



레이더 강우량의 불확실성 수준 평가: 미국사례와의 비교 분석을 중심으로

Evaluation of the Uncertainty Level in Radar-Rainfall Technology in Korea: Focus on Comparative Analysis with the United States

노희성* · 이동률** · 황석환*** · 강나래****

Noh, Huiseong*, Lee, Dongryul**, Hwang, Sukhwan***, and Kang, Narae****

Abstract

Although there have been significant technological advances in radar technology in terms of electronics and computation, the impacts of overall radar-rainfall uncertainty, its factors, and the methods of its evaluation have not been presented clearly. Hence, this study estimated the radar rainfall for each radar-rainfall estimation algorithm ($R(Z_H)$, $R(Z_H, Z_{DR})$, $R(JPL)$) using data from the Biseulsan Rainfall Radar System (dual-polarization radar), which was first introduced in Korea. Then, this study compared the result with ground observation rainfall using radar performance statistical indicators and analyzed them. According to the result, the $R(Z_H, Z_{DR})$ algorithm sensitively reacted to the bias of differential reflectivity (Z_{DR}), an observation variable, which caused large variation in instrumental observation errors. When the composite algorithm ($R(JPL)$) was applied, most of the radar performance statistical indicators were improved, which demonstrated the effectiveness of the estimation variable from the dual-polarization radar. However, it was also found that it is necessary to develop algorithms and variable test methods suitable for the observation characteristics of Korean rainfall radars. In addition, the results of study were compared with those of previous studies in the United States and then reviewed to assess the level of Korean technology for uncertainty of rainfall data from the radar. The results showed a large spatial variability in data from the Korean radar in comparison to the results from the previous U.S. studies; there was also an improvement in the uncertainty of the radar-rainfall estimation. Therefore, the results of this study can be important for establishing the evaluation criteria regarding the uncertainty of radar-rainfall estimation and for contributing to the improvement in the uncertainty of radar-rainfall estimation.

Key words : Quantitative Radar-rainfall Estimation, Radar-rainfall Uncertainties, Radar Technical Level

요 지

레이더기술에 있어 전자, 전산 등의 측면에서 상당한 기술진보가 이루어졌음에도 불구하고 아직까지 총체적인 레이더강수 불확실성의 영향과 요인, 평가방법에 대한 명확한 결과 제시가 이루어지지 않고 있다. 본 연구에서는 국내 최초 도입된 비슬산 강우레이더시스템(이중편파) 자료를 이용하여 레이더강수 추정 알고리즘별($R(Z_H)$, $R(Z_H, Z_{DR})$, $R(JPL)$) 레이더강수량을 산정한 후 지상관측 강우량과 레이더성능 통계 지표를 이용하여 비교·분석하였다. $R(Z_H, Z_{DR})$ 은 관측변수인 차등반사도(Z_{DR})의 편이에 민감하게 반응하여 기기적인 관측오차의 변동이 크게 나타났다. 복합 알고리즘($R(JPL)$)을 적용한 경우 대부분의 레이더성능 통계지표에서 더 나은 값을 보여 이중편파레이더 산출변수의 효용성을 보여주었으나, 국내 강우레이더 관측 특성에 적합한 알고리즘 및 변수 검정 방법 개발이 필요함을 확인하였다. 또한, 레이더강수 자료의 불확실성에 대한 국내 기술수준 평가를 위해 미국의 선행연구와 본 연구를 비교·검토한 결과, 미국의 선행연구에 비해 국내 레이더자료의 공간 변동성이 크게 나타났으며 이중편파레이더 산출변수를 이용한 레이더강수 추정 값에서는 불확실성 측면에서 향상됨을 보였다. 본 연구결과는 레이더강수 추정 불확실성 평가를 위한 기준을 마련하고, 레이더강수 추정 불확실성을 개선하는데 중요한 자료가 될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 정량적 레이더강수 추정, 레이더강수 불확실성, 강우레이더 기술수준

*교신저자, 정회원, 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원(Tel: +82-31-910-0548, Fax: +82-31-910-0100, E-mail: huiseongnoh@kict.re.kr)
 Corresponding Author, Member, Senior Researcher, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT)

**정회원, 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 선임연구원

Member, Senior Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT)

***정회원, 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원

Member, Senior Researcher, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT)

****정회원, 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원

Member, Senior Researcher, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT)

1. 서론

1969년 국내 최초의 관악산 기상레이더의 도입 후, 레이더 강수 추정의 불확실성에도 불구하고 기상 및 수문분야에서는 레이더를 이용한 보다 정확한 강수량 추정기술에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있으며 레이더의 활용성 및 가능성에 대한 큰 기대를 가지고 있다. 그러나 보정(calibration), 감쇠(attenuation), 밝은 띠(bright band), 이상전파(anomalous propagation), 빔 차단(beam blockage), 지형에코(ground clutter)와 무작위 오차(random error), 레이더강수 추정 알고리즘의 가변성 등 레이더강수 추정과 관련된 불확실성의 수많은 요소들이 복잡하게 작용함에 따라 레이더강수 추정의 불확실성과 관련한 종합적 특장규명이 아직 이루어지지 않고 있으며, 이로 인하여 레이더강수 자료의 활용성 측면에서 많은 제약이 발생하고 있다. 그러나 최근 이중편파레이더를 활용함에 따라 레이더 강수 불확실성을 많이 감소할 수 있는 것으로 예상되고 있으며(Zrnić, 1996; Petersen et al., 1999; Zrnić and Ryzhkov, 1999; Bringi and Chandrasekar, 2001; Brandes et al., 2002, 2004), 국내에서도 2009년 비슬산 강우레이더를 시작으로 환경부 및 기상청에서 이중편파레이더로 레이더 네트워크를 구축 및 운영하고 있다.

이와 같이 국내 레이더 하드웨어 측면에서의 기술 및 인프라는 지속적으로 향상되고 있지만, 레이더강수 추정의 불확실성에 대한 연속성 있는 연구는 부족한 실정이다. 미국에서는 WSR-57 및 WSR-74S 레이더(1세대 레이더) 자료를 활용하여 기상레이더의 역량을 요약·정리하고 레이더강수량 추정의 불확실성을 정량적으로 분석하여 제시한 최초의 연구 중 하나인 Wilson and Brandes (1979)의 연구와, 약 30년 후 Wilson and Brandes (1979)의 연구를 기반으로 WSR-88D 레이더(2세대 레이더) 자료를 이용하여 레이더강수량 추정의 불확실성 개선정도를 비교·분석한 Krajewski et al. (2010)의 연구가 있다. 물론 국내에서도 레이더강수 불확실성 개선 및 평가에 대한 연구(Kim et al., 2005; Yoo et al., 2007; Bae et al., 2009; Lee, 2015)가 꾸준히 이루어지고 있으나, 앞서 살펴본 Wilson and Brandes (1979) 및 Krajewski et al. (2010)와 같이 과거와 현재 수준을 파악하기 위해 장기간의 많은 강우사상을 대상으로 동일한 레이더성능 통계를 활용한 논문은 거의 없다.

이에 본 연구의 목적은 불확실성의 원인들에 대한 오차구조 및 다양한 레이더강수 추정 방법의 개선이 아닌, 현재 국내 레이더기술 수준에서 품질관리 된 레이더강수 자료의 불확실성을 분석하고 국내 레이더기술 수준을 평가하는데 있다. 이를 위해서, Wilson and Brandes (1979)와 Krajewski et al. (2010)의 연구에서 분석한 비슷한 기간의 강우사상을 선정하고 동일한 레이더성능 통계를 사용하여, 레이더기술 선진국인 미국과의 기술수준 비교를 통하여 현재 국내 레이더강수 불확실성을 검토하였다.

본 논문의 구성은 2장에서 레이더강수 추정의 대표적인 알고리즘을 설명하고, 본 연구에서 사용한 레이더강수 추정 불확실성 평가 방법 대해 기술하였다. 분석에 사용된 자료의 형식 및 구성에 대해 3장에서 설명하였으며, 이번 연구의 결과를 4장에서 제시하였다. 마지막 5장에서는 주요한 요점을 요약·정리하고 결론을 정리하였다.

2. 연구 내용 및 방법

2.1 레이더 강수량 추정(Quantitative Rainfall Estimation, QPE) 알고리즘

레이더 강수량 추정(QPE) 알고리즘은 강수시스템(강우 유형) 및 지역, 레이더 종류(밴드 등)에 따라 매우 다양하다. 2009년 비슬산 강우레이더를 시작으로 국내에 도입 및 운영되고 있는 이중편파레이더에서는 기존 단일편파레이더의 강수량 추정 시 사용되는 수평반사도(reflectivity, Z_H)이외에 차등반사도(differential reflectivity, Z_{DR}), 차등위상차(differential phase, ϕ_{DP}), 비차등위상차(specific differential phase, K_{DP}), 상관계수(correlation coefficient, ρ_{HV}) 등의 자료를 생산하고 이를 이용하여 강우량을 추정할 수 있다.

이중편파레이더에서 생산되는 다양한 관측변수들 간의 관계를 이용하여 $R(Z_H)$, $R(Z_H, Z_{DR})$, $R(Z_{DR}, K_{DP})$, $R(K_{DP})$ 형태의 조건별 다양한 레이더 강수량 추정 알고리즘이 개발되어 활용되고 있다. 각 알고리즘에서 도출된 매개변수는 많은 연구에서 우적 크기 분포(Drop Size Distribution, DSD)와 강수입자 모형에 대한 이론 및 실험을 통해 제시되었으며(Marshall and Palmer, 1948; Chandrasekar et al., 1990; Gorgucci et al., 1999; Bringi and Chandrasekar, 2001; Brandes et al., 2002; Bringi et al., 2003; Ryzhkov et al., 2005; Jaffrain and Berne, 2012), 레이더 강수량 추정 결과에 매우 민감한 영향을 미친다.

Eqs. (1)-(6)은 레이더 관련 기존 연구들에서 일반적으로 레이더강수 추정 시 적용 및 분석되고 있는 가장 대표적인 레이더 강수량 추정 알고리즘이다.

$$R(Z_H) = 3.65 \times 10^{-2} \times Z_H^{0.625} \tag{1}$$

$$R(Z_H) = 1.70 \times 10^{-2} \times Z_H^{0.714} \tag{2}$$

$$R(Z_H, Z_{DR}) = 0.0067 \times Z_H^{0.927} \times Z_{DR}^{3.43} \tag{3}$$

$$R(Z_H, Z_{DR}) = 0.00746 \times Z_H^{0.945} \times Z_{DR}^{4.76} \tag{4}$$

$$R(Z_H, Z_{DR}, K_{DP}): \text{JPOLE} \tag{5}$$

$$\bullet R(Z_H) = 1.70 \times 10^{-2} \times Z_H^{0.714} \tag{5a}$$

$$\bullet R(K_{DP}) = 44.0 K_{DP}^{0.822} \text{sign}(K_{DP}) \tag{5b}$$

$$\begin{aligned}
&\text{if } R(Z_H) < 6 \text{ mm/h: } R = \overline{R(Z_H)} / f_1(\overline{Z_{DR}}) \\
&\text{if } 6 \leq R(Z_H) < 50 \text{ mm/h: } R = \overline{R(K_{DP})} / f_2(\overline{Z_{DR}}) \\
&\text{if } R(Z_H) \geq 50 \text{ mm/h: } R = \overline{R(K_{DP})} \\
&(R(Z_H) = 1.70 \times 10^{-2} \times Z_H^{0.714}, f_1(\overline{Z_{DR}}) = 0.4 + 5.0 \overline{Z_{DR}}^{-1^{1.3}}, \\
&f_2(\overline{Z_{DR}}) = 0.4 + 3.5 \overline{Z_{DR}}^{-1^{1.7}}, \overline{Z_{DR}} = 10^{0.1 \overline{Z_{DR}}(dB)})
\end{aligned}$$

$$R(Z_H, Z_{DR}, K_{DP}): \text{CSU-HIDRO} \quad (6)$$

$$R(Z_H) = 0.0170(Z_H)^{0.7143} \quad (6a)$$

$$(K_{DP} < 0.3^\circ \text{ km}^{-1}, Z_H < 38 \text{ dBZ}, Z_{DR} < 0.5 \text{ dB}) \quad (6b)$$

$$R(Z_H, Z_{DR}) = 6.7 \times 10^{-3} (Z_H)^{0.927} 10^{(-0.343 Z_{DR})} \quad (6b)$$

$$(K_{DP} < 0.3^\circ \text{ km}^{-1}, Z_H < 38 \text{ dBZ}, Z_{DR} \geq 0.5 \text{ dB}) \quad (6c)$$

$$R(K_{DP}, Z_{DR}) = 90.3 (K_{DP})^{0.93} 10^{(-0.169 Z_{DR})} \quad (6c)$$

$$(K_{DP} \geq 0.3^\circ \text{ km}^{-1}, Z_H \geq 38 \text{ dBZ}, Z_{DR} \geq 0.5 \text{ dB}) \quad (6d)$$

$$R(K_{DP}) = 40.5 (K_{DP})^{0.85} \quad (6d)$$

$$(K_{DP} \geq 0.3^\circ \text{ km}^{-1}, Z_H \geq 38 \text{ dBZ}, Z_{DR} < 0.5 \text{ dB})$$

Eqs. (1)과 (2)는 수평반사도(Z_H)를 이용한 강수량 추정 알고리즘으로 단일편파 및 이중편파 레이더 모두 적용할 수 있다. Eq. (1)은 가장 널리 알려져 있는 강수량 추정 알고리즘으로 Marshall and Palmer (1948)에 의해 개발된 여름철 층운형 강우에 적용되는 알고리즘이며, Eq. (2)는 대류형 강우에 적용되는 알고리즘으로 미국의 NEXRAD (WSR-88D) 및 국내 현업에서 주로 사용되고 있는 대표적인 알고리즘이다. Eqs. (3)~(6)는 수평반사도(Z_H)와 차등반사도(Z_{DR}), 비차등위상차(K_{DP})를 이용한 합성 강수량 추정 알고리즘으로 Eq. (3)은 Bringi and Chandraseker (2001),

Eq. (4)는 Brandes et al. (2002)이 제시한 알고리즘이다. Eqs. (5)와 (6)은 Ryzhkov et al. (2005)의 정상류 상태 공기의 등강우입자 개념에 기초한 JPOLE 알고리즘과 이중편파레이더 변수값의 범위에 따라 강수량 산정식을 다르게 적용하는 CSU-HIDRO 알고리즘으로, 각각 미국 Oklahoma 지역과 Colorado 지역의 이중편파 레이더 관측자료를 기반으로 개발되었다.

환경부에서는 기존의 단일편파레이더에서 산출되는 편파변수(Z_H)를 이용한 강수량 추정방법 이외에 다양한 이중편파변수들의 조합으로 구성된 관계식을 복합적으로 이용하여 다양한 강수량 자료를 생산하고 있다. 이에 본 연구에서는 환경부에서 운영하고 있는 비슬산강우레이더를 대상으로 환경부 레이더시스템의 강수량추정과과정에서 적용되고 있는 강수량추정 관계식 Eqs. (2)와 (3) 및 (5)의 강수량추정 관계식을 이용하여 추정된 강수량과 지상관측 강수량의 비교·분석을 통해 레이더자료의 불확실성을 검토하고자 한다.

2.2 레이더강수량 추정 불확실성 평가 방법

본 연구에서는 1절에서 언급한 바와 같이 Wilson and Brandes (1979) 및 Krajewski et al. (2010)의 연구와 비교를 위하여, 지상관측 강수량과 레이더 강수량추정 알고리즘으로 산출된 레이더 강수량 자료를 이용하여 Table 1과 같은 레이더성능 통계를 이용하여 불확실성을 평가하였다.

레이더성능 통계에 활용된 지표로는 지점강수량 측정값의 평균값(\bar{G}), 지점강수량에 해당하는 위치의 레이더강수량 추정값의 평균값(\bar{R}), 지점강수량 측정값과 레이더 강수량

Table 1. Radar Performance Statistics Considered in This Study

	Equation	Radar performance Statistics
①	$\bar{G} = \frac{\sum_{i=1}^N G_i}{N}$	Rain gauge averages
②	$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^N R_i}{N}$	Radar-rainfall estimate averages
③	$E[G/R] = \frac{\sum_{i=1}^N G_i}{\sum_{i=1}^N R_i}$	Ratio between rain gauge and radar accumulations
④	$CV = 100 \times \frac{\sigma[G/R]}{E[G/R]}$	Relative dispersion about $E[G/R]$ (%)
⑤	$100 \times \frac{\sum_{i=1}^N \left \frac{G_i - R_i}{G_i} \right }{N}$	Average difference
⑥	$100 \times \frac{\sum_{i=1}^N \left \frac{G_i - R_i \times E[G/R]}{G_i} \right }{N}$	Average difference (storm bias removed)

N : The number of gauges available during a particular event

G_i and R_i : The storm total rainfall accumulation values for the i th rain gauge measurement and the corresponding radar-rainfall estimate

$\sigma[G/R]$: The standard deviation of the ratios between rain gauge measurements G and radar-rainfall estimates R

추정값 사이의 평균 비율을 나타내는 평균 G/R 비($E(G/R)$), G/R 비의 상대표준편차, 지점강우량 추정값과 레이더강우량 추정값의 평균편차, 레이더강우의 편의를 보정(G/R 비를 이용한 bias 보정)한 평균편차를 적용하였다. Table 1은 본 연구에 활용된 레이더성능 통계를 정리한 것이다.

3. 분석 자료 및 강우사상

본 연구에서는 레이더 자료를 이용한 정량적 강수량 추정의 불확실성을 검토하기 위하여 비슬산 S-밴드 이중편파레이더에서 산출된 자료(PPI: 0.8°)와 관측영역 내 환경부에서 운영·관리하고 있는 지상강우자료(T/M: Telemeter)를 이용하였다. 비슬산 강우레이더는 2009년 6월, 경북 청도군 각북면 비슬산 조화봉(EL. 1,057 m)에 설치되어 국내 최초 S-밴드 이중편파레이더 관측을 시작하였으며, 비슬산 이중편파레이더의 시스템 처리과정은 비기상에코 제거와 레이더 시스템적 관측오차로 인해 발생하는 Z-bias 보정 등의 품질관리과정, 강수량추정 관계식을 이용한 강수량추정과정, 지상우량계를 이용하여 G/R 비 내삽 방법을 이용한 후처리보정과정으로 크게 나눌 수 있다. 비슬산 이중편파레이더의 시스템은 현재 환경부(설치당시 국토교통부) 산하 한강홍수통제소에서 거리해상도 125 m, 반경 150 km, 매 2.5분마다 관측자료를 생산·운영하고 있으며, 자세한 제원은 Table 2와 같다.

Fig. 1은 비슬산 S-밴드 이중편파레이더의 위치 및 관측환경, 본 연구에서 이용한 관측영역 내 134개 지상강우 관측지점의 위치를 나타내었으며, 134개 지상강우 관측지점 중 본 연구에서 적용한 강우사상에 대하여 인접강우관측소와의 강수량 차이가 30% 이상이 나타나는 이상치 및 결측이 있는 경우 분석에서 제외하였다.

본 연구에서는 국내 이중편파레이더의 운영 초기 레이더 강수량추정의 불확실성 수준 분석을 위해 비슬산 S-밴드 이중편파레이더에서 비교적 안정적인 자료산출이 이루어진 2012년~2014년 동안의 장마전선, 태풍, 이동성 저기압 등 다양한 15개의 강우사상(총 26일, 578시간)을 분석대상으로 선정하였다(Table 3). 앞서 기술한 바와 같이 미국과의 비교를 위해 겨울철의 강우를 제외하고 자료기간 및 강우사상의 수를 비슷하게 선정하였다.

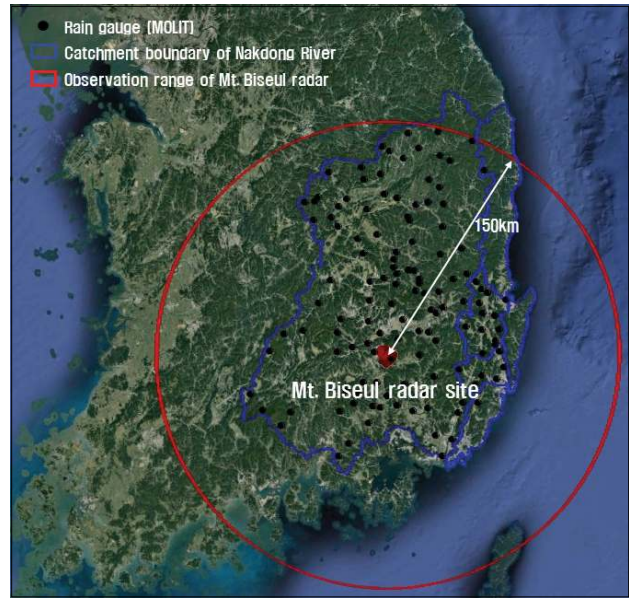


Fig. 1. Map with the Location of the Mt. Biseul Radar Site and Rain Gauges

4. 분석 결과 및 토의

4.1 분석 방법

본 연구에서는 레이더자료와 지상강우자료의 시간해상도 및 산출자료의 단위를 일치시키기 위하여, 비슬산 S-밴드 이중편파레이더에서 관측된 2.5분 간격의 레이더자료를 강우량으로 변환하고 4개의 자료를 누적하여 10분 강우량을 재생산 후, 10분 지상강우량과 비교·분석 하였다. 이와 같은 방법으로 각 강우사상에 대한 레이더 강수량 추정 알고리즘별 누적강우는 13,158~55,296개 자료를 이용하여 비교하였으며, 전체 강우사상에 대한 레이더 강수량 추정 알고리즘별 450,828개의 자료가 이용되었다. 해당 자료를 이용하여 2.2절에서 소개된 레이더성능 통계를 각 강우사상에 대하여 분석하고 레이더강수량의 불확실성을 검토하고, 미국의 레이더 기술수준과 비교하였다.

4.2 레이더 추정 강수량과 지상강수량의 비교

레이더 추정 강수량 산정을 위하여 레이더 산출변수 및 이를 활용한 레이더 강수량 추정 알고리즘 별 추정 강수량을

Table 2. Geographic and Operational Parameter Settings of Mt. Biseul Dual-polarimetric Radar

Type	Description	Type	Description
Longitude/Latitude	128.48°E, 36.96°N	Observation range	150 km
Elevation	1,074 m	Spatial resolution	125 m
Scan speed	3RPM	Temporal resolution	2.5 min
Volume scan angles	-0.5°, 0.0°, 0.5°, 0.8°, 1.2°, 1.6°	Beam width	0.95°

Table 3. Selected Events for Comparisons Between Radar and Rain Gauges

Event	Date (begin)	Date (end)	Duration (hr)	Number of gauges	\bar{G} (mm)	Types of Rainfall
1	2012/07/15/00:00	2012/07/15/17:00	17	129	37.38	Changma front
2	2012/08/12/00:00	2012/08/13/24:00	48	129	68.79	Atmospheric instability
3	2012/08/28/00:00	2012/08/30/24:00	72	128	67.75	Typhoon (Bolaven, Tenbin)
4	2012/09/08/00:00	2012/09/08/24:00	24	129	44.73	Trough aloft
5	2012/09/16/00:00	2012/09/17/16:00	40	129	164.60	Trough aloft, Typhoon (Sanba)
6	2013/05/27/00:00	2013/05/28/24:00	48	132	65.89	Migratory cyclone
7	2013/06/18/00:00	2013/06/19/24:00	48	132	71.95	Migratory cyclone
8	2013/07/04/00:00	2013/07/05/24:00	48	132	109.38	Changma front, Atmospheric instability
9	2013/09/14/00:00	2013/09/14/24:00	24	129	36.94	Atmospheric instability
10	2013/09/29/00:00	2013/09/30/24:00	48	132	37.07	Atmospheric instability
11	2014/06/22/13:00	2014/06/24/06:00	41	129	27.31	Changma front
12	2014/08/10/00:00	2014/08/10/24:00	24	128	23.06	Typhoon (Halong)
13	2014/08/24/00:00	2014/08/25/24:00	48	130	63.58	Cyclone
14	2014/09/24/00:00	2014/09/24/24:00	24	130	83.65	Extratropical cyclone
15	2014/10/21/00:00	2014/10/21/24:00	24	130	41.05	Cyclone development

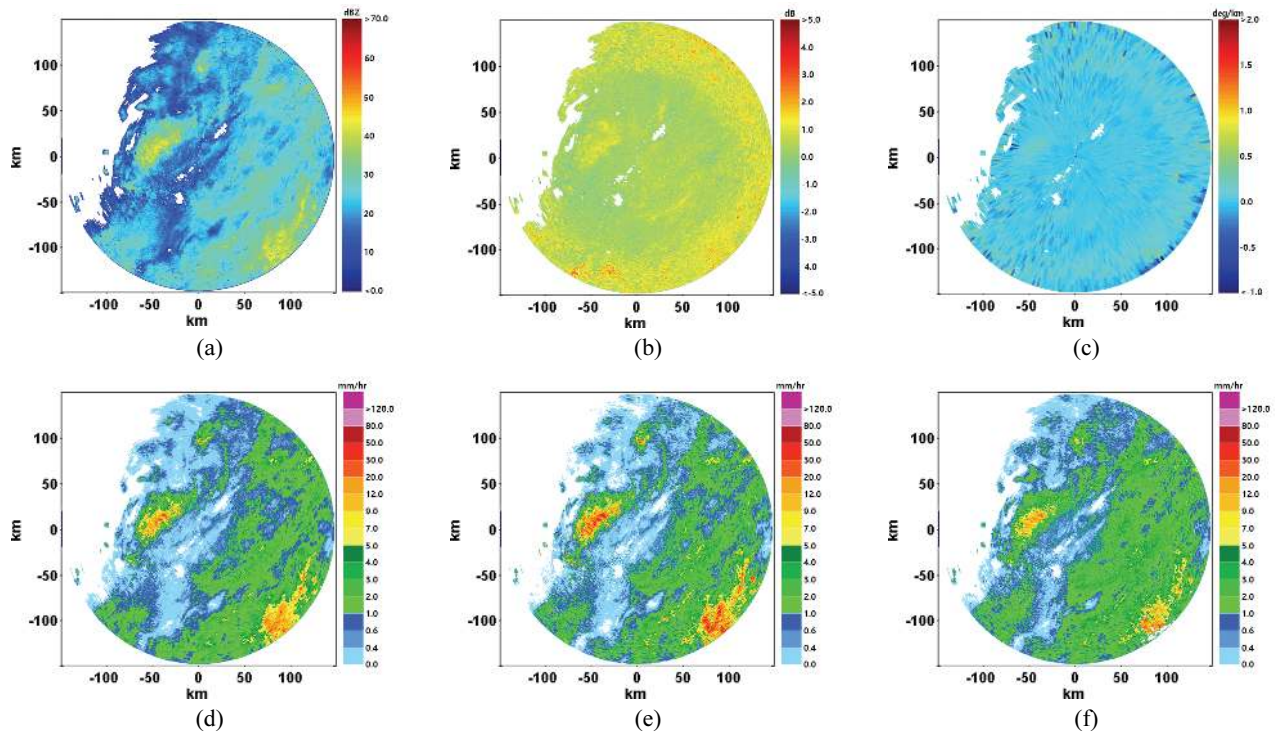


Fig. 2. PPI Products at a 0.8 Degree Elevation on 0400 KST 16 September 2012. (a) corrected reflectivity, (b) differential reflectivity, (c) specific differential phase, (d) radar rainfalls using $R(Z_H)$: Eq. (2), (e) radar Rainfalls using $R(Z_H, Z_{DR})$: Eq. (3), (f) radar Rainfalls using $R(JPL)$: Eq. (5)

산정하였으며, Fig. 2는 2012년 9월 16일 0400 KST에 대한 비슬산 S-밴드 이중편파레이더의 산출변수인 수평반사도 (Z_H), 차등반사도 (Z_{DR}), 비차등위상차 (K_{DP}) 및 각 레이더강수 추정 알고리즘별 ($R(Z_H)$, $R(Z_H, Z_{DR})$, $R(JPL)$) 레이더강수

변환 자료를 도시한 예이다.

Table 3의 15개 각 강우사상 및 전체 강우사상의 10분, 30분, 1시간, 전체 누적강우량 자료를 이용하여 레이더추정 강우량과 지상강우량을 비교·분석한 결과를 Figs. 3과 4와

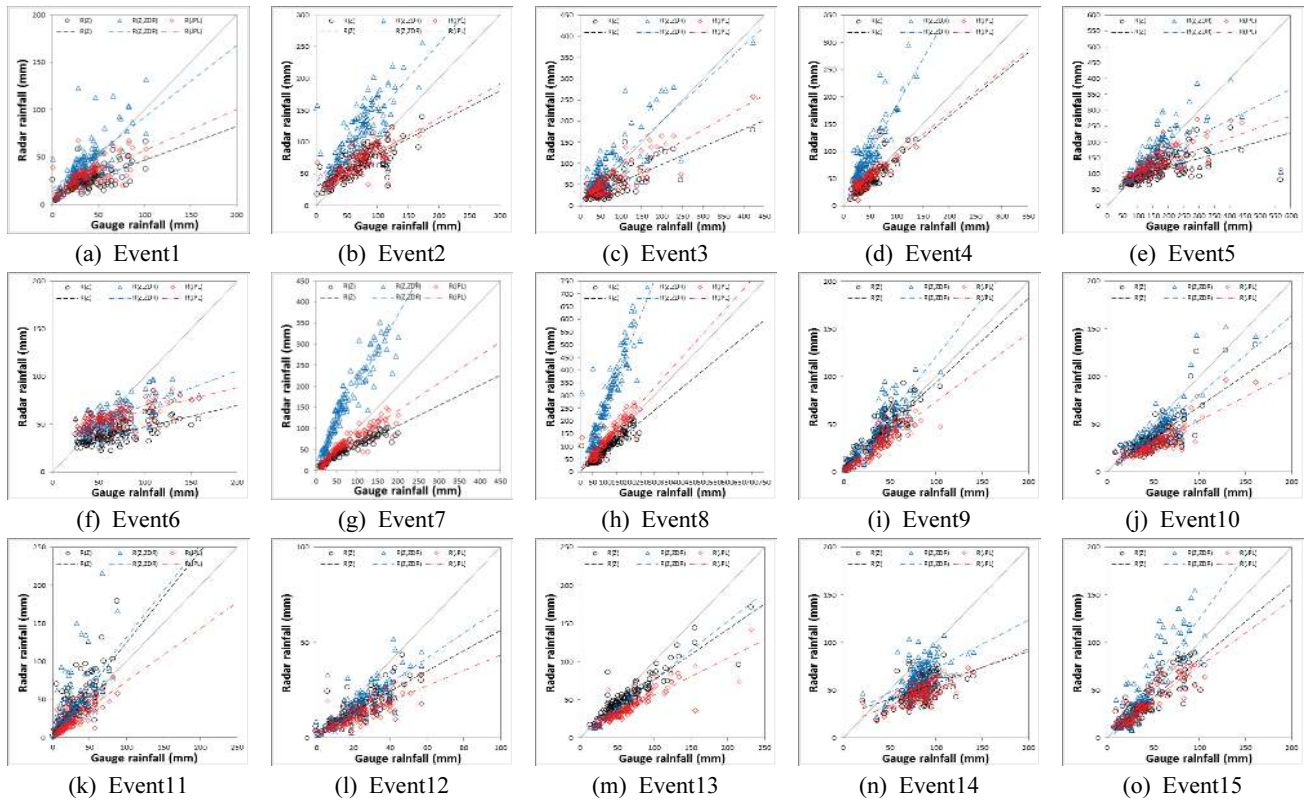


Fig. 3. Scatter Plot Comparison of Accumulated Rainfall with Gauge and Radar ($R(Z_H)$, $R(Z_H Z_{DR})$, $R(JPL)$)

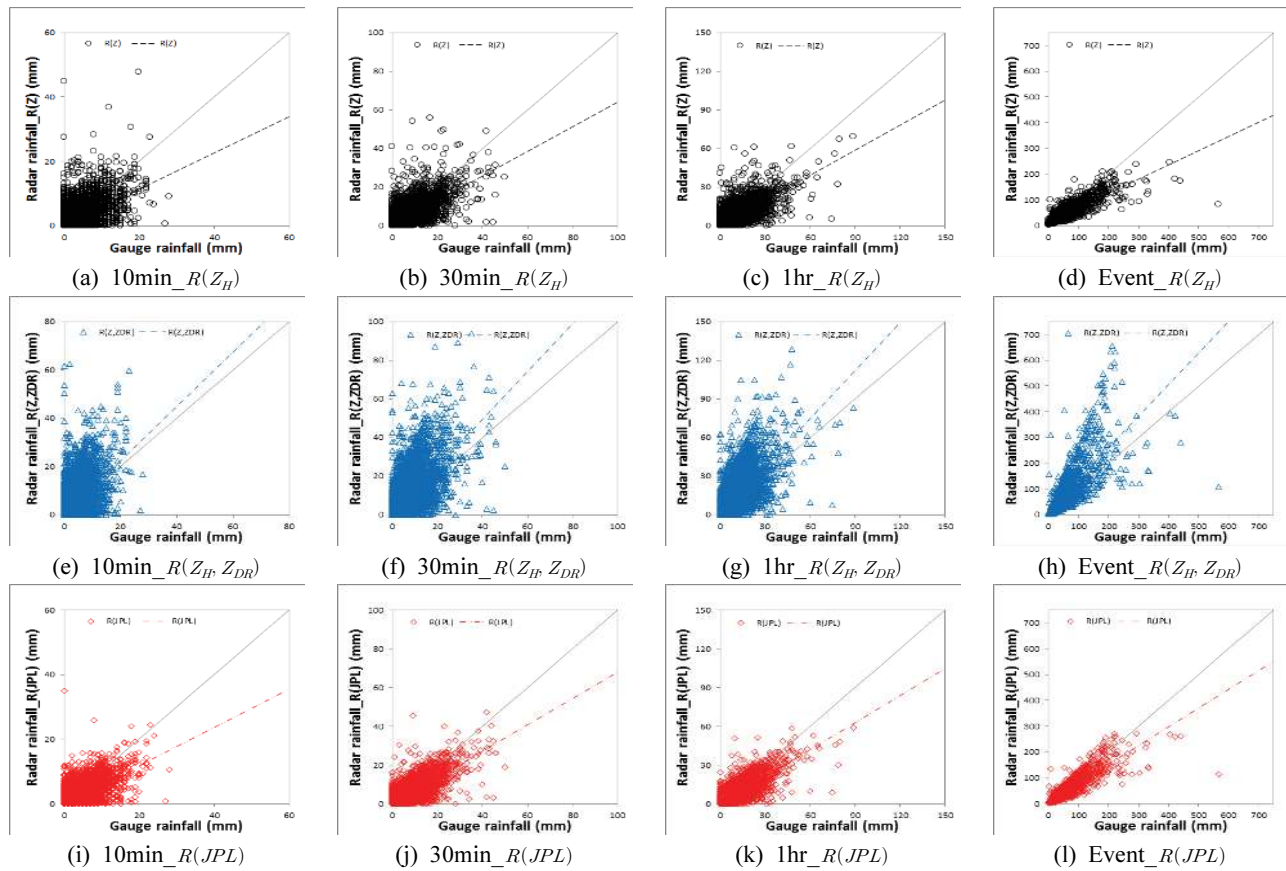


Fig. 4. Comparison of Radar-rainfall and Ground Rainfall (Whole rainfall event from 2012 to 2014)

같이 도시하였다. 또한, 국내 레이더강수량 추정치의 불확실성을 판단하고 현재 레이더기술 수준을 파악하기 위해 미국 레이더의 불확실성을 연구한 Wilson and Brandes (1979)와 Krajewski et al. (2010)의 연구를 기반으로, 2.2절에서 제시한 레이더성능 통계를 이용하여 비교·분석한 결과를 Table 4에 제시하였다.

Figs. 3과 4에서와 같이 $R(Z_H)$, $R(JPL)$ 알고리즘을 적용한 레이더강수량은 전반적으로 과소추정 되는 경향을 보이고 있지만, $R(Z_H, Z_{DR})$ 알고리즘을 적용한 레이더강수량은 패턴이 일정하게 나타나는 것이 아닌 강우의 발생 원인(유형)에 따라 과소·과대 추정되는 것을 확인할 수 있다. 이는 모든 강우유형에 최적의 레이더강우추정 알고리즘을 특정하기는 어려움이 있다는 것을 보여주는 것이라 할 수 있으며, 앞으로 레이더강수량의 불확실성을 해소하기 위해서는 국내에 적합한 알고리즘개선 및 개발이 필요하다고 할 수 있다.

Table 4에서 레이더 추정 강수량과 지상관측 강수량의 비율을 나타내는 $E(G/R)$ 값은 $R(Z_H)$, $R(Z_H, Z_{DR})$, $R(JPL)$ 알고리즘 별 각각 0.80 ~ 1.70 (평균 1.35), 0.43 ~ 1.42 (평균 0.93), 0.92 ~ 1.88 (평균 1.33) 범위의 값들을 보여준다. $E(G/R)$ 은 1을 기준으로 1이하의 값은 지상관측 강수량과 비교하여 레이더 추정 강수량이 과대 추정되는 것을 의미하

고 1이상의 값은 지상관측 강수량과 비교하여 레이더 추정 강수량이 과소 추정됨을 의미한다. 즉, $R(Z_H)$, $R(JPL)$ 은 과소 추정을 $R(Z_H, Z_{DR})$ 은 과대추정 되는 경향을 나타내고 있다.

G/R비의 변동계수(Relative dispersion about $E(G/R)$)에서 $R(Z_H)$ 는 18.31 ~ 49.74%(평균 33.78%), $R(Z_H, Z_{DR})$ 는 18.74 ~ 50.09% (34.58%), $R(JPL)$ 는 18.08 ~ 44.53% (32.22%)의 범위를 보여, $R(Z_H, Z_{DR})$ 이 가장 크게 나타나고 있으며, 레이더 추정 강수량과 지상관측 강수량 간의 평균 차이(Avg diff)를 보면 $R(Z_H)$ 는 19.31 ~ 60.53%(사상 평균 33.98%), $R(Z_H, Z_{DR})$ 는 19.11 ~ 171.80% (65.09%), $R(JPL)$ 는 17.18 ~ 55.27% (34.48%)의 범위를 보여 $R(Z_H, Z_{DR})$ 이 가장 큰 값을 보이고 있다. 마지막으로 편의를 보정한 평균 상대 편차(Avg diff($E(G/R)$ removed))에서는 $R(Z_H)$ 는 14.5 ~ 64.0% (사상 평균 31.1%), $R(Z_H, Z_{DR})$ 는 15.2 ~ 63.2% (33.0%), $R(JPL)$ 는 14.4 ~ 66.3% (30.1%)로 큰 공간적 편차를 나타내었다.

특히, 이중편파변수를 적용한 알고리즘 별 분석결과 $R(Z_H, Z_{DR})$ 은 $R(Z_H)$ 나 $R(JPL)$ 에 비해 평균 GR비 값은 상대적으로 양호하고, G/R비 평균 상대편차는 크게 나타나 기기적인 관측 오차의 변동이 큰 것(관측변수의 편의에 민감하게 반응)으로 판단되었다. 또한, $R(JPL)$ 은 $R(Z_H)$ 나 $R(Z_H, Z_{DR})$ 에

Table 4. Summary of the Comparisons Between Radar and Rain Gauges for the 15 Selected Storms

Event No.	\bar{G} (mm)	\bar{R} (mm)			$E(G/R)$			Relative dispersion about $E(G/R)$ (%)			Avg diff (%)			Avg diff ($E(G/R)$ removed) (%)		
		R (Z_H)	R (Z_H, Z_{DR})	R (JPL)	R (Z_H)	R (Z_H, Z_{DR})	R (JPL)	R (Z_H)	R (Z_H, Z_{DR})	R (JPL)	R (Z_H)	R (Z_H, Z_{DR})	R (JPL)	R (Z_H)	R (Z_H, Z_{DR})	R (JPL)
1	37.38	24.53	44.57	29.85	1.54	0.86	1.24	44.40	40.59	40.89	51.13	77.52	55.27	64.03	60.05	66.35
2	68.79	64.82	111.91	66.35	1.06	0.62	1.02	42.65	36.03	38.91	40.07	140.72	53.97	42.20	63.24	55.01
3	67.75	43.71	82.88	53.17	1.65	0.89	1.30	49.74	50.09	44.53	36.79	55.41	29.69	47.04	45.31	39.30
4	44.73	43.28	88.46	49.06	1.05	0.52	0.92	24.09	23.95	29.12	20.13	105.23	24.71	21.26	21.33	20.48
5	164.60	112.26	156.69	129.96	1.48	1.09	1.26	45.86	46.47	39.17	27.65	22.18	21.00	26.43	25.78	23.93
6	65.89	39.83	57.39	56.01	1.65	1.15	1.17	32.97	32.61	35.37	34.82	23.50	26.06	28.32	27.00	30.03
7	71.95	45.15	153.06	58.86	1.52	0.46	1.20	22.46	25.58	26.48	32.02	127.06	17.18	17.44	17.52	17.30
8	109.38	89.36	272.39	124.24	1.28	0.43	0.92	23.42	27.17	23.09	29.18	171.80	31.87	27.42	30.49	26.06
9	36.94	37.88	44.39	28.25	0.98	0.94	1.41	29.96	37.49	34.52	27.73	34.55	28.39	27.29	31.03	26.39
10	37.07	42.62	29.93	52.75	1.49	1.30	1.78	31.90	28.33	24.18	32.18	25.21	42.21	27.09	23.19	19.81
11	27.31	37.68	43.39	23.84	0.80	0.71	1.24	39.83	41.82	41.91	60.53	84.51	38.48	42.12	49.43	41.62
12	23.06	15.39	17.59	12.51	1.56	1.42	1.88	40.46	46.85	38.26	34.59	30.99	43.81	30.67	31.96	33.27
13	63.58	52.13	54.82	38.76	1.22	1.20	1.63	18.31	18.74	22.45	19.31	19.11	37.17	14.53	15.21	14.37
14	83.65	51.64	64.34	47.32	1.70	1.35	1.80	26.15	22.89	18.08	38.71	26.02	43.51	22.89	20.35	15.27
15	41.05	35.51	48.05	34.19	1.24	1.01	1.23	34.55	40.09	26.34	24.92	32.50	23.92	27.56	32.76	22.58
Average 15 cases:					1.35	0.93	1.33	33.78	34.58	32.22	33.98	65.09	34.48	31.09	32.98	30.12

비해 편의를 보정한 상대편차가 작게 나타나 지역, 호우 사상 등에 따른 관측 오차는 상대적으로 작게 나타나는 것으로 확인되었다.

4.3 미국 기상레이더와 국내 강우레이더 평가 비교 결과

Table 5는 미국의 선행 연구와 본 연구의 레이더강수 추정치의 불확실성을 비교한 레이더성능 통계값을 나타낸다. 여기서 한 가지 고려할 점은 Wilson and Brandes (1979) 및 Krajewski et al. (2010) 연구와 본 논문 간에는 몇 가지 확실한 차이가 존재한다는 것이다. 첫째로, 모두 S-밴드 레이더를 사용했지만 미국의 선행연구에서는 단일편파레이더(WSR-57, WSR-74S, WSR-88D)를 사용하고 본연구에서는 이중편파레이더를 사용하여 레이더의 기술(빔폭, 안테나의 민감도 등)이 다르다는 것이다. 둘째로, 미국에서는 특정(집중) 관측영역에 대해 $R(Z_H)$ 알고리즘 이용하였으나, 본 연구에서는 관측영역 전체에 대해 $R(Z_H)$, $R(Z_H, Z_{DR})$, $R(JPL)$ 알고리즘 이용했다는 것이다. 마지막으로, 각 연구에서 적용된 강우사상(기간, 강우유형 등)이 상이하다. 이러한 차이는 분석결과에 영향을 미칠 수 있지만, 레이더기술 수준의 발전 및 연구특성을 고려한 정성적인 의미에서 해석을 통해 유의미한 결과를 도출할 수 있다.

Table 5에서 레이더 추정 강수량과 지상관측 강수량의 비율을 나타내는 $E(G/R)$ 값을 보면 $R(Z_H)$ 알고리즘을 이용한 경우, 본 연구에서는 각 알고리즘별 평균 1.35로 미국의 1.04 (Wilson and Brandes, 1979) 및 0.99 (Krajewski et al., 2010)에 비해 크게 나타나며 상대적으로 과소추정되고 있음을 알 수 있다. G/R비의 변동계수에서는 미국의 선행 연구결과보다 본 연구의 변동계수가 다소 크게 나타나고 있으며, 레이더 추정 강수량과 지상관측 강수량 간의 평균 차이 및 편의를 보정한 평균 상대편차의 결과 값은 미국의 선행 연구에 비해 본 연구의 기기적인 관측오차는 작으나 지역, 호우 사상 등에

따른 관측오차는 본 연구가 크게 나타나는 것으로 판단된다. Wilson and Brandes (1979)의 연구보다는 Krajewski et al. (2010)의 연구결과가, 미국의 두 연구결과보다는 본 연구결과가 레이더강수 추정 불확실성 측면에서 전반적인 향상을 보였다. 하지만, 레이더강수 추정 불확실성 평가에 대한 방법이 아직까지 제시된 바 없으며, 이상치 제거 및 자료의 통계방법의 표준화, 복합특성(지속기간, 관측반경, 강우강도 등)을 반영한 명확한 레이더강수 추정 불확실성 평가를 위한 기준(통계값, 비교시간 등)을 적용할 수 있는 방안이 수립되어야 통계적 유의미성이 더 확보될 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 최근 국내 레이더기술, 특히 비슬산 이중편파레이더 도입(2009년) 후 레이더강수 추정 불확실성에 대한 평가를 실시하였다. 이를 위해 비슬산 강우레이더시스템에서 비교적 안정적인 자료가 산출된 2012년~2014년 사이의 15개 강우사상을 선정하고, 비슬산레이더 및 지상강우관측(134개 지점)자료를 구축하여 분석하였다. 또한, Wilson and Brandes (1979) 및 Krajewski et al. (2010)이 수행한 미국의 레이더강수 추정 불확실성에 대한 선행연구와 비교·검토를 통해 국내 레이더기술 수준에 대한 평가와 분석을 실시하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

우선, 각 레이더강수 추정 알고리즘별($R(Z_H)$, $R(Z_H, Z_{DR})$, $R(JPL)$) 레이더 추정 강수량과 지상관측 강수량의 비교 결과에서 이중편파변수를 이용한 알고리즘 $R(Z_H, Z_{DR})$ 은 $R(Z_H)$ 나 $R(JPL)$ 에 비해 평균 G/R비는 상대적으로 양호한 값으로 보이지만, G/R비 평균 상대편차는 크게 나타나고 있으며 이는 관측변수의 편이에 민감하게 반응하여 기기적인 관측 오차의 변동이 큰 것으로 판단된다. 또한, $R(JPL)$ 은 $R(Z_H)$ 나 $R(Z_H, Z_{DR})$ 에 비하여 편의를 보정한 상대편차가 작게 나타나 지역, 호우 사상 등에 따른 관측 오차는 상대적으로 작게

Table 5. Comparison of the Analysis of Each Uncertainty of US Radar-rainfall and Korean Radar-rainfall

Country	Data analysis period	Type of radar	QPE algorithm	$E(G/R)$	Relative dispersion about $E(G/R)$ (%)	Avg diff (%)	Avg diff ($E(G/R)$ removed) (%)
U.S.A	1974~1975	WSR-57, WSR-74S	$R(Z_H)$: Eq. (1)	0.41~2.41 (1.04)	10~46% (30.0)	30~160% (63.0)	8.0~42.0% (24.0)
	1998~2003	WSR-88D	$R(Z_H)$: Eq. (2)	0.58~1.66 (0.99)	15~45% (25.5)	15~91% (42.0)	11.9~44.7% (21.3)
South Korea	2012~2014	BSL (Dual-pol)	$R(Z_H)$: Eq. (2)	0.80~1.70 (1.35)	18~50% (33.8)	19~60% (34.0)	14.5~64.0% (31.1)
			$R(Z_H, Z_{DR})$: Eq. (3)	0.43~1.35 (0.93)	19~50% (34.6)	19~172% (65.1)	15.2~63.2% (33.0)
			$R(JPL)$: Eq. (5)	0.92~1.80 (1.33)	18~44% (32.2)	17~55% (34.5)	14.4~66.3% (30.1)

나타나는 것을 확인하였으며, 이중편파레이더 산출변수의 효용성을 보여주었다.

둘째로, 미국 기상레이더와 국내 강우레이더 평가 비교 결과 미국보다 우리나라 레이더자료의 공간 변동성이 크게 나타났다. 전반적으로 Wilson and Brandes (1979)의 연구보다는 Krajewski et al. (2010)의 연구결과가, 미국의 두 연구결과보다는 본 연구결과가 레이더강수 추정 불확실성 측면에서 향상된 값을 보였지만, 레이더기술 수준의 발전과 이중편파레이더의 운영측면을 고려하면 괄목할 만한 불확실성 개선효과를 보이지는 못하였다. 물론 미국의 두 연구와 본 연구의 차이를 인정하더라도 레이더 변수의 특성 분석을 통한 국내 강우레이더 관측 특성에 적합한 알고리즘 및 변수 검정 방법 개발이 필요함을 확인하였다.

기상 및 강우레이더에 대한 관심과 활용성 측면이 강조되고 연구도 활발히 이루어지고 있으나, 국내뿐만 아니라 국외사례를 살펴보더라도 레이더강수 추정의 불확실성과 관련한 종합적 특징규명이 아직 이루어지지 않고 있다. 본 연구가 레이더강수 추정의 불확실성을 일반화하기에는 어려운 측면이 있다. 그러나 본 연구와 같이 장기간의 자료와 다양한 강우사상 등을 적용하여 불확실성을 분석한 연구는 레이더강수 추정 불확실성 평가를 위한 기준 수립에 좋은 기초자료가 될 수 있을 것이다. 또한, 국내 강우 및 기상레이더 네트워크로의 연구 확장 및 5년 후, 10년 후 국내 레이더기술 발전 및 불확실성에 대한 연구가 지속적으로 필요할 것이다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물관리연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (RE201901039).

References

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*, Vol. 42, No. 12, pp. 1039-1052.

Brandes, E.A., Zhang, G., and Vivekanandan, J. (2002). Experiments in rainfall estimation with a polarimetric radar in a subtropical environment. *J. Appl. Meteor.*, AMS, Vol. 41, No. 6, pp. 674-685.

Brandes, E.A., Zhang, G., and Vivekanandan, J. (2004). Comparison of polarimetric radar drop size distribution retrieval algorithms. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, AMS, Vol. 21, pp. 584-598.

Bringi, V.N., and Chandrasekar, V. (2001). *Polarimetric*

doppler weather radar: Principles and applications. New York: Cambridge University Press.

Bringi, V.N., Chandrasekar, V., and Hubbert, J. (2003). Raindrop size distribution in different climatic regimes from disdrometer and dual-polarized radar analysis. *J. Atmos. Sci.*, AMS, Vol. 60, No. 2, pp. 354-365.

Chandrasekar, V., Bring, V.N., Balakrishana, N., and Zrnić, D.S. (1990). Error structure of multiparameter radar and surface measurements of rainfall. Part III: Specific differential phase. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, AMS, Vol. 7, No. 5, pp. 621-629.

Gorgucci, E., Scarchilli, G., and Chandrasekar, V. (1999). A procedure to calibrate multiparameter weather radar using properties of the rain medium. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 37, No. 1, pp. 269-276.

Jaffrain, J., and Berne, A. (2012). Influence of the subgrid variability of the raindrop size distribution on radar rainfall estimators. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, AMS, Vol. 51, No. 4, pp. 780-785.

Krajewski, W.F., Villarini, G., and Smith, J.A. (2010). Radar-rainfall uncertainties: Where are we after thirty years of effort?" *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 91, No. 1, pp. 87-94.

Kim, J.H., Lee, K.D., and Bae, D.H. (2005). Hydrologic utilization of radar-derived rainfall (II): Uncertainty analysis. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 12, pp. 1051-1060.

Lee, J. K. (2015). Uncertainty analysis of quantitative radar rainfall estimation using the maximum entropy. *Atmosphere*, Korean Meteorological Society, Vol. 25, No. 3, pp. 511-520.

Marshall, J. S., and Palmer, W.McK. (1948). The distribution of raindrops with size. *J. Meteor.*, Vol. 5, No. 4, pp. 165-166.

Petersen, W.A., Carey, L.D., Rutledge, S.A., Knivel, J.C., Doesken, N.J., Johnson, R.H., et al. (1999). Mesoscale and radar observations of the Fort Collins flash flood of 28 July 1997. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 80, No. 2, pp. 191-216.

Ryzhkov, A., Giangrande, S.E., and Schurr, T.J. (2005). Rainfall estimation with a polarimetric prototype of WSR-88D. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 44, No. 4, pp. 502-515.

Wilson, J.W., and Brandes, E.A. (1979). Radar measurement of rainfall—A summary. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 60, No. 9, pp. 1048-1060.

Yoo, C., Kim, B., Kim, K., and Choi, J. (2007). On ground-truth

designs of radar rainfall using rain gauge rainfall. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 9, pp. 743-754.

Zrnić, D.S. (1996). Weather radar polarimetry-trends toward operational applications. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 77, No. 7, pp. 1529-1534.

Zrnić, D.S., and Ryzhkov, A.V. (1999). Polarimetry for weather

surveillance radars. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 80, No. 3, pp. 389-406.

Received ■ July 12, 2018

Revised ■ July 19, 2018

Accepted ■ July 27, 2018