

## 분포형 비차등위상차를 이용한 S-밴드 이중편파레이더의 정량적 강우 추정

### Quantitative Rainfall Estimation for S-band Dual Polarization Radar using Distributed Specific Differential Phase

이 건 행\* / 임 상 훈\*\* / 장 봉 주\*\*\* / 이 동 루\*\*\*\*

Lee, Keon-Haeng / Lim, Sanghun / Jang, Bong-Joo / Lee, Dong-Ryul

#### Abstract

One of main benefits of a dual polarization radar is improvement of quantitative rainfall estimation. In this paper, performance of two representative rainfall estimation methods for a dual polarization radar, JPOLE and CSU algorithms, have been compared by using data from a MOLIT S-band dual polarization radar. In addition, this paper presents evaluation of specific differential phase ( $K_{dp}$ ) retrieval algorithm proposed by Lim et al. (2013). Current  $K_{dp}$  retrieval methods are based on range filtering technique or regression analysis. However, these methods can result in underestimating peak  $K_{dp}$  or negative values in convective regions, and fluctuated  $K_{dp}$  in low rain rate regions. To resolve these problems, this study applied the  $K_{dp}$  distribution method suggested by Lim et al. (2013) and evaluated by adopting new  $K_{dp}$  to JPOLE and CSU algorithms. Data were obtained from the Mt. Biseul radar of MOLIT for two rainfall events in 2012. Results of evaluation showed improvement of the peak  $K_{dp}$  and did not show fluctuation and negative  $K_{dp}$  values. Also, in heavy rain (daily rainfall > 80 mm), accumulated daily rainfall using new  $K_{dp}$  was closer to AWS observation data than that using legacy  $K_{dp}$ , but in light rain (daily rainfall < 80 mm), improvement was insignificant, because  $K_{dp}$  is used mostly in case of heavy rain rate of quantitative rainfall estimation algorithm.

**Keywords** : dual polarization radar, specific differential phase, quantitative rainfall estimation

#### 요 지

이중편파레이더는 강우입자의 모양, 크기, 위상, 방향에 대한 정보를 제공해줌으로써 단일편파레이더보다 정확한 정량적 강우 추정에 장점이 있다. 본 연구에서는 대표적인 이중편파레이더 강우 추정 알고리즘인 JPOLE 알고리즘과 CSU 알고리즘을 이용하여 강우량을 산정·비교하였다. 이 두 알고리즘은 강우의 크기에 따라 반사도, 차등반사도, 비차등위상차를 각각 이용하거나 조합하여 강우량을 계산한다. 비차등위상차는 강우입자의 모양과 분포밀도에 대한 정보를 주는 차등위상차에 필터링이나 회귀분석기법을 이용하여 계산되는데, 대류성 강우 지역에서는 비차등위상차의 침투값이 과소 추정되거나 음의 값을 보일 수 있으며, 약한 강우지역에서는 진동하기도 한다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하고자 Lim et al. (2013)에서 제안된 새로운 분포형 비차등위상차 산정방법의 이용을 제안하였다. 2012년도의 두 강우사상에 대한 국토교통부의 비출산 레이더 자료를 이용하여 분포형 비차등위상차를 산정한 후 강우 추정 알고리즘에 적용하였다. 산정된 분포형 비차등위상차는 침투값이 개선되었으며, 크게 진동하거나 음의 값이 산정되지 않았다. 이를 이용하여 추정된 강우량에 있어서는 일강우량 80mm 이상의 강한 강우에 대해 일강우량의 누적값이 AWS 관측값에 가깝게 개선되는 것을 확인하였으며 80mm 이하의 약한 강우에서는 개선 정도가 미약하였다. 이는 강우 추정 알고리즘에서 강우강도가 높은 경우에 비차등위상차가 사용되고, 낮은 경우에는 반사도와 차등반사도가 사용되기 때문인 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 향후 이중편파레이더를 이용한 강우량 추정의 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어** : 이중편파레이더, 비차등위상차, 정량적 강우 추정

\* 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 박사후연구원 (e-mail: leeggun@kict.re.kr)

Post-Doctor, Department of Hydro Science and Engineering, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 411-712, Korea

\*\* 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 연구위원 (e-mail: slim@kict.re.kr, Tel: 82-31-9100-373)

Corresponding Author, Research Fellow, Department of Hydro Science and Engineering, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 411-712, Korea

\*\*\* 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 박사후연구원 (e-mail: roachbj@kict.re.kr)

Post-Doctor, Department of Hydro Science and Engineering, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 411-712, Korea

\*\*\*\* 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 선임연구위원 (e-mail: dryi@kict.re.kr)

Senior Research Fellow, Department of Hydro Science and Engineering, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 411-712, Korea

## 1. 서론

레이더는 강우에 대한 정보를 실시간으로 제공할 수 있을 뿐만 아니라, 강우의 공간 분포에 대한 정보를 제공해 줌으로써 보다 정확한 강우량을 추정하는데 도움을 준다. 또한 이러한 정보는 시공간적으로 높은 해상도로 제공되어 도시홍수나 돌발홍수와 같이 빠르게 발생하는 홍수를 예측하는데 유용하게 활용할 수 있다. 그러나 레이더를 이용한 강우의 추정은 레이더 시스템의 보정, 신호 감쇠, 공간적 외삽의 문제와 정량적 강우량 추정(Quantitative Rainfall Estimation, QRE) 알고리즘, 레이더 변수들의 불확실성으로 인해 그 활용에 제한이 있는 것이 사실이다(Cifelli et al., 2011). 단일편파레이더에 있어서 강우량 추정은 레이더 신호의 반사도(reflectivity,  $Z$ )와 강우강도(rainfall rate,  $R$ )의 관계에 의해 이루어져 왔다. 그러나 이 관계는 강우 구름내 혹은 강우 구름에서 다른 강우 구름으로 전이될 때 변하게 되는 강우 입자크기의 분포(Drop Size Distribution, DSD)에 의존하기 때문에 강우의 종류에 따라 크게 달라질 수 있으며, 이러한 DSD의 변동성은 레이더 강우 추정의 불확실성을 더욱 가중시킨다.

이중편파레이더는 대기수상체(hydrometeor)의 모양과 크기, 위상, 자세에 대한 정보를 제공해줌으로써 위와 같은 불확실성을 감소시켜 보다 정확한 강우량 추정을 가능하게 한다(Bringi and Chandrasekar, 2001). 이는 수평과 수직의 두 전파의 차이를 통해 생산되는 자료를 이용하여 DSD의 변화에 대한 정보를 이용할 수 있기 때문이다. 이러한 이점을 이용하여 국토교통부에서는 홍수예보에 활용하고자 이중편파레이더를 도입하고 있으며, 악기상 관측 및 기상예보를 목적으로 하는 기상청과 기지 중심의 기상지원을 목적으로 하는 국방부의 레이더도 향후 모두 이중편파레이더로 교체될 예정이다.

이중편파레이더에서는 단일편파레이더의 강우량 추정 시 사용하는 반사도(reflectivity,  $Z_h$ )에 추가하여, 차등반사도(differential reflectivity,  $Z_{dr}$ )와 비차등위상차(specific differential phase,  $K_{dp}$ )를 이용하여 강우량을 추정한다. 이중편파레이더를 위한 대표적인 강우 추정 알고리즘으로는 JPOLE (Joint Polarization Experiment) (Ryzhkov et al., 2005)과 CSU (Colorado State University) (Cifelli et al., 2011)가 있다. JPOLE 알고리즘은 강우량에 따라 다른 강우 관계식을 사용하고 CSU 알고리즘은 대기수상체와 레이더 자료의 품질에 따라 다른 강우 관계식을 사용한다. 강우 추정 알고리즘에 사용되는 변수들 사이의 관계 즉,  $R(Z_h)$ ,  $R(Z_h, Z_{dr})$ ,  $R(K_{dp})$ ,  $R(K_{dp}, Z_{dr})$  등은 DSD의

매개변수에 대한 다양한 가정들을 이론적인 연구들을 통해 도출되었다(Bringi and Chandrasekar, 2001). 이 변수들 중,  $K_{dp}$ 는 레이더 보정과 부분 빔차폐의 영향을 받지 않으며, 강한 강우에 대한 신호감쇠의 영향이 적고, 강우강도와 매우 밀접한 관계에 있기 때문에 강우량 추정에 있어 매우 유리한 정보를 제공한다(Zrníc and Ryzhkov, 1996).  $K_{dp}$ 는 단위거리당 위상의 변화 정도를 의미하며, 따라서 이중편파레이더에서 생산되는 차등위상차(differential phase,  $\psi_{dp}$ )로부터 계산된다.  $K_{dp}$ 를 산정하기 위한 방법으로는 주로 필터링과 회귀분석 방법이 사용되고 있다(Golestani et al., 1989; Hubbert and Bringi, 1995). 이 방법은 층상형(stratiform) 강우와 같이 대기의 미시물리학적 특성(micro-physical property)이 급격하게 변하지 않는 강우 지역에서는  $K_{dp}$ 가 적절하게 산정되나, 대류형(convective) 강우 지역에서는  $K_{dp}$ 의 침투값이 과소 추정되고, 레이더 관측 반경의 최원거리 지역이나  $\psi_{dp}$ 가 급격히 변하는 강우 구름의 경계에서 음(negative)의 값을 보일 수도 있다. 또한 강우가 적은 지역에서는 신호가 크게 진동(fluctuation)함에 따라  $K_{dp}$ 도 진동할 수 있다. Wang and Chandrasekar (2009)는 이러한 문제로 인해 발생하는 편의(bias)와 진동을 감소시키는 조정 알고리즘(adaptive algorithm)을 제안한 바가 있다. 이 알고리즘을 통해 낮은 지역에서 신호가 크게 진동하는 것과 강한 강우 지역에서  $K_{dp}$ 의 침투값을 개선시킬 수 있었으나, 이 방법은 여전히 필터링 방법에 기초하고 있어 후방산란(back scatter)의 위상변화나 음의  $K_{dp}$  값을 제거하는데 큰 효과를 보이지 못하였다.

본 연구에서는 이중편파레이더의 강우 추정 알고리즘에 이용되는  $K_{dp}$ 의 산정시 발생하는 위와 같은 문제를 해결하기 위해 국토교통부의 S밴드 이중편파레이더 자료에 자기일관성(self-consistency)에 기초하여  $K_{dp}$ 를 분포하는 방법을 적용하였다. 산정된  $K_{dp}$ 를 이중편파레이더 강우 추정 알고리즘에 적용하여 분포형  $K_{dp}$ 의 효과를 검토하고, 이를 이용하여 산정한 강우량의 개선 여부를 확인하고자 하였다.

본 논문의 2장에는 이중편파레이더에 적용되고 있는 대표적인 강우 추정 알고리즘인 JPOLE 및 CSU 알고리즘의 강우 추정 방법에 대해 설명하고, 본 연구에서 사용한 분포형  $K_{dp}$ 의 산정방법에 대해 기술하였다. 제시된 방법에 의해 산정한 분포형  $K_{dp}$ 와 강우 추정 알고리즘을 적용한 레이더와 강우사상에 대해 3장에서 설명하고, 적용 결과를 4장에 기술하였다. 5장에서는 본 연구에서 제시한 방법의 이점과 향후 필요한 추가 연구에 대해 정리하였다.

## 2. 연구내용 및 방법

### 2.1 정량적 강우량 추정(Quantitative Rainfall Estimation, QRE) 알고리즘

#### 2.1.1 JPOLE 알고리즘

Ryzhkov et al. (2005)은 정상류 상태의 공기 중에서 등강우입자(equilibrium raindrop)에 기초한 강우 추정 알고리즘을 개발하였다. 이 알고리즘은 강우입자의 가로축과 세로축의 비(axis ratio)와 등가부피(equivolume)를 갖는 구체의 직경과의 관계에 의해 결정된다. Fig. 1과 같이  $Z_h$ 를 이용하여 강우강도를 계산하고 강우강도의 크기에 따라 다른 산정식을 이용한다. 강우강도는 Eq. (1)과 같이 산정할 수 있다.

$$R(Z_h) = 0.0170(Z_h^{0.714}) \quad (1)$$

여기서,  $Z_h$ 는 레이더의 수평반사도( $mm^6 m^{-3}$ ),  $R$ 은 강우강도( $mm h^{-1}$ )이다.

Eq. (1)을 이용하여 산정된 강우강도의 크기에 따라  $6 mm h^{-1}$ ,  $50 mm h^{-1}$ 를 기준으로 Eqs. (2a)~(2c)를 이용하여 강우량을 계산한다.

$$R(Z_h, Z_{dr}) = R(Z_h) / (0.4 + 5.0|Z_{dr} - 1|^{1.3}) \quad (2a)$$

$(R(Z_h) < 6 mm h^{-1})$

$$R(K_{dp}, Z_{dr}) = R(K_{dp}) / (0.4 + 3.5|Z_{dr} - 1|^{1.7}) \quad (2b)$$

$(6 mm h^{-1} < R(Z_h) < 50 mm h^{-1})$

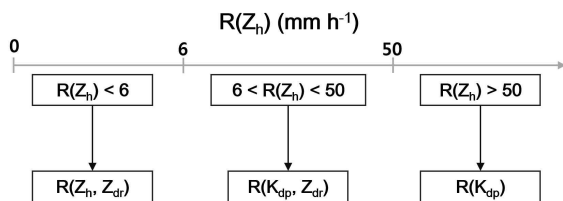


Fig. 1. Flowchart of the JPOLE Algorithm

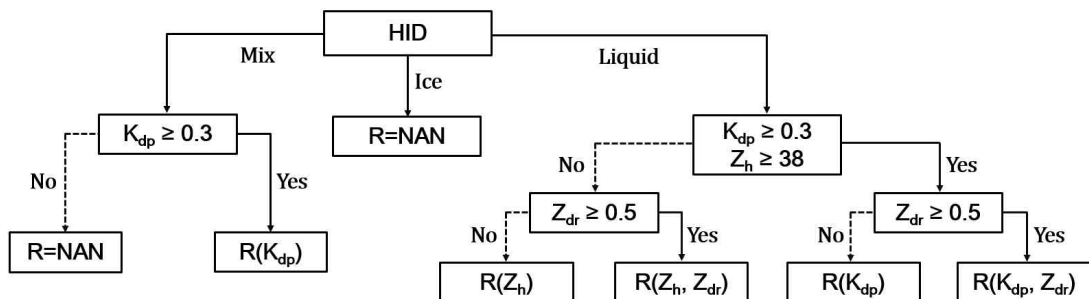


Fig. 2. Flowchart of the CSU-HIDRO Algorithm

$$R(K_{dp}) = R(K_{dp}) = 44.0|K_{dp}|^{0.822}sign(K_{dp}) \quad (2c)$$

$(R(Z_h) > 50 mm h^{-1})$

여기서,  $Z_h$ 는 레이더의 수평반사도( $mm^6 m^{-3}$ ),  $Z_{dr}$ 은 수평편파와 수직편파의 차이인 차등반사도( $dB$ ),  $K_{dp}$ 는 비차등위상차( $^{\circ} km^{-1}$ )이다.

#### 2.1.2 CSU 알고리즘

CSU 알고리즘은 대기수상체 분류(hydrometeor classification)와 이중편파레이더 변수값의 범위에 따라 강우량 산정식을 다르게 적용한다. Fig. 2는 CSU-HIDRO (Colorado State University-Hydrometeor Identification Rainfall Optimization)의 대기수상체 분류와 그에 따른 강우량 산정 알고리즘을 보여주고 있다. 대기수상체 분류에 따라 액체(liquid)로 분류된 경우가 강우이며,  $Z_h$ 와  $Z_{dr}$ ,  $K_{dp}$ 의 임계값에 따라 Eqs. (3a)~(3d)의 관계식을 이용하여 강우량을 산정한다.

$$R(Z_h) = 0.0170(Z_h)^{0.7143} \quad (3a)$$

$(K_{dp} < 0.3^{\circ} km^{-1}, Z_h < 38 dBZ, Z_{dr} < 0.5dB)$

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

$(K_{dp} < 0.3^{\circ} km^{-1}, Z_h < 38 dBZ, Z_{dr} \geq 0.5dB)$

$$R(K_{dp}, Z_{dr}) = 90.8(K_{dp})^{0.93}10^{(-0.169Z_{dr})} \quad (3c)$$

$(K_{dp} \geq 0.3^{\circ} km^{-1}, Z_h \geq 38 dBZ, Z_{dr} \geq 0.5dB)$

$$R(K_{dp}) = 40.5(K_{dp})^{0.85} \quad (3d)$$

$(K_{dp} \geq 0.3^{\circ} km^{-1}, Z_h \geq 38 dBZ, Z_{dr} < 0.5dB)$

여기서,  $Z_h$ 는 레이더의 수평반사도( $mm^6 m^{-3}$ ),  $Z_{dr}$ 은 수평편파와 수직편파의 반사도 차이인 차등반사도( $dB$ ),  $K_{dp}$ 는 비차등위상차( $^{\circ} km^{-1}$ )이다. Eqs. (3a)~(3d)에 적용된 상수들은 Gamma DSD 변수들의 균등분포 가정하에 산란모의를 통해 도출된 것이다(자세한 내용은 Bringi and Chandrasekar (2001)을 참고).

## 2.2 비차등위상의 산정

앞서 설명한 이중편파레이더의 두 강우 추정 알고리즘의 강우량 산정식 적용을 위한 강우 크기의 구분 방법과 그에 따른 산정식은 다르지만  $Z_h$ ,  $Z_{dr}$ ,  $K_{dp}$ 의 변수가 동일하게 사용되고 있다. 이 변수들 중,  $Z_h$ 와  $Z_{dr}$ 은 레이더에 수신된 신호로부터 직접 계산되나,  $K_{dp}$ 는 레이더에 의해 측정된 차등위상차( $\psi_{dp}$ )의 레이(ray) 프로파일(profile)의 평균 경사(slope)로 계산된다. 따라서 앞서 설명한 바와 같이 강우지역에서 필터링 방법을 이용하여 산정한  $K_{dp}$ 가 작게 산정되거나, 진동 혹은 음의 값을 갖는 경우 강우 추정에 직접적으로 영향을 주게 된다.

본 연구에서는 강우지역에 대해 자기일관성에 따라 산정한 분포형  $K_{dp}$ 를 적용하였다. 이 방법은 Lim et al. (2013)에 제시되어, 미국 캘리포니아의 HMT (Hydrometeorology Testbed) X-밴드 이중편파레이더에 적용된 바가 있다. X-밴드 레이더는 상대적으로 신호의 감쇠가 크므로 이를 보정하는 과정이 포함되어 있으며, 본 연구에서도 이를 적용하여 감쇠보정을 수행하였다.

본 연구에서 이용한  $K_{dp}$ 의 산정 방법은 강우지역에서 감쇠가 보정된(attenuation-corrected) 수평반사도( $\hat{Z}_h$ )와 총  $\psi_{dp}$ 를 이용한다. 여기서, 총  $\psi_{dp}$ 는 강우지역의 끝점( $r_m$ )과 시작점( $r_0$ )의  $\psi_{dp}$ 의 차이를 말한다. 강우지역은 CSU-HIDRO의 대기수상체 분류에 의해 신호의 크기와 잡음(noise)의 비(ratio)인 SNR (signal to noise ratio), 수평편파와 수직편파의 위상과 강도 변화의 관계를 통해 비기상 에코를 판별하게 해주는 상관계수(correlation coefficient,  $\rho_{hv}$ ),  $\psi_{dp}$ 의 표준편차를 이용하여 구분한다. 먼저, Eqs. (4a)~(4c)와 Eq. (5)를 이용하여 감쇠보정된 반사도  $\hat{Z}_h$ 를 산정한다.

$$\hat{\alpha}_h = \frac{[Z'_h(r)]^\beta [10^{0.1\beta\hat{A}_h(r_0-r_m)} - 1]}{I(r_0; r_m) + [10^{0.1\beta\hat{A}_h(r_0-r_m)} - 1]I(r; r_m)} \quad (4a)$$

$$\hat{A}_h(r_0 - r_m) = \gamma[\psi_{dp}(r_m) - \psi_{dp}(r_0)] \quad (4b)$$

$$I(r_0; r_m) = 0.46\beta \int_{r_0}^{r_m} [Z'_h(r)]^\beta dr \quad (4c)$$

여기서,  $Z'_h(r)$ 은 감쇠된 반사도이고,  $\beta$ 와  $\gamma$ 는 상수로서 20°C 온도하에서 DSD를 변화시키며 Brandes et al. (2004)의 입자형상모델(drop shape model)을 통해 이론적인 모의를 수행하여 도출되었으며, 각각 0.76과 0.01을 적용하였다. 산정된  $Z'(r)$ 는 아래 Eq. (5)에 이용하여  $\hat{Z}_h$ 를 산정한다.

$$10\log_{10}[\hat{Z}_h(r)] = 10\log_{10}[Z'_h(r)] + 2 \int_{r_0}^r \hat{\alpha}_h(s) ds \quad (5)$$

$\hat{Z}_h$ 는 Eqs. (6a) and (6b)에 이용하여 자기일관성에 기초한 분포형  $\hat{K}_{dp}$ 를 산정하게 된다.

$$\hat{K}_{dp}(r) = a[\hat{Z}_h(r)]^b \quad (6a)$$

$$a = \frac{[\psi_{dp}(r_m) - \psi_{dp}(r_0)]}{2 \int_{r_0}^{r_m} [\hat{Z}_h(r)]^b ds} \quad (6b)$$

여기서, a는 Eq. (6b)와 같이  $\hat{Z}_h$ 와  $\psi_{dp}$ 로부터 각 레이를 따라 산정되며, b는 상수로서 앞서 Eqs. (4b) and (4c)의  $\beta$ ,  $\gamma$ 와 마찬가지로 Brandes et al. (2004)을 통해 산정되었으며 0.86을 적용하였다.

제시된 분포형  $K_{dp}$ 는 지형 클러터(ground clutter)로 인한  $\psi_{dp}$ 의 영향을 감소시킬 수 있다. 이는  $K_{dp}$ 의 산정 과정에서  $\psi_{dp}$ 에 비해 지형 클러터의 영향을 적게 받는  $Z_h$ 를 사용하기 때문이다. 또한, 인접한 빈(bin)의 자료를 이용하지 않기 때문에  $\psi_{dp}$ 의 큰 변화로 인해 발생할 수 있는  $K_{dp}$ 의 진동이나 음의 값 산출 등의 문제들을 해결할 수 있다는 장점이 있다(Lim et al., 2013).

## 3. 적용 대상

본 연구에서는 이중편파레이더 자료를 이용한 강우량 추정 결과의 비교를 위하여 비슬산 레이더로부터 획득된 자료를 이용하였다. 비슬산 레이더는 한반도의 남동쪽에 위치하고 있으며, 낙동강 유역의 관측이 가능하다(Fig. 3). 거리해상도는 125m로 반경 150km까지 관측이 수행되고 있으며 2.5분마다 관측자료를 생산하고 있다(Table 1). Fig. 3에 비슬산 레이더의 위치와 관측반경, 본 연구에서

Table 1. Geographic and Operational Profiles of the Mt. Biseul Radar

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

이용한 30개 기상청 AWS (Automatic Weather Station)의 위치를 지점 번호로 표시하였으며, 지점 번호에 따른 명칭은 Table 2에 정리하였다. 이 지점들은 비슬산 레이더의 관측반경내에 존재하고 있는 160여개의 AWS 중, 본 연구에서 적용한 강우사상에 대해 강우가 발생한 지역을 위주로 선정하였다.

본 연구에서는 2012년 7월 15일과 8월 23일의 강우사상을 이용하였다. 2012년 7월 15일은 장마전선의 영향으로 남부지방에 큰 강우량을 보여 부산에서는 시간당 최대 80.5 mm의 강우량을 보이기도 하였다(KMA, 2012). 2012년 8월 23일은 전국적으로 집중호우가 발생하여 서울, 경기, 강원 지역에 피해를 유발하였으며, 경남지역에는 예비특

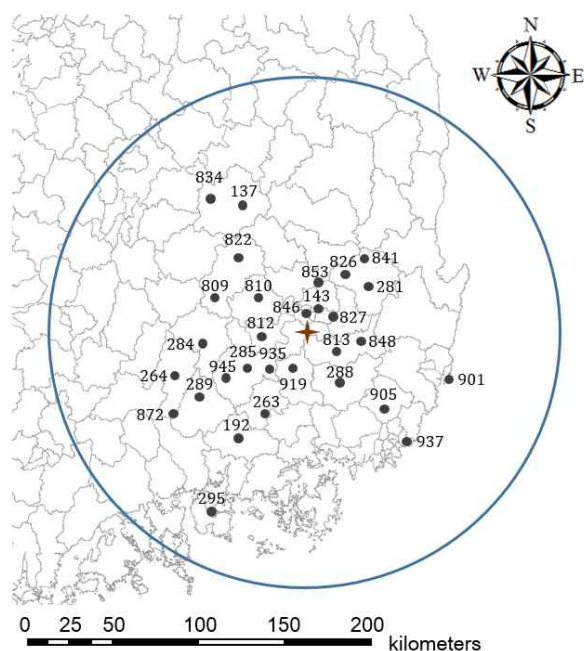


Fig. 3. The location of the Mt. Biseul radar and AWSs

Table 2. The List of AWSs Depicted in the Fig. 3

Station ID	Name	Station ID	Name	Station ID	Name
137	Sangju	295	Namhae	846	Seo-gu
143	Daegu	809	Daedeok	848	Geumcheon
192	Jinju	810	Seongju	853	Palgongsan
263	Uiryeong	812	Goryeong	872	Jirisan
264	Hamyang	813	Cheongdo	901	Ulgi
281	Yeongcheon	822	Gimcheon	905	Sangbuk
284	Geochang	826	Sinnyeong	919	Changnyeong
285	Hapcheon	827	Gyeongsan	935	Cheongdeok
288	Miryang	834	Hwaseo	937	Haeundae
289	Sancheong	841	Hwabuk	945	Daemyung

(source: Korea Meteorological Administration)

보가 발령되기도 하였다(NEMA, 2012).

## 4. 적용 결과 및 토의

### 4.1 기존의 비차등위상차와 분포형 비차등위상차의 비교

Fig. 4는 2012년 8월 23일 0010 KST에 대한 레이더 자료를 도시한 것이다. 앞서 설명한 바와 같이,  $K_{dp}$ 는  $\psi_{dp}$  값의 평균 경사이며, 비슬산 레이더의 신호처리기의 경우에는 최소자승법(least square fit)을 적용하여  $K_{dp}$ 를 산정한다(Vaisala, 2013). 즉, Fig. 4(e)에서 보여지는 기존의  $K_{dp}$ 는 Fig. 4(c)의  $\psi_{dp}$ 로부터 산정된 것이므로 이와 유사한 분포를 보이고 있다. 그러나 Figs. 4(a) and 4(c)의 반사도 영상에서 확인할 수 있는 강우의 변동이 심한 지역에서 음의 값이 발생한 것을 확인할 수 있다.

이러한 음의  $K_{dp}$ 는  $\psi_{dp}$ 의 변화에 따라 발생하기도 한다. 특히, Fig. 4(d)에 도시한 상관계수( $\rho_{hv}$ )를 볼 때, 북서쪽 지역에 보이는 신호는 비기상에코로 판단됨에도 불구하고 해당 지역에 대해  $K_{dp}$ 가 나타난다. 이에 비해 본 연구에서 제시한 방법에 의해 산정한 Fig. 4(f)에서는 이러한 비기상에코 지역에 대해  $K_{dp}$ 를 산정하지 않는 것을 확인할 수 있다.

기존의  $K_{dp}$ 와 분포형  $K_{dp}$ 가 레이더를 따라 어떠한 차이를 보이는지 검토하기 위해 레이더 관측자료의 임의 레이에 대한 관측변수의 프로파일을 도시하였다. Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 시간인 2012년 8월 23일 0010 KST에 방위각 242°에 대해 관측된  $Z_h$ ,  $\psi_{dp}$ ,  $K_{dp}$ 와 본 연구에서 산정한  $K_{dp}$ 의 레이 프로파일이다.

Fig. 5(a)의  $Z_h$  변화가 큰 지역에서  $\psi_{dp}$  (Fig. 5(b)) 또한 급격히 변하는 것을 볼 수 있으며, 이에 따라 기존의 필터링 방법으로 산정된  $K_{dp}$  (Fig. 5(c)의 점선)는 음의 값을

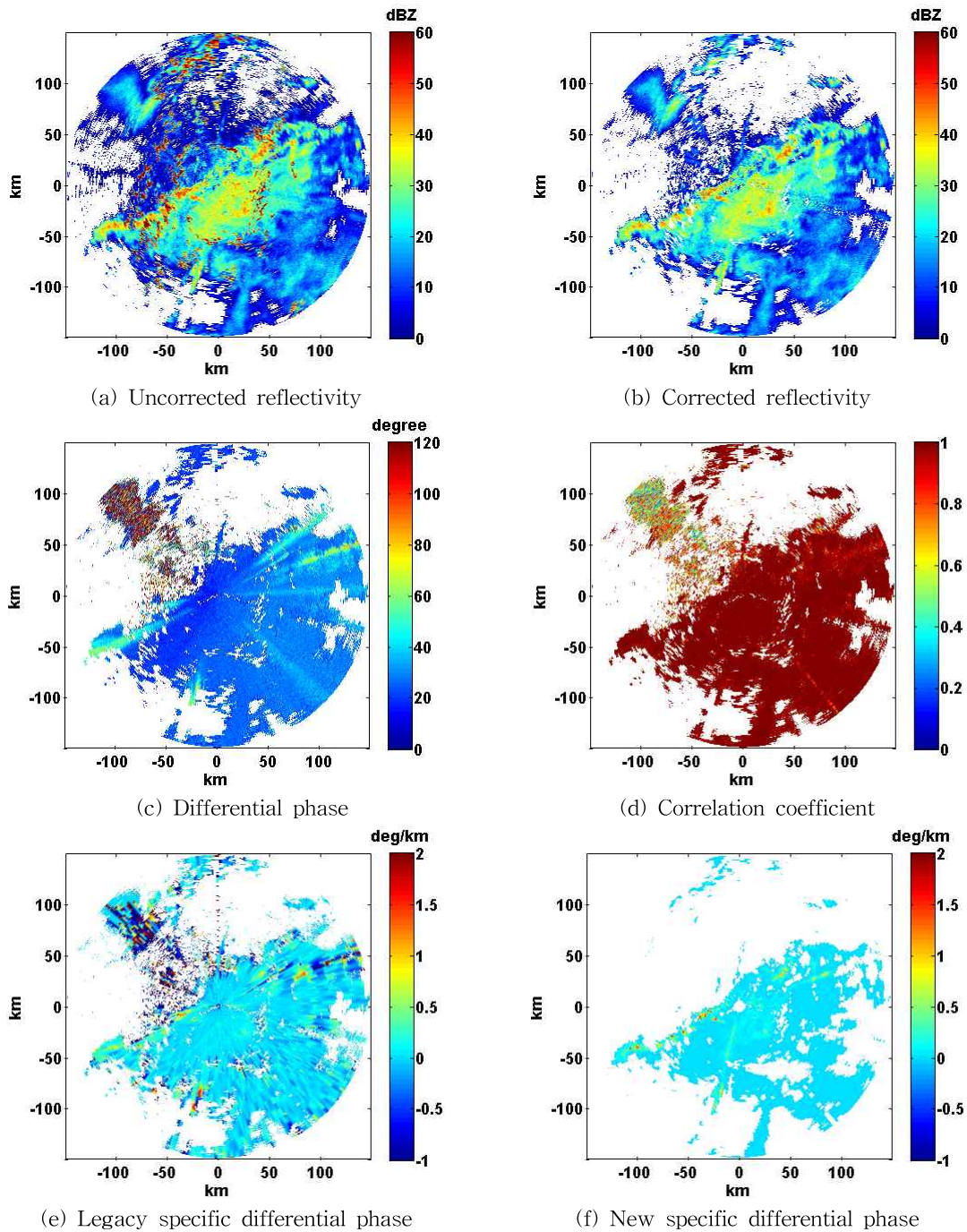


Fig. 4. PPI Products at a  $-0.1$  Degree Elevation on 0010 KST 23 August 2012. (a) uncorrected reflectivity, (b) corrected reflectivity, (c) differential phase, (d) correlation coefficient, (e) legacy specific differential phase, and (f) new specific differential phase

보이거나  $\psi_{dp}$ 의 변화에 따라 진동하고 있다(Fig. 5(c)의 점선). 이에 비해 분포형  $K_{dp}$ (Fig. 5(c)의 실선)는 강우 변동이 심한 지역(레이더로부터 약 80km지역)이나 약한 강우를 보이는 지역(레이더로부터 약 110km 이상 지역)에서도 음의 값이 제거된 것을 확인할 수 있다.

#### 4.2 강우 추정 알고리즘 및 비차등위상차 산정 방법에 따른 일강우량

두 강우사상에 대한 레이더로부터 산정된 일강우량을 Figs. 6 and 7에 도시하였다. 각 일강우량은 빗차폐의 영

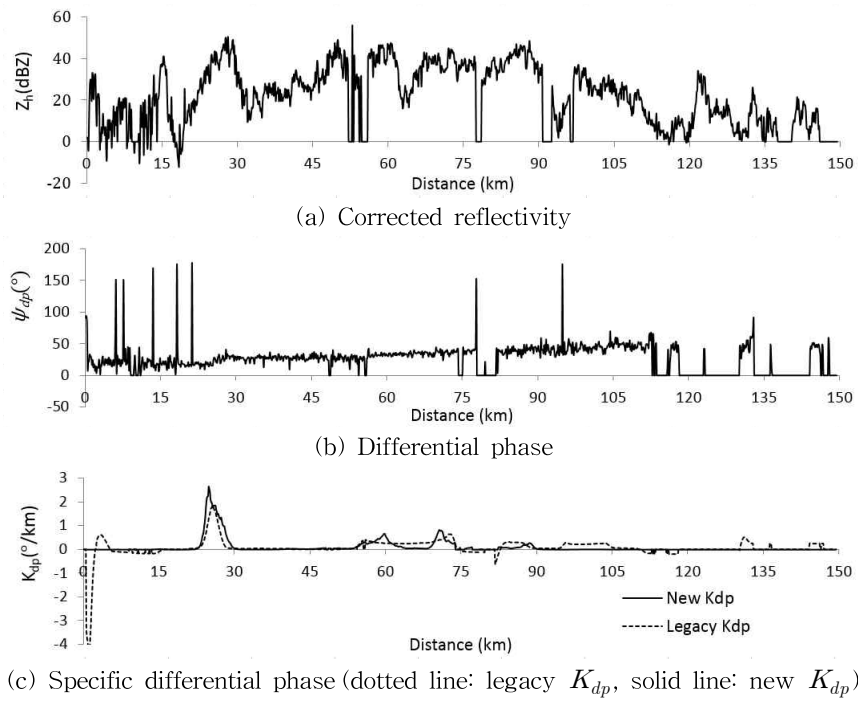


Fig. 5. An Example Ray Profile for the  $242^\circ$  Azimuth at a  $-0.1$  Degree Elevation on 0010 KST 23 August 2012

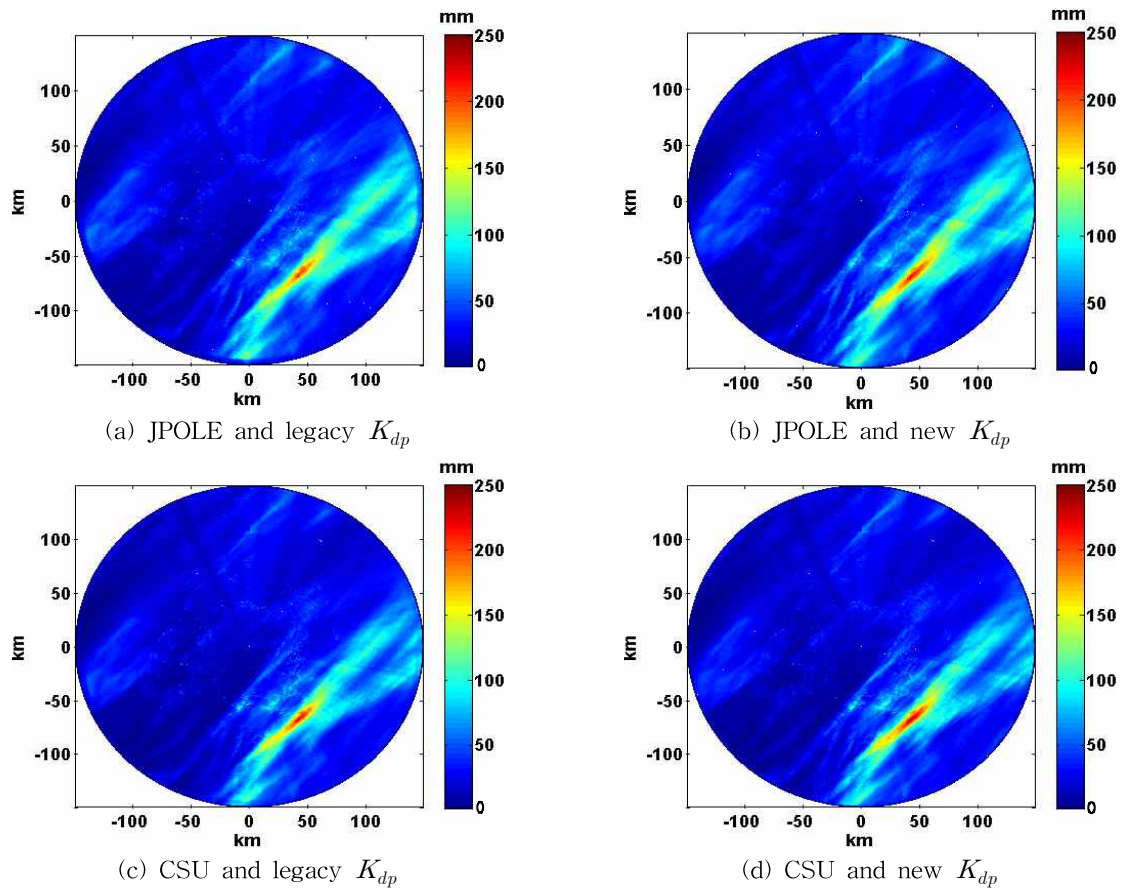


Fig. 6. Daily Accumulated Rainfalls using Maximum Value of the Estimated Rainfall for  $-0.5^\circ$ ,  $0.0^\circ$ ,  $0.5^\circ$ , and  $0.8^\circ$  Elevations on 15 Jul 2012

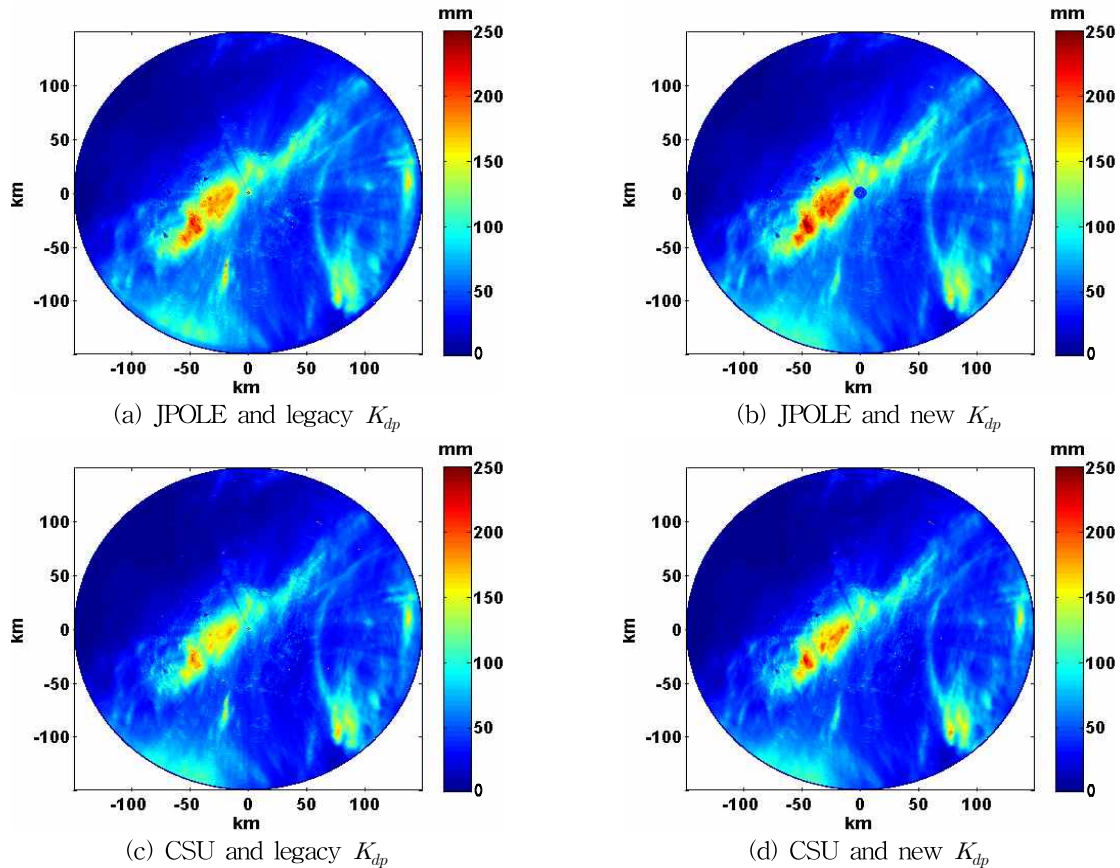


Fig. 7. Daily Accumulated Rainfalls using Maximum Value of the Estimated Rainfall for  $-0.5^\circ$ ,  $0.0^\circ$ ,  $0.5^\circ$ , and  $0.8^\circ$  Elevations on 23 Aug 2012

향을 최소화하기 위하여  $-0.5^\circ \sim 0.8^\circ$ 의 4개 관측고도각에 대한 강우량의 최대값을 추출하여 누적하였다. Fig. 6과 Fig. 7의 일강우량이 큰 지역을 살펴보면, 분포형  $K_{dp}$ 를 사용함으로써 기존의 경우보다 일강우량의 침투값이 크게 산정된 것을 확인할 수 있다. 기존의  $K_{dp}$ 를 이용한 JPOLE, CSU 알고리즘에 의한 관측반경내 일강우량 최대값은 각각 243.77 mm, 229.53 mm이고, 분포형  $K_{dp}$ 를 이용한 경우는 252.85 mm, 239.80 mm로써 약 10 mm가 증가하였다. 이는 앞서 제시된 레이에 따른  $K_{dp}$ 의 프로파일에 서와 같이 분포형  $K_{dp}$ 가 기존의  $K_{dp}$ 보다 큰 값을 보이기 때문이다.

Fig. 3에 표시된 AWS 지점들의 관측자료와 해당 위치에서의 레이더 일누적강우량을 비교하였다. 일반적으로 1시간에 30 mm 이상이나 하루에 80 mm 이상의 강우가 발생한 경우, 혹은 연강우량의 10%에 상당하는 강우를 집중호우로 분류한다. 이에 따라 본 연구에서는 일강우량 80 mm 이상인 경우를 강한 강우로, 이하인 경우는 약한 강우로 분류하여 검토하였다. 각 강우 추정 알고리즘은 강

우의 크기에 따라 사용되는 변수가 다르므로 이와 같이 강우의 크기에 따라 분류함으로써 변수에 따른 강우 추정의 차이를 비교하고자 하였다.

각 알고리즘 및  $K_{dp}$  산정 방법에 따라 추정된 일누적강우량과 AWS 관측값과의 평균절대오차(Mean Absolute Error, MAE) 및 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 Table 3에 제시하였다. 각각의 통계값은 Eqs. (7) and (8)과 같이 산정한다.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - S_i| \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2} \quad (8)$$

여기서,  $n$ 은 자료의 개수,  $O_i$ 는 AWS 10분 간격 관측 강우량의 누적값,  $S_i$ 는 레이더로부터 추정된 10분 간격 강우량의 누적값이다.

Table 3의 일누적강우량 및 통계값은 두 강우사상에 대한 30개 지점(총 60개)을 누적강우량 크기에 따라 순차



**Table 3. Statistics for Accumulated Daily Rainfalls according to Quantitative Rainfall Estimation Algorithms and  $K_{dp}$  Estimation Methods**

No.	AWS ID	Acc. rainfall (mm)	JPOLE algorithm				CSU algorithm			
			MAE (mm)		RMSE (mm)		MAE (mm)		RMSE (mm)	
			legacy $K_{dp}$	new $K_{dp}$	legacy $K_{dp}$	new $K_{dp}$	legacy $K_{dp}$	new $K_{dp}$	legacy $K_{dp}$	new $K_{dp}$
1	810	7.5	0.4	0.6	0.6	0.7	0.9	0.9	1.1	1.1
2	263	8.5	0.4	0.4	0.5	0.6	1.1	1.1	1.4	1.4
3	834	12.0	1.6	1.3	1.7	1.4	3.3	2.9	3.5	3.0
4	919	13.0	1.7	1.3	1.8	1.5	3.5	3.5	3.8	3.8
5	284	13.5	0.7	0.9	1.0	1.2	3.3	3.3	4.0	4.0
6	810	14.0	0.9	0.8	1.2	0.9	2.8	2.8	3.3	3.3
7	264	14.5	2.8	2.0	3.1	2.2	4.9	4.9	5.5	5.5
8	935	15.5	7.2	7.6	8.2	8.6	6.1	5.3	7.1	6.2
9	813	17.0	3.6	3.6	4.0	4.1	6.0	5.8	6.8	6.6
10	289	17.0	10.6	12.4	14.0	16.2	7.2	7.3	9.7	9.9
11	288	17.5	0.4	0.8	0.5	1.1	2.2	2.6	2.4	2.8
12	827	18.5	8.8	10.4	9.9	11.8	4.5	5.7	5.2	6.5
13	945	18.5	1.9	0.9	2.3	1.0	4.0	3.6	4.6	4.0
14	192	19.0	2.5	2.7	2.6	3.9	4.3	3.3	5.6	4.0
15	810	20.0	3.5	3.8	3.9	3.9	4.4	2.5	4.9	2.6
16	295	20.5	4.3	3.5	4.4	3.6	6.4	6.5	6.7	6.8
17	812	21.5	1.5	1.9	1.7	2.2	5.8	5.9	6.5	6.6
18	285	21.5	6.0	5.4	6.5	5.8	8.4	8.4	9.0	9.0
19	809	23.0	1.5	5.0	1.6	6.1	2.7	2.4	2.8	2.6
20	846	23.5	4.3	3.7	4.5	3.9	6.0	6.0	6.3	6.3
21	822	29.5	1.3	5.0	1.5	5.6	0.8	0.7	0.9	0.9
22	822	29.5	1.8	1.0	2.3	1.4	3.9	3.9	4.7	4.7
23	853	30.5	6.3	8.3	6.9	9.3	11.3	11.8	12.5	13.2
24	872	32.0	5.0	3.1	5.4	3.3	6.6	7.0	7.1	7.5
25	143	32.5	8.4	7.3	8.9	7.7	11.1	10.9	11.8	11.6
26	810	37.0	6.4	9.3	6.9	9.7	2.1	1.6	2.6	2.0
27	841	39.0	5.5	3.3	5.9	4.2	10.9	9.7	11.5	10.1
28	826	41.5	6.1	3.7	6.4	3.8	10.8	10.0	11.2	10.4
29	281	47.5	2.9	3.4	3.6	4.3	5.8	6.1	7.4	7.8
30	937	48.5	2.0	0.9	2.2	1.2	3.7	3.7	5.0	4.9
31	848	52.0	2.2	8.7	2.8	9.8	2.7	3.4	3.3	4.2
32	848	52.5	14.3	11.3	16.9	13.4	19.0	17.0	21.9	19.6
33	288	52.5	9.3	9.6	11.9	12.2	12.8	12.8	16.3	16.2
34	809	53.0	21.1	20.7	23.0	22.6	26.2	26.2	28.4	28.4
35	834	56.0	8.7	6.6	9.3	7.7	14.9	12.8	15.8	13.7
36	905	70.0	6.5	5.3	7.7	6.4	10.9	10.1	13.5	12.6
37	192	70.5	2.3	2.4	2.6	2.7	5.6	6.6	6.5	8.6
38	263	70.5	3.8	4.8	4.3	5.4	6.8	9.6	8.1	11.2
39	813	73.0	8.0	8.5	9.6	10.3	11.7	11.6	14.4	14.2
40	905	75.0	14.8	13.8	19.2	17.8	18.8	19.2	23.9	24.6
41	284	83.5	14.8	14.8	17.9	18.1	20.2	19.9	24.4	24.1
42	826	85.5	11.4	9.1	13.8	11.1	16.2	16.3	19.9	20.0
43	295	87.5	3.4	3.2	5.2	4.5	6.3	6.7	9.5	10.2
44	919	88.0	15.2	14.1	19.8	18.0	17.8	17.1	22.9	22.1
45	841	89.5	19.2	14.3	23.6	17.5	6.1	4.3	7.4	5.4
46	264	90.5	9.3	6.4	12.4	8.1	13.2	11.7	17.7	15.5
47	901	92.0	13.3	13.1	20.1	19.4	15.3	15.5	23.0	23.1
48	853	94.5	4.2	5.1	4.7	5.6	12.6	13.5	15.2	17.1
49	827	110.0	19.8	18.5	24.0	22.3	26.3	25.5	32.0	31.0
50	281	129.5	26.2	26.5	31.3	31.9	34.6	32.4	42.1	39.4
51	143	146.0	4.3	2.5	5.4	3.6	11.2	8.3	14.6	10.7
52	289	154.0	27.2	35.6	32.9	43.3	40.8	43.8	49.7	53.3
53	935	171.0	29.9	25.3	35.9	29.8	37.5	36.4	45.2	43.6
54	901	174.0	33.9	25.7	37.9	29.5	46.2	40.6	51.9	45.9
55	846	177.5	35.7	33.8	42.3	40.1	35.4	38.0	42.3	45.7
56	937	179.0	36.0	26.9	41.2	30.2	34.7	25.9	39.0	29.0
57	872	182.0	41.9	40.9	51.1	50.9	51.1	50.5	63.2	62.9
58	812	196.5	19.6	16.3	23.2	20.8	30.3	24.9	36.4	30.3
59	285	205.5	11.2	14.5	14.1	17.6	17.8	3.9	22.6	4.9
60	945	211.0	7.2	5.9	8.8	6.8	17.7	12.8	20.7	15.3

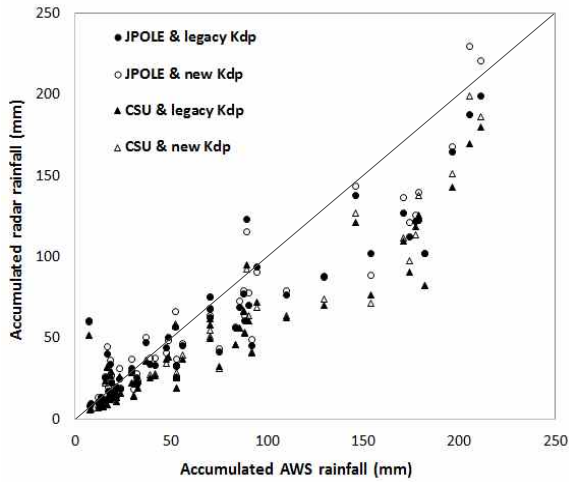


Fig. 8. Comparison of Accumulated Daily Rainfall of AWSs and Radar Based Rainfall

적으로 정리한 것이다. JPOLE 알고리즘의 경우 개선 정도가 가장 큰 지점은 7월 15일 일누적강우량 179mm를 보인 해운대 지점(Table 3의 56번째)으로서 MAE 및 RMSE가 9.1 mm, 10.9 mm 개선되었다. CSU 알고리즘에서는 8월 23일 일누적강우량 205.5mm를 기록한 합천 지점(Table 3에 59번째) 누적강우량의 MAE와 RMSE 13.9 mm, 17.8 mm씩 감소하여, 분포형  $K_{dp}$ 를 사용함으로써 가장 크게 개선되었다.

전체적으로는 총 60개중 분포형  $K_{dp}$ 를 이용하여 추정된 강우량이 개선된 경우는 JPOLE 알고리즘은 35개, CSU 알고리즘은 32개였다. 강우 구분에 따라서는 약한 강우로 분류된 40개 중에는 알고리즘별로 각각 19개와 18개, 강한 강우로 분류된 20개 중에는 16개와 14개가 분포형  $K_{dp}$ 를 사용함으로써 누적강우량이 개선된 것을 확인하였다. 이는  $K_{dp}$ 가 Eqs. (2) and (3)에서와 같이 강우강도가 강한 경우에 적용되기 때문이다. 즉, 분포형  $K_{dp}$ 를 사용함으로써 집중호우와 같은 중호우의 강우량 추정의 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

각 강우사상에 대한 각 지점의 AWS 및 레이더의 일강우량을 도시한 Fig. 8을 보면, 레이더로부터 추정된 강우량이 관측값에 비해 작게 산정된 것을 알 수 있으며, CSU 알고리즘이 JPOLE 알고리즘에 비해 강우량을 과소추정하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다.  $K_{dp}$  산정방법에 따라서는 분포형  $K_{dp}$ 를 사용한 경우가 기존의  $K_{dp}$ 를 사용한 경우보다 정확한 강우량을 추정하는 것을 확인할 수 있다.

앞서, Table 3에서 제시된 MAE와 RMSE는 강우량에 따라 개선 정도가 다를 수 있으므로 AWS 관측자료에 대

한 레이더 강우량의 NB (Normalized Bias)와 NAE (Normalized Absolute Error)을 Eqs. (9) and (10)과 같이 산정하여 비교하였다.

$$NB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{(S_i - O_i)}{O_i} \times 100 \quad (9)$$

$$NAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{|S_i - O_i|}{O_i} \times 100 \quad (10)$$

여기서,  $n$ 은 자료의 개수,  $O_i$ 는 관측된 일강우량,  $S_i$ 는 레이더로부터 추정된 일강우량이다.

JPOLE 알고리즘에 있어서 기존의  $K_{dp}$ 를 사용한 경우 NB와 NAE가 -18.5%, 24.2%인 것에 비해 분포형  $K_{dp}$ 를 사용하여 -14.2%, 23.1%로 개선되었다. CSU 알고리즘에서는 분포형  $K_{dp}$ 를 적용함으로써 NB와 NAE가 -31%, 33.9%에서 -29.4%, 32%로 개선된 효과를 확인하였다.

## 5. 결론

이중편파레이더는 단일편파레이더에 비해 강우입자에 대한 다양한 정보를 제공해줌으로써 보다 정확한 강우량의 추정이 가능하다. 본 연구에서는 이중편파레이더의 강우량 추정 알고리즘인 JPOLE 알고리즘과 CSU 알고리즘을 이용하여 강우량을 추정하였다. 이 두 알고리즘은 산정식을 적용하기 위한 강우 강도의 구분에는 차이를 보이나,  $Z_h$ ,  $Z_{dr}$ ,  $K_{dp}$ 의 이중편파레이더 변수를 동일하게 사용하여 강우량을 추정한다. 이 변수들 중,  $Z_h$ 와  $Z_{dr}$ 은 강우입자의 크기와 모양에 대한 정보를 주는 반면에  $K_{dp}$ 는 강우입자의 모양과 밀도의 영향을 받는다.  $K_{dp}$ 는 신호감쇠나 편위(bias)의 영향이 없으며, 강우입자분포의 변화에 대한 민감도가 낮기 때문에 보다 정확한 강우량의 추정이 가능하다. 그러나  $K_{dp}$ 는  $\psi_{dp}$ 로부터 필터링을 통해 산정되므로  $\psi_{dp}$ 의 변화에 따라 진동하거나 음의 값이 산출되기도 한다. 따라서 본 연구에서는 자기일관성에 기초하여  $K_{dp}$ 를 분포하여, 국토교통부의 비슬산 레이더에 적용하였다. 2012년의 7월 15일과 8월 23일의 레이더 관측자료에 대해 분포형  $K_{dp}$ 를 산정한 결과, 필터링 방법에서 발생할 수 있는 음의  $K_{dp}$ 를 제거하는 것을 확인하였으며, 강우의 침투값을 개선시키는 효과가 있는 것을 확인하였다. 각 알고리즘을 이용한 강우량 추정에 있어서는 강한 강우로 분류한 일강우량 80mm 이상인 경우에 대해 AWS 관측자료와 비교한 MAE, RMSE, NB, NAE 등이 모두 개선된 것을 확인하였으며, 약한 강우로 분류한 80mm 이하인 경우에는 강한 강우에 비해 많은 개선효과를 확인하지

못하였다. 이는 강우 추정 알고리즘에 있어서  $K_{dp}$ 가 주로 강한 강우에 적용되고 약한 강우나 중간 강우에는  $Z_h$ ,  $Z_{dr}$ 이 사용되기 때문인 것으로 판단된다.

향후 국토교통부의 레이더 도입과 기상청과 공군의 레이더가 이중편파레이더로 교체가 완료되면, 우리나라는 이중편파레이더 관측망을 갖추게 된다. 이 이중편파레이더들을 효율적으로 활용하기 위해서는 이중편파레이더로부터 획득할 수 있는 변수에 대한 연구가 선행되어야 한다. 이에 본 연구에서 적용한 분포형  $K_{dp}$ 를 통해 레이더의 활용의 주요한 요소인 강우량 추정을 개선할 수 있을 것이다. 그러나 본 연구에서 적용한 알고리즘은 미국의 사례를 바탕으로 개발된 것이므로 향후, 국내에 적합한 알고리즘을 선택, 개선, 개발하기 위해서는 다양한 강우패턴과 많은 강우사상에 대한 연구가 필요할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(수문레이더 운영 및 웹·모바일 경보 플랫폼 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### References

Brandes, E.A., Zhang, G., and Vivekanandan, J. (2004). "Drop size distribution retrieval with polarimetric radar: Model and application." *J. Appl. Meteor.*, Vol. 43, No. 3, pp. 461-475.

Bringi, V.N., and Chandrasekar, V. (2001). *Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications*, Cambridge University, Press, p. 635.

Cifelli, R., Chandrasekar, Lim, V.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, No. 3, pp. 352-364.

Golestani, Y., Chandrasekar, V., and Bringi, V.N. (1989). "Intercomparison of multiparameter radar measure-

ments." Preprints, 24th Conf. on Radar Meteorology, Tallahassee, FL, Amer. Meteor. Soc., pp. 309-314.

Hubbert, J., and Bringi, V.N. (1995). "An iterative filtering technique for the analysis of copolar differential phase and dual-frequency radar measurements." *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 12, No. 3, pp. 643-648.

Korea Meteorological Administration (2012). Annual Climatological Report

Korea Meteorological Administration (2014). URL: <http://www.kma.go.kr>, AWS data, accessed 2014

Lim, S., Cifelli, R., Chandrasekar, V., and Matrosov, S.Y. (2013). "Precipitation Classification and Quantification Using X-Band Dual-Polarization Weather Radar: Application in the Hydrometeorology Testbed." *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 30, No. 9, pp. 2108-2120.

National Emergency Management Agency (2012). Report on Management for Heavy Rain in 2012. 8.20~8.23, Central Disaster and Safety Countermeasures Headquarters

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.

VAISALA (2013). USER'S MANUAL: Digital IF receiver/Doppler Signal Processor RVP8, pp. 377-388.

Wang, Y., and Chandrasekar, V. (2009). "Algorithm for estimation of the specific differential phase." *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 26, No. 12, pp. 2569-2582.

Zrnich, D.S., and Ryzhkov, A. (1996). "Advantages of rain measurements using specific differential phase." *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 13, No. 2, pp. 454-464.

paper number : 14-050

Received : 23 June 2014

Revised : 13 November 2014 / 26 December 2014

Accepted : 26 December 2014