin\*, Lim, Sanghun\*\*, Choi, Shin-woo\*\*\*, Hwang, Seok Hwan\*\*\*\*, and Lee, Dong-ryul\*\*\*\*\*

### Abstract

Accurate estimation of precipitation is essential to predict and prevent natural disasters (e.g. flood, landslide, and heavy snowfall). Recently, weather radars have become a popular tool for quantitative precipitation estimation (QPE) with high spatio-temporal resolution. Especially, in the last decade, QPE performance has been improved by introduction of polarimetric technology to observe multiple hydrometeorological variables at various scales. By being able to measure variables such as the differential reflectivity, specific differential phase, and cross-correlation coefficient, the reliability of estimation has significantly improved as compared to the reflectivity-based method (Ryzhkov *et al.*, 2005a). However, QPEs using dual polarization radar data are still subject to uncertainties resulting from rainfall conversion relationships, combination methods of different parameters, and sampling errors. In this study, we assessed the uncertainty and applicability of conventional QPE algorithms, such as JPOLE (Ryzhkov *et al.*, 2005a) and CSU (Cifelli *et al.*, 2011) algorithms, using the dual polarization radar at Mt. Biseul in the south-eastern part of the Korean Peninsula. Analysis results illustrated that the JPOLE algorithm outperformed the CSU algorithm slightly for daily and hourly rainfall analysis using various metrics. The higher accuracy was found in the stations located within less than 60 km from radar and 100 m in the elevation.

**Key words** : Dual polarization radar, Quantitative precipitation estimation, JPOLE Algorithm, CSU Algorithm

### 요 지

강수량의 정확한 추정은 자연 재해의 예측 및 방지를 위해 필수적이다. 최근 강우레이더는 높은 시공간 해상도로 정량적 강수 추정(quantitative precipitation estimation; QPE)을 수행하는 기술로 주목받고 있다. 특히, 레이더의 강수 추정 성능은 다양한 규모에서 여러 수문 기상 변수를 관측하는 이중 편파 기술의 도입에 의해 향상되었다. 이중 편파 레이더는 다양한 매개변수를 측정하기 때문에, 기존의 반사도-강수 관계만을 활용하는 단일 편파 레이더에 비해 강수 추정 정확도 향상이 가능하다. 본 연구의 목적은 이중 편파 레이더에 대한 대표적인 강수 추정 방법인 JPOLE(Ryzhkov *et al.*, 2005a)와 CSU(Cifelli *et al.*, 2011) 알고리즘의 국내 강우레이더 자료에 대한 적용성 및 불확실성을 평가하는 것이다. 이를 위해 S밴드 이중 편파 레이더인 비슬산 강우레이더의 2012년 호우사상을 대상으로 두 가지 알고리즘을 적용하여 강수를 각각 추정하고, 일별 및 시간별 강수의 시공간 분포 정확성에 대해 지상관측 강수와 비교하였다. 또한 관측 지점 별 오차를 분석하여 레이더로부터의 거리 및 관측지점 고도와 레이더 정확도와와의 상관성을 분석하였다. 분석 결과, JPOLE 및 CSU 알고리즘 모두 표준화된 평균절대오차(nMAE)를 기준으로 일별 강수에 대해 0.23, 시간별 강수 기준으로 0.35 이내의 비교적 정확한 강수량 추정 결과를 산출하였다. 모든 정확도 평가 지표 및 기준에 대해서 JPOLE 알고리즘이 CSU 알고리즘에 비해 우수한 정확도를 보였으나, 그 차이는 평균제곱근오차(RMSE)를 기준으로 50 mm/day 이상 일별 강수에 대해 5.5 mm(약 17%차이), 10 mm/hr 이상 시간별 강수에 대해 0.6 mm(약 8%차이)였다. 관측소 위치 별 오차 분석 결과, 불확실성이 높은 지점의 위치는 일정한 경향이 없었으나, 지상관측 지점이 레이더로부터 거리 60 km, 해발고도 고도 100 m 이내의 조건에서 정확도 높은 관측지점이 존재하였다.

**핵심용어** : 이중 편파 레이더, 정량적 강수 추정, JPOLE 알고리즘, CSU 알고리즘

\*정회원. 한국건설기술연구원 수자원연구실 선임연구원(E-mail: seongjin.noh@gmail.com)

Member, Research Specialist, Water Resources Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

\*\*교신저자. 정회원. 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구위원(Tel: +82-31-910-0373, Fax: +82-31-910-0251, E-mail: slim@kict.re.kr)

Corresponding Author. Member, Research Fellow, Water Resources Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

\*\*\*한국건설기술연구원 수자원연구실 연구원보조원

Assistant researcher, Water Resources Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

\*\*\*\*한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구원

Senior Researcher, Water Resources Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

\*\*\*\*\*한국건설기술연구원 수자원연구실 선임연구위원

Senior Research Fellow, Water Resources Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

## 1. 서 론

강수량의 정확한 추정은 수문과정의 이해 및 해석, 자연 재해의 예측 및 방지를 위해 핵심적인 요소이다. 최근 강우레이더는 높은 시공간 해상도로 정량적 강수 추정(quantitative precipitation estimation; QPE)을 수행하는 기술로 주목받고 있다. 넓은 지역에 대해 고해상도의 시공간 분해능을 갖는 레이더 추정 강수는 산악지역에 대한 돌발홍수 예측이나 홍수 예보의 정확도 향상에 큰 가능성을 지닌 것으로 평가되고 있으며(Bae *et al.*, 2012), 그동안 많은 관련 연구가 진행되어 왔다(Collier *et al.*, 1986; Seo, 1998; Brangi *et al.*, 2001; Borga, 2002; Thorndahl *et al.*, 2014). 특히 국내에서는 단일 편파 레이더의 오차 및 면적평균환산의 오차, 지상 강우자료의 합성 및 보정 방법, 레이더 반사도의 수직분포에 대한 보정 등 레이더 추정 강수의 정확도를 평가하고 향상시키기 위한 연구(Bae *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2008, 2009, 2010, 2011; Kim and Yoo, 2014; Lee *et al.*, 2014; Yoo *et al.*, 2008, 2009, 2011a, b, c; Yoo and Yoon, 2010; Yoon *et al.*, 2014b)와 레이더 추정을 활용한 수문학적 홍수 모의 및 산사태 등 재해 예측 기법을 중심으로 많은 연구(Ham and Hwang, 2014; Kim and Kim, 2008; Noh *et al.*, 2013, 2014; Park and Hur, 2009; Yoon *et al.*, 2014a)가 진행되었다.

한편, 최근 수평편파만을 사용하는 기존의 단일 편파 레이더에 비해 수직 편파를 추가로 사용하여 여러 수문 기상 변수를 관측하는 이중 편파 기술의 도입에 의해 레이더의 강수 추정 성능이 향상되고 있다(Jeon *et al.*, 2012; Lee, 2013; Lim *et al.*, 2013b). 이중 편파 레이더에서는 차등반사도(differential reflectivity,  $Z_{DR}$ ), 비차등위상차(specific differential phase,  $K_{DR}$ ), 교차상관계수(cross-correlation coefficient,  $\rho_m$ ), 차등위상차(differential phase,  $\phi_{DP}$ ) 등 다양한 매개변수를 측정하기 때문에, 기존의 반사도-강수 관계만을 활용하는 단일 편파 레이더에 비해 강수 추정의 정확도 향상이 가능하다. 이중 편파 레이더 강수 추정의 대표적인 방법으로는 JPOLE(the Joint Polarization Experiment, Ryzhkov *et al.*, 2005a)와 CSU(Colorado State University, Cifelli *et al.*, 2011) 알고리즘이 있다. JPOLE 알고리즘은 강우입자의 가로축과 세로축의 비(axis ratio)와 등가부피(equivolume)를 갖는 구체의 직경과의 관계를 이용하며, 반사도에 의한 추정 강수량  $R(Z)$ 를 임계값으로 사용한다. 반면, CSU 알고리즘은  $Z_{dr}$ ,  $K_{dp}$ 를 주요 임계값으로 사용하여, 중위도 지역에 최적화되도록 매개변수별 강수 추정식을 구성하였으며, 콜로라도 사례 연구(Cifelli *et al.*, 2011)에서는 JPOLE 알고리즘보다 높은 정확도를 갖는 것으로 보고되었다. 2000년대 이후 국외에서 이중 편파 레이더를 이용한 강수 추정과 관련한 다양한 연구결과가 발표되고 있다. 그 중에서도 Anagnostou *et al.*(2010)는 이탈리아의 산악의 복잡한 지형에 대해 X밴드 이중 편파 레이더의 강수 추정

적용성을 평가하였으며, Gorgucci *et al.*(2006)은 X밴드 이중 편파 레이더의 반사율과 차등반사도를 강수 추정에 적용하여 감쇄 보정없이 편이가 최소화된 강수를 추정한 결과에 대해 보고한 바 있다. Tabary *et al.*(2011)는 C밴드 이중 편파 레이더에 대해 차등반사도를 이용한 알고리즘을 다른 방법과 비교하였으며, Ryzhkov *et al.*(2005b)는 이중 편파 레이더의 자기일관성(self-consistency)를 이용한 보정방법에 대해 연구하였다. 국내에서는 Jeon *et al.*(2012) 및 Lee(2013) 등이 최근 설치된 이중 편파 레이더의 적용성에 대해 분석한 바 있으며, Ahn *et al.*(2014) 및 Lim *et al.*(2013a) 등이 이중 편파 레이더 강우자료를 홍수 해석에 활용한 연구 성과를 발표하였다. 하지만, 국내에 이중 편파 레이더가 도입된 지 오래되지 않은 관계로, 다양한 강수 추정 알고리즘 평가 및 공간적인 오차 분석에 관한 연구가 충분히 수행되지 않은 것이 사실이다.

본 연구에서는 이중 편파 레이더 강수 추정 방법인 JPOLE과 CSU 알고리즘의 국내 강우레이더 자료에 대한 적용성 및 공간적 불확실성을 평가하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 S 밴드 이중 편파 레이더인 비슬산 강우레이더의 2012년 호우 사상을 대상으로 두 가지 알고리즘을 각각 적용하여 강수를 추정하고, 일별 및 시간별 강우의 시공간 분포의 정확성에 대해 지상관측 강수와 비교하였다. 또한 관측지점 별 오차를 분석하여 레이더로부터의 거리 및 관측지점 고도와 레이더 강수 정확도와의 상관성을 분석하였다.

## 2. 자료 및 분석 방법

### 2.1 비슬산 강우레이더

본 연구에서는 비슬산 강우레이더의 관측자료를 활용하였다. 비슬산 강우레이더는 S 밴드의 주파수 영역을 사용하는 이중 편파 레이더이며, 125 m의 공간해상도, 2.5분의 시간해상도로 반경 150 km까지 관측을 수행하여, 낙동강 및 태화강, 형산강 등의 유역에 대한 강수 정보를 제공하고 있다. 레이더의 위치와 세부 제원은 각각 Fig. 1 및 Table 1과 같다. 레이더 강수 추정 자료의 평가에는 기상청의 자동기상관측장비(automated weather station; AWS)가 설치된 20개 지점에서 측정된 10분 간격 강수량 자료를 이용, 시간별 및 일별 자료로 환산하여 결과분석에 활용하였다. 관측지점은 비슬산 강우레이더에서 약 10~100 km 거리에 위치하고 있으며, 설치된 해발고도는 약 14~860 m까지 다양하며, 3.2절에서 지상관측 지점의 거리, 고도 별 레이더 추정 강수의 오차를 분석하였다. 각 지상 관측지점의 위치, 명칭, 고도, 레이더로부터의 거리 등은 각각 Fig. 1 및 Table 2에서 보는 바와 같다. 본 연구에서는 2012년 비슬산강우레이더 측정된 자료 중 비교적 누적 강우량이 많은 4개의 강우사상에 대해 분석을 수행하였으며, 발생시간, 강우지속시간, 강우특성 등은 다음의 Table 3과 같다. 본 연구에서는 레이더 강수 추정 시 4개 각도(-0.5, 0, 0.5,

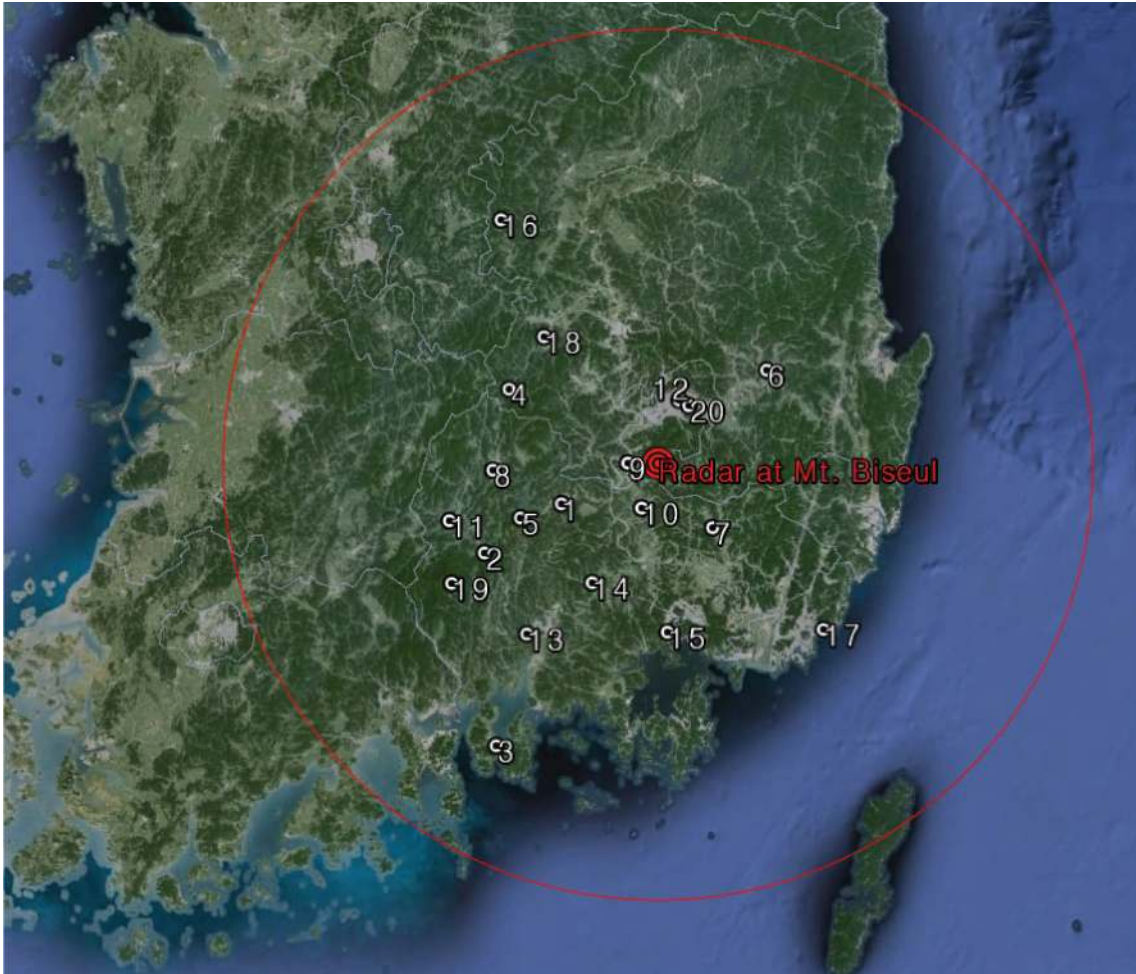


Fig. 1. location of the Bisul weather radar and ground rainfall gauges.

Table 1. location and operational profiles of the S-band radar at Mt. Bisul

Type	Description
Longitude	128° 32' 6
Latitude	35° 41' 39
Elevation	1,085 m
Spatial resolution	125 m
Temporal resolution	2.5 min
Observation range	150 km
Frequency	2,795 MHz (S-band)
Scan speed	3 RPM
Beam width	0.95°

0.8)의 PPI(plan position indicator)를 이용하였으며, 이 중 최대 값을 선택하였다. 지상관측 강수와 비교를 위해 레이더로부터의 거리(range) 방향 3개, 방위각(azimuth) 방향 3개, 총 9개의 레이더 측정 변수의 평균을 사용하였다.

## 2.2 이중 편파 레이더의 강수 추정 방법

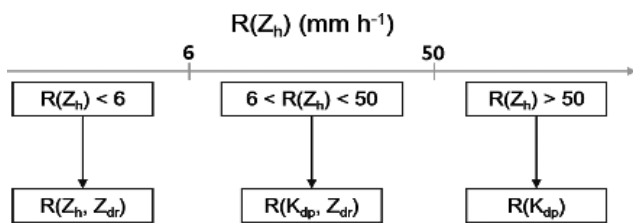
이중 편파 강우레이더는 수평 및 수직 방향 편파 신호를 사용하여 눈, 우박, 물방울 등이 떨어지면서 공기저항에 의해 수직으로 넓어지는 형태를 구별할 수 있으며, 수평반사도( $Z_h$ ), 도플러속도( $V_r$ ), 스펙트럼 폭( $W$ ), 수직반사도( $Z_v$ ), 차등반사도(differential reflectivity,  $Z_{DR}$ ), 비차등위상차(specific differential phase,  $K_{DP}$ ), 교차상관계수(cross-correlation coefficient,  $\rho_w$ ), 차등위상차(differential phase,  $\phi_{DP}$ ) 등 총 8가지의 관측 자료를 산출한다. 본 연구에서는 JPOLE(Ryzhkov *et al.*, 2005a) 및 CSU(Cifelli *et al.*, 2011) 알고리즘을 이용하여 비슬산 이중 편파 강우레이더 자료로부터 강수를 추정하였다. JPOLE 알고리즘은 정상류 상태 공기의 등강우입자(equilibrium raindrop) 개념에 기초한 강수 추정 이론으로, 강우입자의 가로축과 세로축의 비(axis ratio)와 등강우입자(equivolume)를 갖는 구체의 직경과의 관계를 이용한다. 구체적으로는 Fig. 2에서 보는 바와 같이, 비차등위상차( $K_{DP}$ ), 수평반사도( $Z_h$ ), 차등반사도( $Z_{DR}$ )를 이용하여 각각의 강수 추정치  $R(K_{DP})$ ,  $R(Z_h)$ ,  $R(Z_{DR})$ 를 계산하고,  $R(Z)$ 의 강우강도를 기준으로 6 mm/h,

**Table 2.** location and elevation of ground rainfall gauges

Station no.	Name	Longitude	Latitude	Elevation(m)	Distance from Radar(km)
1	Hapcheon	128.16986	35.56503	33.1	35.8
2	Sancheong	127.8791	35.41299	138.1	67.1
3	Namhae	127.92641	34.81663	45.0	113.4
4	Daedeok	127.96891	35.91794	235.7	54.7
5	Daebuyung	128.0143	35.52117	248.0	50.6
6	Yeongcheon	128.95141	35.97743	37.6	48.6
7	Milyang	128.7441	35.49148	11.2	32.1
8	Geochang	127.909	35.6674	226.0	55.6
9	Dalseong	128.4233	35.6906	17.0	9.2
10	Changnyeong	128.47588	35.55217	24.3	18.5
11	Hamyang	127.7454	35.5114	151.2	73.7
12	Daegu	128.61903	35.88515	64.1	20.9
13	Jinju	128.04002	35.16379	30.2	75.1
14	Uiryeong	128.2881	35.3226	14.2	48.4
15	Changwon	128.57285	35.1702	37.2	60.6
16	Hwaseo	127.9344	36.4412	300.0	96.3
17	Haeundae	129.16236	35.1761	63.0	83.5
18	Gimcheon	128.10164	36.08128	83.3	55.5
19	Mt. Jiri	127.75629	35.31913	864.7	82.0
20	Suseong	128.65509	35.86803	63.0	20.9

**Table 3.** Information of selected rainfall events

Event no.	Event period	Maximum daily rainfall		
		Station name (Station no.)	Amount (mm/day)	Duration of rainfall (hr)
1	July 13 2012	Hapcheon (1)	74	9
2	July 15 2012	Haeundae (17)	181	17
3	August 24 2012	Daebuyung (5)	220	17
4	September 17 2012	Daedeok (4)	259	16



**Fig. 2.** Flowchart of the JPOLE algorithm.

50 mm/h 구간에 대해 각각 별도의 관계식을 아래 식과 같이 적용한다(Jeon *et al.*, 2012; Lee, 2013).

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

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

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

$$R(Z) < 6 \text{ mm/h일 경우, } R = \overline{R(Z)} / f_1 \overline{R(Z_{DR})} \quad (4)$$

$$6 \text{ mm/h} \leq R(Z) < 50 \text{ mm/h일 경우, } R = \overline{R(K_{DP})} / f_2 \overline{R(Z_{DR})} \quad (5)$$

$$50 \text{ mm/h} < R(Z) \text{일 경우, } R = \overline{R(K_{DP})} \quad (6)$$

여기서,  $f_1(\overline{Z_{DR}}) = 0.4 + 5.0 |\overline{Z_{dr}} - 1|^{1.3}$  (7)

$$f_2(\overline{Z_{DR}}) = 0.4 + 3.5 |\overline{Z_{dr}} - 1|^{1.7} \quad (8)$$

$$\overline{Z_{DR}} = 10^{0.1 \overline{Z_{dr}}(dB)} \quad (9)$$

여기서,  $Z_h$ 는 레이더의 수평반사도( $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ ),  $R$ 은 강우강도( $\text{mm/h}$ ),  $Z_{dr}$ 은 수평편파와 수직편파의 차이인 차등반사도( $\text{dB}$ ),  $K_{dp}$ 는 비차등위상차( $\text{degree/km}$ )이다.

Colorado State University(CSU) 알고리즘(Cifelli *et al.*, 2011)은 대기수상체 분류(hydrometeor classification) 후  $Z_h$ 와

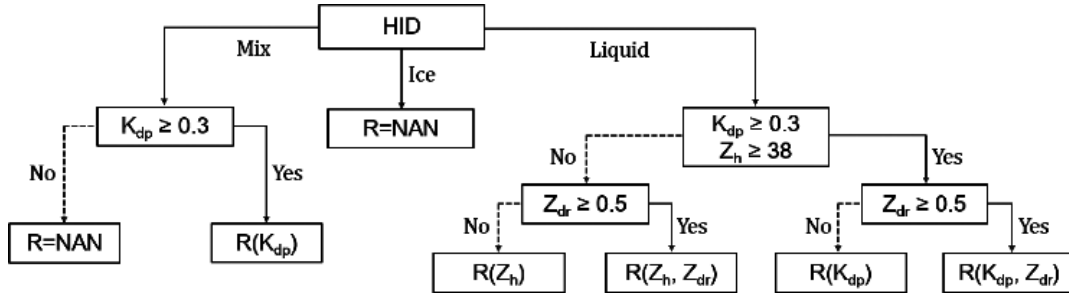


Fig. 3. Flowchart of the CSU-HIDRO algorithm.

$Z_{dr}$ ,  $K_{dp}$ 값을 기준으로 다음의 식에 따라 강수량을 산정한다.

$$R(Z_h) = 0.0170(Z_h)^{0.7143} \quad (K_{dp} < 0.3, Z_h < 38, Z_{dr} < 0.5) \quad (10)$$

$$R(Z_h, Z_{dr}) = 6.7 \times 10^{-3} (Z_h)^{0.927} 10^{(-0.343Z_{dr})} \quad (K_{dp} < 0.3, Z_h < 38, Z_{dr} \geq 0.5) \quad (11)$$

$$R(K_{dp}, Z_{dr}) = 90.8 (K_{dp})^{0.93} 10^{(-0.169Z_{dr})} \quad (K_{dp} \geq 0.3, Z_h \geq 38, Z_{dr} \geq 0.5) \quad (12)$$

$$R(K_{dp}) = 40.5 (K_{dp})^{0.85} \quad (K_{dp} \geq 0.3, Z_h \geq 38, Z_{dr} < 0.5) \quad (13)$$

국내 실무 적용시, 이중 편파 강우레이더로부터 추정된 강수를 지상 강우관측 대비 보정하기 위하여 편의보정방법(mean field bias correction)을 활용하고 있으나(Yoo *et al.*, 2011a; MLTMA, 2011), 본 연구에서는 강수 추정 알고리즘의 정확도를 평가하고 지점별 오차를 분석하기 위해 별도의 보정을 수행하지 않았다.

### 2.3 정확도 평가 방법

레이더 추정 강수의 정확도를 평가하기 위해 평균제곱근오차(root mean square error; RMSE), 표준화된 평균제곱근오차(normalized RMSE; nRMSE), 평균절대오차(mean absolute error; MAE), 표준화된 평균절대오차(normalized MAE; nMAE) 4가지의 평가 지표를 적용하였으며, 각각의 식은 다음과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (R_{ground}^t - R_{radar}^t)^2}{T}} \quad (14)$$

$$nRMSE = RMSE / \overline{R_{ground}} \quad (15)$$

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^T |R_{ground}^t - R_{radar}^t|}{T} \quad (16)$$

$$nMAE = \frac{\sum_{t=1}^T |R_{ground}^t - R_{radar}^t|}{\overline{R_{ground}} T} \quad (17)$$

여기서,  $t$ : 시간,  $T$ : 지상관측 강수가 0 이상인 시계열수,  $R_{ground}^t$ : 지상관측,  $R_{radar}^t$ : 레이더 추정 강수,  $\overline{R_{ground}}$ : 지상관측 평균이다.

## 3. 분석 결과

### 3.1 일별 및 시간별 강수량 분석

분석 대상 호우 사상에 대해 JPOLE와 CSU 두 가지 알고리즘으로 추정된 일별 누적 강수량은 각각 Fig. 4에서 보는 바와 같다. 모든 호우 사상에서 공간적인 강수량의 편차가 컸는데, Event 1-3은 남쪽 지역에서 가장 많은 강수량을 보인 반면, Event 4는 레이더 중심부에 비교적 가까운 곳에서 강한 강수가 나타났다. 공간분포 양상은 JPOLE와 CSU에서 모두 비슷하였으나, 전반적으로 JPOLE 알고리즘으로 추정된 일별 누적 강수량에서 더 강한 붉은 색 영역(강한 강수량)이 관찰되었다. 레이더 및 지상관측의 일별 누적 강수를 1:1 그래프로 비교하면 다음의 Fig. 5와 같으며, 붉은 색 엑스자 점이 JPOLE, 푸른 색 다이아몬드 모양 점은 CSU 추정 강수를 각각 의미한다. CSU 및 JPOLE 추정 강수 모두 50 mm/day 이상의 강수 구간에서 일부 과소추정이 발생하였으며, CSU 추정 강수가 JPOLE 보다 전반적으로 아래쪽에 위치하고 있어 CSU 알고리즘에서 상대적으로 과소추정의 영향이 더 큰 것을 알 수 있다.

정량적인 평가를 위해 2.3절에 정의한 정확도 분석 지표에 의해, 관측 강수 기준 각각 0.5, 10, 50 mm/day 이상에 대해 오차를 분석하였으며, 결과는 Table 4와 같다. RMSE, nRMSE, MAE, nMAE의 네 가지 지표로 0.5, 10, 50 mm/day 이상의 강수에 대해 각각 분석한 결과, JPOLE 알고리즘이 CSU보다 모든 경우에서 우수하였다. 한 가지 예로 MAE에 대한 결과를 살펴보면, 0.5, 10, 50 mm/day 이상 강수에 대해 JPOLE 알고리즘에서 각각 15.2, 15.3, 19.7 mm, CSU 알고리즘에서 각각 18.7, 18.9, 25.0 mm의 오차를 보여, 강한 강우일수록 두 알고리즘 모두 오차가 증가하였다. 반면, 관측오차로 MAE를 표준화한 nMAE를 보면, JPOLE에서 각각 0.32, 0.26, 0.18, CSU에서 각각 0.35, 0.31, 0.23으로 강수의 상대 크기에 대한 오차는 감소하였다.



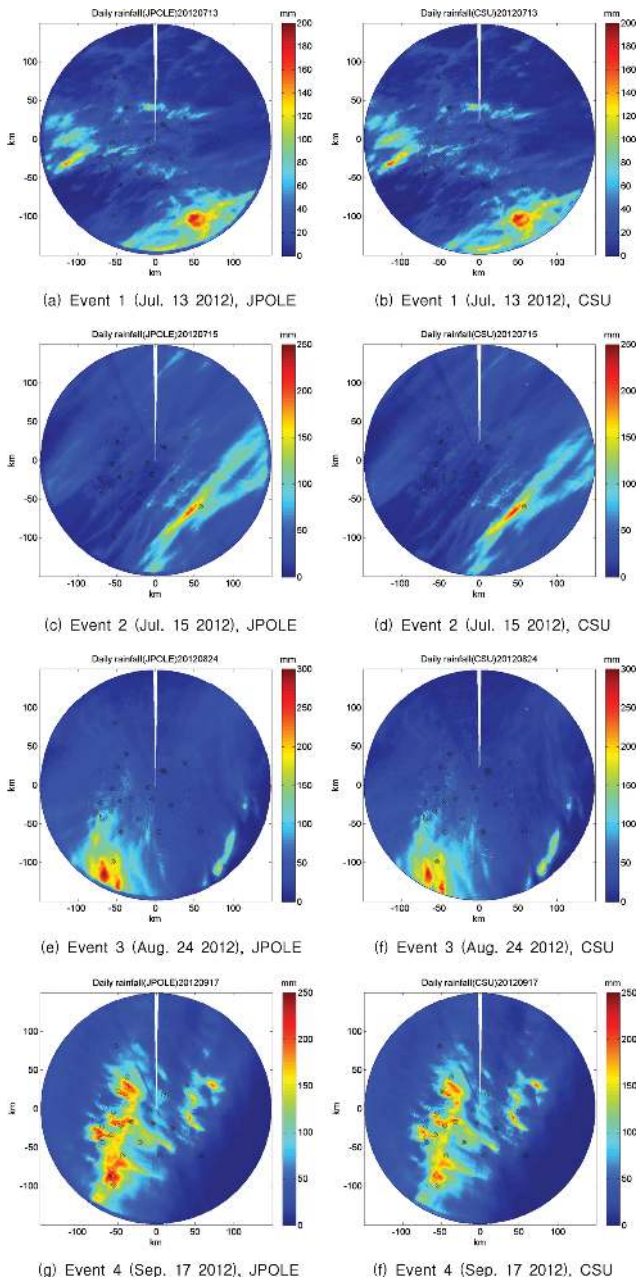


Fig. 4. Distribution of daily cumulative rainfall by two QPE algorithms.

Fig. 6은 네 가지 호우사상에 대해 두 가지 알고리즘으로 추정된 레이더 강수와 지상관측의 시간별 변화를 지상관측소별

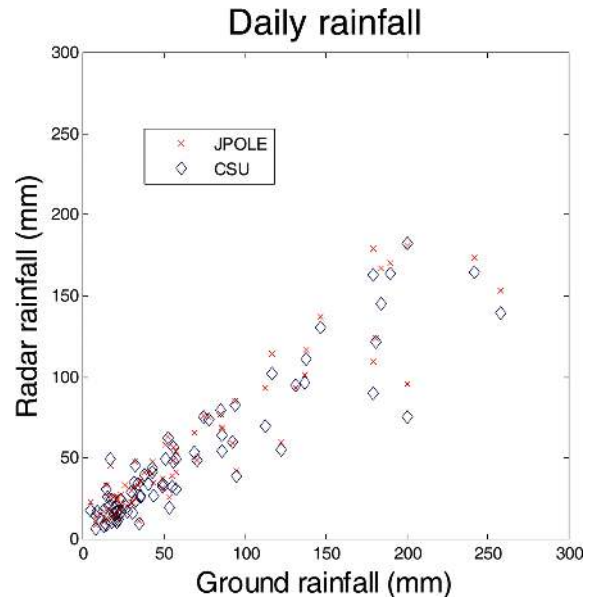


Fig. 5. Comparison of daily cumulative rainfall by two QPE algorithms.

로 각각 비교한 것이다. 각 호우사상별 20개의 그래프는 위에서부터 각각 지점 1에서 20까지의 지상관측지점에 대한 비교 결과이다. 지상관측소 지점의 위치 및 번호는 Fig. 1과 Table 2에서 확인할 수 있으며, 그래프에서 붉은 색 엑스자 점은 JPOLE, 푸른 색 다이아몬드 모양 점은 CSU, 검은 실선은 지상관측을 각각 의미한다. Fig. 6(a)를 보면, 지점 1(Hapcheon), 2(Sancheong), 6(Yeongcheon), 12(Daegu) 등에서는 강한 강수가 발생하는 시간이 지점에 따라 각각 다름에도 불구하고, 두 가지 강수 추정 알고리즘에 의한 결과가 다른 지점에 비해 상대적으로 정확함을 알 수 있다. 반면, 지점 4(Daedeok), 8(Geochang), 13(Jinju)에서는 지상관측 강수에 비해 레이더 추정값이 일부 과소 추정되었으며, 반대로 지점 7(Milyang), 9(Dalseong), 17(Haeundae)에서는 일부 과대 추정이 발생하였다. 오차발생 원인으로는 관측지점의 고도, 레이더로부터의 거리, 해양으로부터의 거리 등 지형 및 기상과 관련된 요소와 레이더 PPI 선택과 관련된 요소 등 다양한 요인과 관련이 있을 것으로 예상되나, 전체 불확실성 요소에 대한 분석은 관측 및 증거 자료의 불충분으로 인해 본 연구의 범위를 벗어난다. 불확실성 요인 중 일부 지형요소와 관측지점별 오차와의 연

Table 4. Accuracy of daily rainfall by two QPE algorithms for varying rainfall intensity

	R>0.5 mm/day		R>10 mm/day		R>50 mm/day	
	JPOLE	CSU	JPOLE	CSU	JPOLE	CSU
RMSE	22.4	26.4	22.6	26.7	26.4	31.9
nRMSE	0.27	0.33	0.27	0.33	0.25	0.29
MAE	15.2	18.7	15.3	18.9	19.7	25.0
nMAE	0.32	0.35	0.26	0.31	0.18	0.23

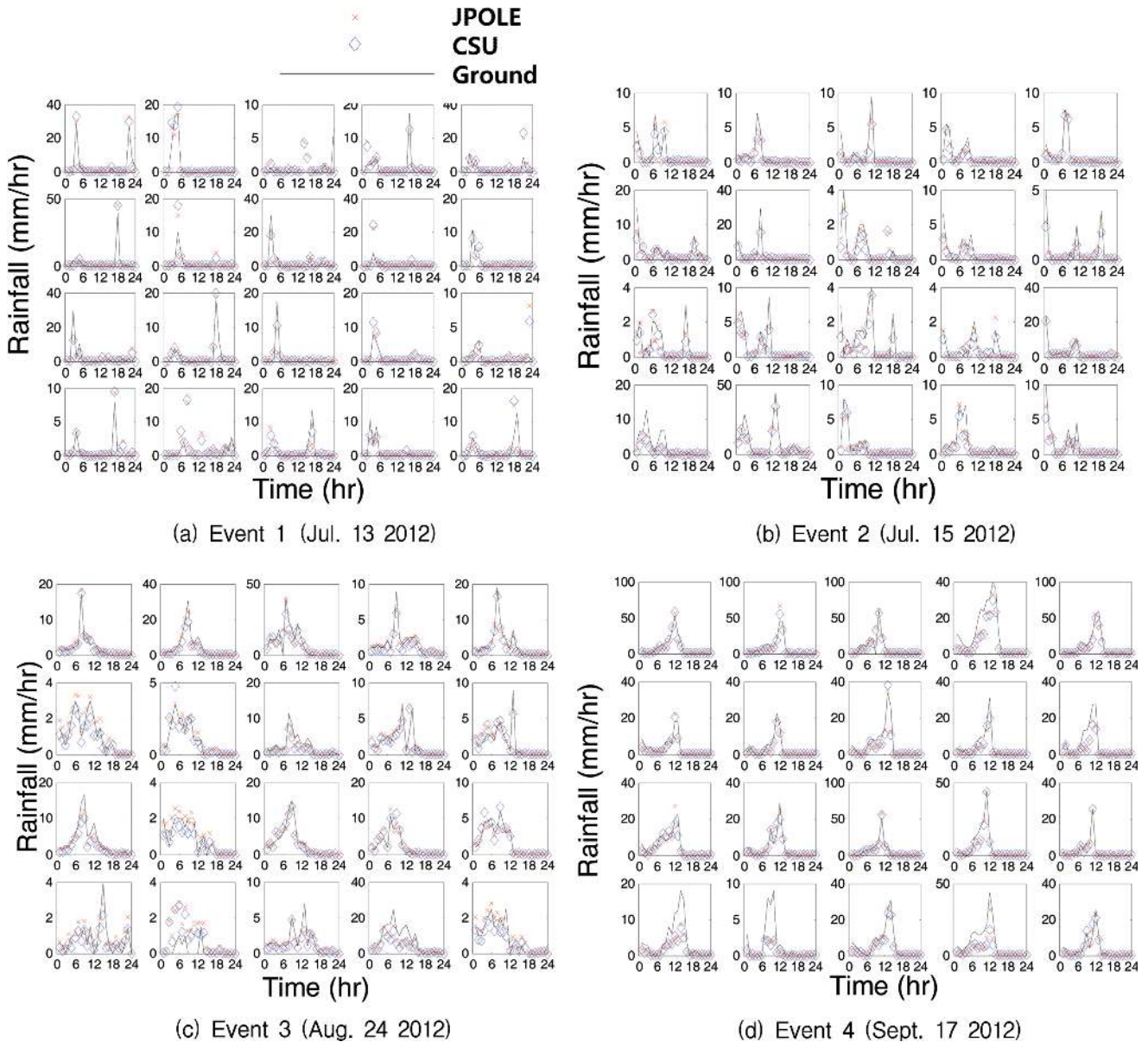


Fig. 6. Comparison of hourly rainfall time series.

관측에 대해서는 3.2절에서 추가적으로 논의한다. Fig 6(b), (c),(d)에서도 지상관측 강수의 크기와 시간변화 양상을, 두 가지 레이더 추정 강수 모두에서 비교적 정확하게 재현하고 있음을 정성적으로 확인할 수 있으나, 지점에 따라 일부 과소 및 과대 추정이 또한 발생하였으며, 지점별 정확도에 대해서는 다음 절에서 분석한다.

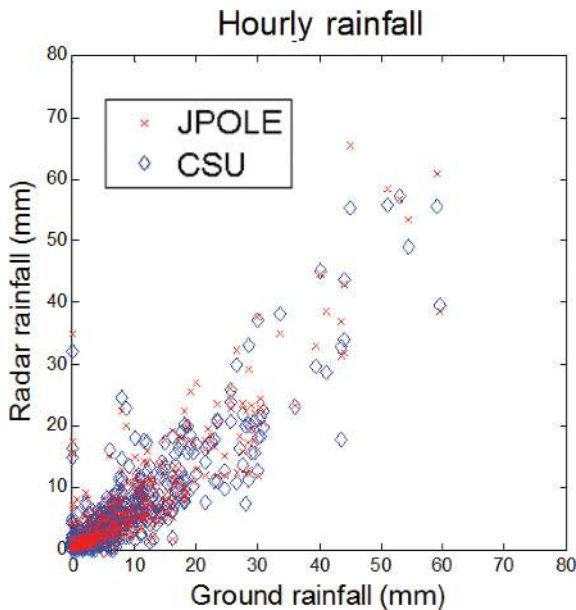
레이더 및 지상관측의 시간별 강수의 1:1 비교 그래프를 Fig. 7에 도시하였으며, 표시 방식은 Fig. 5와 동일하다. Fig. 7의 자료를 관측 강수 기준 각각 0.5, 5, 10 mm/hr 이상에 대해 분석한 결과는 다음의 Table 5에서 보는 바와 같다. 시간별 강수에 대한 결과는 일별 강수에 대한 분석 결과(Table 4 참조)와 비슷하게 모든 평가 지표에 대해서 JPOLE 알고리즘이 CSU보다 우수하였다. 두 알고리즘에 의한 추정 강수량의 차

이는 시간별 차이가 누적되어 일별 분석에서 더 크게 나타나, 평균제곱근오차(RMSE)를 기준으로 50 mm/day 이상 일별 강수에 대해 5.5 mm(약 17%차이), 10 mm/hr 이상 시간별 강수에 대해 0.6 mm(약 8%차이)였다(Table 4, 5 참조).

두 알고리즘의 정확도가 일별 및 시간별 강수에 대해 모두 약 80%, 65%(nMAE 기준) 이상의 정확도를 보이고 있으므로, 국내 적용성을 확인할 수 있었으나, 강수 추정 알고리즘의 정량적인 평가를 위해서는 향후 분석 기간 확대 및 연도별 오차 변화 특성에 대한 추가 연구가 필요하다. 또한 두 알고리즘에 적용된 임계값 및 매개변수는 국외 자료에 기반한 것이므로, 국내에 적합한 매개변수 추정에 관한 연구가 병행되어야 하며, 이 때 레이더 자료의 품질(특히, 차등반사도와 비차등위상차)이 함께 고려될 필요가 있을 것으로 판단된다.

**Table 5.** Accuracy of hourly rainfall by two QPE algorithms for varying rainfall intensity

	R>0.5 mm/hr		R>5 mm/hr		R>10 mm/hr	
	JPOLE	CSU	JPOLE	CSU	JPOLE	CSU
RMSE	3.6	4.0	5.7	6.3	7.2	7.8
nRMSE	0.57	0.63	0.43	0.48	0.37	0.40
MAE	2.29	2.56	4.4	5.0	5.9	6.4
nMAE	0.40	0.46	0.37	0.42	0.32	0.35

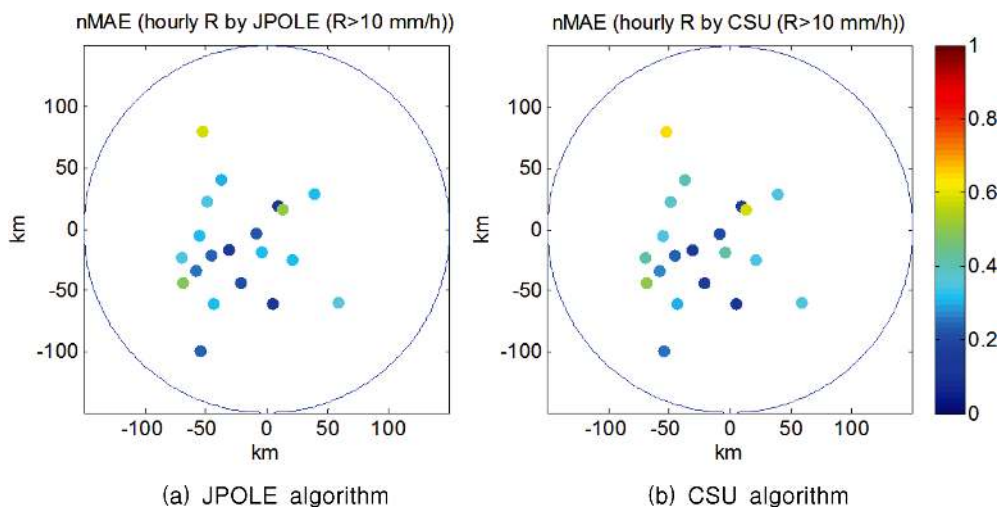


**Fig. 7.** Comparison of hourly rainfall by two QPE algorithms.

### 3.2 지상관측소 위치 별 레이더 강수 불확실도 분석

본 절에서는 지상관측소 위치 별 레이더 강수의 불확실성을 분석하였다. 3.1절의 일별, 시간별 강수에 대한 비교에서 모든 평가 지표가 비슷한 결과를 보였으므로, 상대적인 오차크기를 알 수 있는 표준화된 평균절대오차(nMAE)를 분석 기준으로

활용하였으며, 시간별 강수에 대한 결과를 비교하였다. Fig. 8은 레이더 추정 강수에 대한 관측소 위치 별 nMAE를 공간적으로 도시한 것으로, JPOLE과 CSU 알고리즘에 대한 nMAE는 비슷한 공간분포양상을 보인다. 가장 큰 오차를 보인 지점은 가장 북쪽에 위치한 지점 16(Hwaseo)으로, 두 가지 레이더 추정 강수에 대해서 동일하였다. 비슬산 강우레이더로부터 거리가 비교적 멀고(약 96 km), 관측지점의 고도가 높은 점(약 300 m)이 지점 16(Hwaseo)의 불확실성이 높은 원인 중 하나로 판단된다. 그러나, Fig. 8에서 보듯이 거리에 따라 레이더의 오차가 일정한 패턴을 보이지 않았으며, 비슷한 거리에서도 관측소 위치 별 nMAE가 상이하였다. 다만, nMAE가 0.15 이내로 비교적 높은 정확도를 갖는 지점(예를 들어, 지점 1(Hapcheon), 12(Daegu), 15(Changwon))은 레이더로부터의 거리 약 60 km, 고도 약 100 m 이내에 위치하는 것으로 확인되었다. 그러나, 이러한 요소가 레이더 및 지상 관측의 불확실도 감소의 필요 조건인지에 대해서는 향후 추가적인 비교분석 연구가 필요할 것으로 판단된다. Fig. 10은 레이더로부터의 거리와 관측지점의 고도, 두 가지 요소가 nMAE로 표현되는 정확도와와의 관계를 3차원 그림으로 도시한 것이다. Fig. 10(a), (b)의 JPOLE, CSU 알고리즘에 대한 결과에서 보듯이, 관측지점의 고도가 높고, 레이더로부터의 거리가 먼 곳에서 큰 오차를 갖지만, 일정한 상관관계를 보이지 않았다. 후속연구에서 분석 대상 기간을 확장하여, 레이더 추정 강수의 정확



**Fig. 8.** Comparison of nMAE of two QPE algorithms at locations of ground gauges.



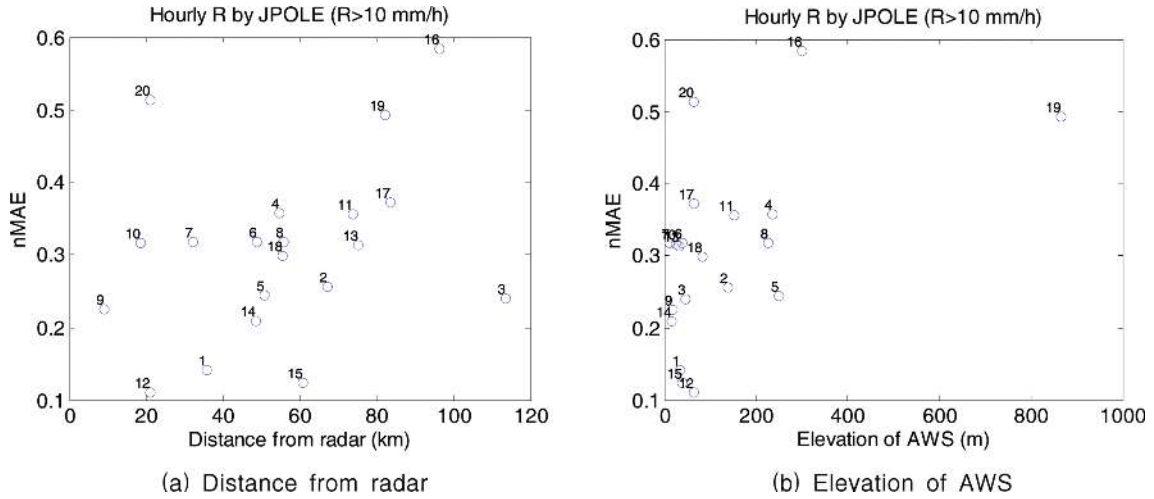


Fig. 9. Distribution of nMAE of JPOLE for varying distance from radar.

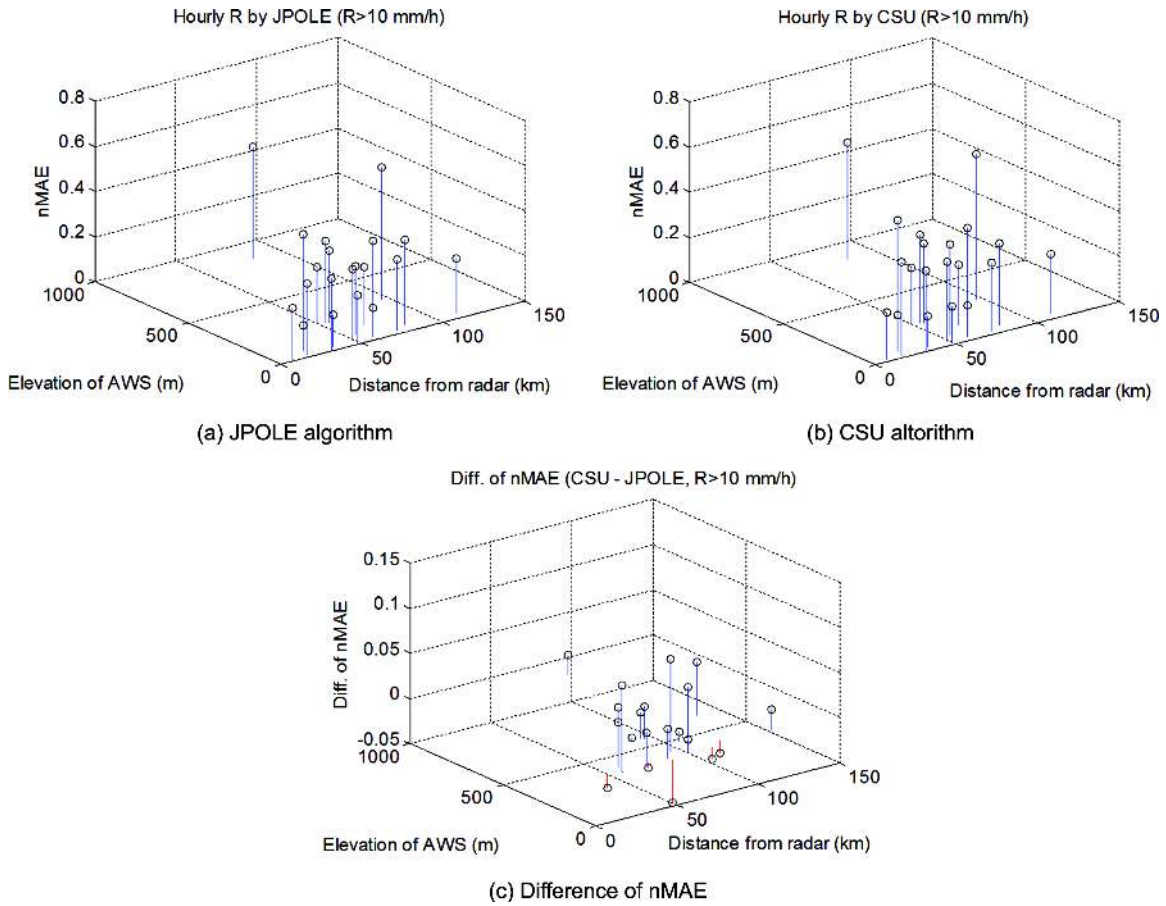


Fig. 10. Distribution of nMAE of two QPE algorithms for distance and elevation.

도가 공간적으로 불균일하게 발생하는지 추가 분석할 필요가 있으며, 분석 결과에 따라 지점별 선택적 보정이 가능할 것으로 판단된다. Fig. 10(c)는 CSU와 JPOLE에 대한 nMAE의 차이를 도시한 것으로, 양의 값일수록 JPOLE 알고리즘이 CSU보다 정확함을 의미한다. Fig. 10(c)에서 보듯이, 20개 지

점 중에서 4개 지점을 제외하고, 16개 지점에서 JPOLE 알고리즘이 CSU 알고리즘 보다 우수하였으나, 지점별 nMAE 정확도 차이는 최대 0.1 이내였다.

본 절의 연구결과는 다음과 같은 두 가지 측면에서 향후 레이더 관련 연구에서 고려될 수 있다. 첫째, 국내에서 가장 광

범위하게 사용되는 레이더 추정 강수의 보정 방법은  $G/R$ 비 (ground gauge rainfall/radar rainfall ratio)를 곱하여 평균 보정을 하는 것인데(e.g. Krajewski and Smith, 2002), 지상관측 지점별로 레이더 추정 강수의 정확도가 현격히 차이가 나는 경우,  $G/R$ 비를 통한 평균 보정은 국지적으로 추정 정확도를 감소시킬 수 있다는 점이다. Yoo and Yoon(2010)이 제시한 바와 같이, 단순  $G/R$ 비를 통한 평균 보정보다 자료의 지역적 오차 특성을 고려한 보정방법이 우수한 결과를 낼 수 있는 이유 또한 레이더 오차의 공간분포가 불균일한 점과 연관된 것으로 보인다. 둘째, 최근 레이더 보정을 위해 많이 쓰이고 있는 Kalman filtering(Chumchean *et al.*, 2006; Kim and Yoo, 2014)이나 variational method(Grecu and Krajewski, 2001)와 같은 자료동화(data assimilation) 기법의 적용을 위해서는 모형과 관측의 오차를 정량화해야하는데, 본 연구의 결과에 따르면, 지역별로 상이한 오차 상세화 기법 도입이 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 이중 편파 레이더 강수 추정의 대표적인 방법인 JPOLE와 CSU 알고리즘의 국내 강우레이더 자료에 대한 적용성 및 불확실성을 평가하였다. S밴드 이중 편파 레이더인 비슬산 강우레이더의 2012년 호우사상 관측자료에 대해 JPOLE와 CSU 알고리즘을 각각 적용하여 강수를 추정하고, 자동기상관측장비에 의한 지상 지상관측자료와 비교하여 일별 및 시간별 자료의 정확도를 평가하였다. 또한 레이더 추정 강수의 정확도를 지상 관측지점의 위치, 거리, 고도별로 분석하였다. 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

1. JPOLE 및 CSU 알고리즘 모두 표준화된 평균절대오차 (nMAE)를 기준으로 일별 강수에 대해 0.23, 시간별 강수 기준으로 0.35 이내의 비교적 정확한 강수량 추정 결과를 산출하였다.

2. 모든 정확도 평가 지표 및 기준에 대해서 JPOLE 알고리즘이 CSU 알고리즘에 비해 높은 정확도를 보였으며, 그 차이는 평균제곱근오차(RMSE)를 기준으로 50 mm/day 이상 일별 강수에 대해 5.5 mm(약 17%차이), 10 mm/hr 이상 시간별 강수에 대해 0.6 mm(약 8%차이)였다.

3. 관측소 위치 별 오차 분석 결과, 지상관측 지점이 레이더로부터 거리 60 km, 해발고도 100 m 이내의 지점에서 높은 정확도를 얻을 수 있었으나, 불확실성이 높은 지점의 위치는 일정한 경향을 찾기 어려웠다.

강수 추정 알고리즘은 레이더를 이용한 고해상도 시공간 강수자료 생산 및 홍수 해석 정확도 향상을 위해 핵심적인 요소이다. 본 연구에서는 JPOLE이 CSU 알고리즘에 비해 비교적 우수한 것으로 나타났으나, 향후 분석 대상기간을 확대하고, 두 알고리즘의 강수 강도별 세부 추정 방법의 오차 및 사용빈

도 등에 대한 연구를 수행하면, 보다 정량적인 분석이 가능할 것으로 판단된다. 또한 두 알고리즘의 매개변수는 국외 자료에 대해 산정된 값이므로, 국내에 적합한 매개변수 추정에 대한 연구가 함께 수행되어야 보다 정확한 알고리즘 개발 및 평가가 가능할 것으로 사료된다. 레이더 추정 강수의 정확도가 공간적으로 불균일하게 분포한다는 본 연구의 결과를 고려한다면, 향후 레이더 자료 보정이나 실시간 자료동화 기법 적용 시 지역별로 상이한 오차 상세화 기법 도입이 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(수문레이더 기반 홍수예정보 및 폭설 추정 플랫폼 개발) 및 국토교통부 물관리 연구사업(14AWMP-B079364-01)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 원고의 보완을 위해 조언을 주신 익명의 심사위원분들께 감사드립니다.

#### References

Ahn, S.R., Park, H.S., Han, M.S., and Kim, S.J. (2014) Applicability of Sobaek Radar Rain for Flood Routing of Chungju Dam Watershed, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 17, No. 1, pp. 129-143.

Anagnostou, M.N., Kalogiros, J., Anagnostou, E.N., Tarolli, M., Papadopoulou, A., and Borga, M. (2010) Performance Evaluation of High-resolution Rainfall Estimation by X-band Dual-polarization Radar for Flash Flood Applications in Mountainous Basins, *J. Hydrol.*, Vol. 394, pp.4-16.

Bae, D.H., Phoung, T.A., and Yoon, S.S. (2012) A Method to Evaluate the Radar Rainfall Accuracy for Hydrological Application, *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 12, pp. 1039-1052.

Borga, M. (2002) Accuracy of Radar Rainfall Estimates for Streamflow Simulation, *J. Hydrol.*, Vol. 267, pp. 26-39.

Bringi, V.N. and Chandrasekar, V. (2001) *Polarimetric Doppler Weather Radar. Principles and Applications*, Cambridge University Press, pp. 534-540.

Chumchean, S., Seed, A., and Sharma, A. (2006) Correcting of Real-time Radar Rainfall Bias using a Kalman Filtering Approach, *J. Hydrol.*, Vol. 317, pp. 123-137.

Cifelli, R., Chandrasekar, V., Lim, S., Kennedy, P.C., Wang, Y., and Rutledge, S.A. (2011) A New Dual-Polarization Radar Rainfall Algorithm: Application in Colorado Precipitation Events, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 28, pp. 352-364.

Collier, C.G. and Knowles, J.M. (1986) Accuracy of Rainfall Estimates by Radar, Part : Application for Short-term Flood Forecasting, *J. Hydrol.*, Vol. 83, pp. 237-249.

Gorgucci, E., Chandrasekar, V., and Baldini, L. (2006) Rainfall Estimation from X-band Dual Polarization Radar using Reflectivity and Differential Reflectivity, *Atmospheric Research*, Vol. 82, pp. 164-172.

- Greco, M. and Krajewski, W.F. (2001) Rainfall Forecasting using Variational Assimilation of Radar Data in Numerical Cloud Model, *Advances in Water Resources*, Vol. 24, pp. 213-224.
- Ham, D.H. and Hwang, S.H. (2014) Review of Landslide Forecast Standard Suitability by Analysing Landslide-inducing Rainfall, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 14, No. 3, pp. 299-310.
- Jeon, B.K., Lee, C.K., and Kim, Y.S. (2012) Evaluation of Rainfall Measurement Capability of Dual Polarization Radar, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 12, No. 2, pp. 215-224.
- Kim, G.S. and Kim, J.P. (2008) Development of a Short-term Rainfall Forecasting Model using Weather Radar Data, *Journal of Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 10, pp. 1023-1034.
- Kim, J.H. and Yoo, C.S. (2014) Using Extended Kalman Filter for Real-time Decision of Parameters of Z-R Relationship, *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 47, No. 2, pp. 119-133.
- Kim, Y.I., Kim, T.S., and Heo, J.H. (2009) Adjustment of the Mean Field Rainfall Bias by Clustering Technique, *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 8, pp. 659-671.
- Kim, K.J., Choi, J.H., and Yoo, C.S. (2008) Synthesis of Radar Measurements and Ground Measurements using the Successive Correction Method(SCM), *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 7, pp. 681-692.
- Kim, S.J., Kwon, Y.S., Lee, K.H., and Kim, H.S. (2010) Radar Rainfall Adjustment by Artificial Neural Network and Runoff Analysis, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 30, No. 2B, pp. 159-167.
- Kim, Y.S., Chang, K.H., Kim, B.S., and Kim, H.S. (2011) Decision of GIS Optimum Grid on Applying Distributed Rainfall-runoff Model with Radar Resolution, *Journal of Korean Wetlands Society*, Korean Wetlands Society, Vol. 13, No. 1, pp. 105-116.
- Krajewski, W.F. and Smith, J.A. (2002) Radar Hydrology: Rainfall Estimation, *Advances in Water Resources*, Vol. 25, pp. 1387-1394.
- Lee, C.K. (2013) Operation and Application of Observation Network of KLTMA Rainfall Radar, *Magazine. of IEEK*, IEEK, Vol. 40, No. 2, pp. 32-40.
- Lee, J.K., Kim, J.H., Park, J.S., and Kim, K.H. (2014) Application of Radar Rainfall Estimates using the Local Gauge Correction Method to Hydrologic Model, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 14, No. 4, pp. 67-78.
- Lim, J.H., Sung, J.H., Hwang, S.H., and Kim, B.S. (2013a) Flood Runoff Simulation using S-RAT Model and Radar Rainfall, *Journal of KOSHAM*, Vol. 13, No. 5, pp. 307-315.
- Lim, S., Cifelli, R., Chandrasekar, V., and Matrosov, S.Y. (2013b) Precipitation Classification and Quantification using X-Band Dual-Polarization Weather Radar: Application in the Hydrometeorology Testbed, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 30, pp. 2108-2120.
- Ministry of Land, Transportation, and Maritime Affairs (2011) *Development of Rainfall Estimation and Analysis Optimization System of the Bisl-San Rainfall Radar*.
- Noh, S.J., Choi, Y.S., Choi, C.K., and Kim, K.T. (2013) Parameter Estimation of a Distributed Hydrologic Model using Parallel PEST: Comparison of Impacts by Radar and Ground Rainfall Estimates, *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 11, pp. 1041-1052.
- Noh, S.J., Choi, S.W., Choi, Y.S., and Kim, K.T. (2014) Impact Assessment of Spatial Resolution of Radar Rainfall and a Distributed Hydrologic Model on Parameter Estimation, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 34, No. 5, pp. 1443-1454.
- Park, J.H. and Hur, Y.T. (2009) Flood Runoff Simulation using Physical Based Distributed Model for Imjin-River Basin, *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 1, pp. 51-60.
- Ryzhkov, A., Giangrande, S.E., and Schurr, T.J. (2005a) Rainfall Estimation with a Polarimetric Prototype of WSR-88D, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 44, pp. 502-515.
- Ryzhkov, A., Giangrande, S.E., Melnikov, V.M., and Schuur, T. (2005b) Calibration Issues of Dual-Polarization Radar Measurements, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 22, pp. 1138-1155.
- Seo, D.-J. (1998) Real-time Estimation of Rainfall Fields using Radar Rainfall and Rain Gauge Data, *J. Hydrol.*, Vol. 208, No. 1-2, pp. 37-52.
- Tabary, P., Boumahmoud, A., Andrieu, H., Thompson, R.J., Illingworth, A.J., Le Bouar, E., and Testud, J. (2011) Evaluation of Two "Integrated" Polarimetric Quantitative Precipitation Estimation (QPE) Algorithms at C-band, *J. Hydrol.*, Vol. 405, pp. 248-260.
- Thorndahl, S., Nielsen, J.E., and Rasmussen, M.R. (2014) Bias Adjustment and Advection Interpolation of Long-term High Resolution Radar Rainfall Series, *J. Hydrol.*, Vol. 508, pp. 214-226.
- Yoo, C.S. and Yoon, J.S. (2010) A Proposal of Quality Evaluation Methodology for Radar Data, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 30, No. 5B, pp. 429-435.
- Yoo, C.S., Park, C.S., and Yoon, J.S. (2011a) Decision of G/R Ratio for the Correction of Mean-Field Bias of Radar Rainfall and Linear Regression Problem, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 31, No. 5B, pp. 393-403.
- Yoo, C., Kim, J., Chung, J.H., and Yang, D. (2011b) Mean Field Bias Correction of the very-short-range-forecast Rainfall using the Kalman Filter, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. Vol. 11, No. 3, pp. 17-28.
- Yoo, C.S., Park, C.S., Yoon, J.S., Ha, E.H. (2011c) Regression Analysis of the Log-Normally Distributed Data and Mean Field Bias Correction of Radar Rainfall, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 31, No. 5B, pp. 431-438.
- Yoo, C.S., Yoon, J.S., Kim, B.S., and Ha, E.H. (2009) Evaluation of Spatially Disproportionate Rain Gauge Network for the Correction of Mean-Field Bias of Radar Rainfall: A Case Study of Ganghwa Rain Radar, *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 6, pp. 493-503.
- Yoo, C.S., Ha, E.H., Kim, B.S., Kim, K.J., and Choi, J.H. (2008)

Sampling Error of Areal Average Rainfall due to Radar Partial Coverage, *Journal of Korean Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 5, pp. 545-558.

Yoon, S.S., Bae, D.H., and Choi, Y.J. (2014a) Urban Inundation Forecasting using Predicted Radar Rainfall: Case Study, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 14, No. 3, pp. 117-126.

Yoon, J.S., Yoo, C.S., Choi, J.H., and Ku, J.M. (2014b) Comparison of VPR (Vertical Profile of Reflectivity) Models to Identi-

tify the Range Dependent Error in Radar Reflectivity, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 14, No. 4, pp. 79-92.

---

**Received** ■ September 26, 2014

**Revised** ■ September 29, 2014

**Accepted** ■ October 13, 2014