



단일편파레이더의 레이더 강우 정확도 향상을 위한 반사도 오차 정량화

Quantification of Error in Reflectivity for Improving the Accuracy of the Radar Rainfall Estimated from Single Polarization Radar

윤정수*

Yoon, Jungsoo*

Abstract

There have been many limitations in the application of the hydrological field in Korea due to doubts about its accuracy, although radar-estimated rainfall has the advantage of providing high temporal and spatial resolution data. Real time ZR parameter calculation methods and many quantitative correction methods using rain gauge rainfall have been introduced to overcome the problem of accuracy. However, the accuracy of the radar rainfall after correction by these methods was a little better than before because the radar rainfall converted by the radar reflectivity had serious errors. In this study, we quantified the errors inherent in the radar reflectivity to solve the problem of accuracy of radar rainfall which has been raised in Korea over the last 10 years. The results are as follows. In the case assuming that the error variance of the radar reflectivity was 0, the bias of radar reflectivity ranged from -1 dBZ to -14 dBZ. In the case considering error variance, the bias of the radar reflectivity ranged from -3 dBZ to -15 dBZ, and the error variance ranged from 2^2 to 8^2 dBZ².

Key words : Radar Rainfall, Radar Reflectivity, Bias of Reflectivity, Error Variance of Reflectivity

요 지

레이더 강우 자료는 시공간적으로 높은 해상도 자료를 제공한다는 장점에도 불구하고 그 정확도에 대한 의구심으로 국내 수문분야 적용에 많은 한계가 있어 왔다. 이와 같은 정확도의 문제점을 극복하기 위해 실시간 ZR 매개변수 산정 방법 및 우량계 강우를 이용한 정량적 보정 방법이 도입되어 왔다. 그러나 이미 레이더 반사도에 오차가 크게 내재된 상황에서 변환된 레이더 강우는 그 어떠한 방법으로 보정되어도 여전히 많은 문제점이 있을 수밖에 없었다. 본 연구에서는 지난 10년 동안 국내에서 제기되어 온 레이더 강우의 정확도 문제점에 대한 해결책을 제시하기 위해 레이더 반사도에 내재되어 있는 오차를 정량화 하였다. 그 결과는 다음과 같다. 먼저 레이더 반사도의 오차분산을 0으로 가정한 경우 레이더 반사도의 편의는 -1 dBZ에서 -14 dBZ로 나타났다. 그러나 오차분산을 고려한 경우 레이더 반사도의 편의는 -3 dBZ에서 -15 dBZ까지 나타났으며, 그 오차분산은 $2^2 \sim 8^2$ dBZ² 사이의 범위로 나타났다.

핵심용어 : 레이더 강우, 레이더 반사도, 반사도 편의, 반사도 오차분산

1. 서 론

대기수상체에 대한 기상레이더의 관측 과정에서는 많은 정보들이 손실되고 예측 가능하거나 불가능한 오차가 발생하기 때문에 레이더 관측 자료에는 다양한 오차들이 나타나

고 있다(Krajewski and Smith, 2002). 그리고 이러한 오차들은 기상레이더와 관련한 다양한 분야의 전문가들에 따라 다양한 시각으로 나타나고 있다. 전자 및 통신 분야에서는 주로 레이더 하드웨어 검보정에서 나타나는 오차나 신호처리 과정에서 오차를 주요 오차들로 바라보고 있다(Atlas,

*교신저자, 정회원, 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 연구원(Tel: +82-31-995-0851, Fax: +82-31-910-0251, E-mail: coreahydro@gmail.com)
 Corresponding Author, Member, Researcher, Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

2002). 이에 비해 기상 분야에서는 호우의 종류에 따른 강우 크기 입자분포의 변동성과 레이더 강수 추정 알고리즘의 매개변수 등을 주요 오차 원인으로 바라보고 있다(Gosset et al., 2010). 이러한 전자, 통신, 기상 분야에서의 오차 원인을 파악하고 제거하였다 할지라도 레이더 강우를 수문분석에 활용하는 수문 전문가들에게는 여전히 레이더 강우에 오차가 존재한다는 문제점을 제기하여 왔다(Seo and Krajewski, 2011; Yoon, Choi, et al., 2016; Yoon et al., 2017).

레이더 강우에 오차가 존재한다는 문제점은 국내에 2006년부터 도입되었던 기상레이더(S밴드 단일편파레이더)에서도 마찬가지로 나타나고 있었다. 특히 국내 기상레이더는 그 레이더 강우의 편의가 심각하게 나타나 레이더 강우는 우량계 강우에 비해 정량적으로 30% 수준에 불과하였다(Yoo et al., 2013; Yoon, Choi, et al., 2016). 이러한 레이더 강우의 과소한 문제점을 해결하기 위해 국내 기상학자들은 ZR 관계식($R=AZ^b$)의 매개변수(A 와 b)를 실시간으로 추정하는 방법들을 적용하여 왔다(MRI, 2004; Suk et al., 2005; Kim and Yoo, 2014). 이에 비해 지상에 떨어진 강우의 양을 중요시하게 여겼던 국내 수문학자들은 레이더 강우를 정량적으로 우량계 강우와 비슷하게 맞추는 통계적 방법들을 적용하였다. G/R 비를 레이더 강우에 곱하는 방법(Yoo et al., 2013), Co-Kriging (Krajewski, 1987; Seo et al., 1990) 및 SCM (Kim et al., 2008) 등이 대표적인 예이다.

수문 전문가들이 주로 사용하여 왔던 레이더 강우를 우량계 강우와 유사하게 만드는 통계적인 기법들은 그러나 다음과 같은 문제점이 존재한다. 레이더 강우는 레이더 편파변수를 비선형 관계식, 예를 들어 ZR 관계식에 입력하여 추정되는 것이기에 레이더 편파변수에 오차가 내재되어 있다면 레이더 강우에 비선형적으로 전파되고 이러한 비선형적으로 전파된 오차를 내재한 레이더 강우를 통계적인 기법으로 보정하게 되면 그 오차는 더욱 증폭될 가능성이 크다. 일례로 국내에서 쉽게 적용되어 왔던 G/R 비를 레이더강우에 곱하는 방법은 레이더 강우를 정량적으로 우량계 강우와 유사하게 만들 수는 있으나 오차의 변동성을 높이고 상관성을 감소시키는 방법이었다(Yoo et al., 2013; Yoo et al., 2016; Yoon, Choi, et al., 2016).

국내 기상 및 수문학자들은 S밴드 이중편파레이더가 도입되면 이러한 레이더 강우의 편의가 제거 될 것이라 생각하였다. 이에 국토교통부 한강홍수통제소에서 도입된 비슬산레이더가 최초의 S밴드 이중편파레이더로 2009년에 도입된 이후 이중편파레이더가 도입되게 된다. 그러나 S-밴드 이중 편파레이더에서 제공되는 편파변수로 추정된 레이더강우의 정확도는 편파변수에 대한 조절 없이는 단일편파레이더와 비슷한 수준으로 나타났다(Yoon, Suk, et al., 2016). 이에 Yoon, Suk, et al. (2016)의 연구에서는 WRC (2015)에서 개발한 $Z-Z_{DR}$ 관계와 $Z-K_{DP}$ 관계를 이용하여 Z , Z_{DR} , K_{DP} 를 동시에 조절하여 레이더강수량의 품질을 향상시켰다. 그 결과 70%

이상의 레이더 강우의 정확도($1-NE$)를 확보하였다.

Yoon, Suk, et al. (2016) 연구에서 주목할 것은 반사도의 편의를 제거해야 70% 이상의 정확도를 확보할 수 있다는 점이었다. 심지어 반사도만을 이용하여 추정된 레이더 강우 역시도 반사도의 편의를 제거해주면 70% 이상의 정확도를 확보할 수 있었다. 이는 국내 레이더에서 제공되고 있는 레이더 반사도에 매우 큰 오차가 내재되어 있음을 의미한다. 즉, 레이더 강우의 편의는 레이더 반사도의 오차에 기인해 왔었던 것이다. 사실 국내 기상레이더로부터 제공되어 오던 레이더 반사도 오차는 Park and Lee (2010)에서 최초로 제시하였다. Park and Lee (2010)는 지상의 관측 기기로부터 추정된 DSD를 이용하여 한 기상레이더를 보정하고 그 보정된 기상레이더를 이용하여 전국 기상레이더의 반사도 보정 값을 제시한바 있다. 그 결과 전국 기상레이더의 반사도는 작게는 -3 dBZ에서 크게는 -12 dBZ 정도의 오차가 발생하는 것으로 밝혀졌다.

본 연구에서는 지난 10년 동안 국내에서 제기되어 온 레이더 강수 추정량의 과소한 문제점에 대한 해결책을 제시하기 위해 레이더 반사도에 내재되어 있는 오차를 정량화 하였다. 이를 위해 Yoon (2013)에서 이론적으로 유도된 레이더 반사도 편 의 식과 Yoon, Suk, et al. (2016)의 경험적 방법을 이용하여 레이더 반사도의 오차를 추정하였다.

2. 이 론

2.1 레이더 강우의 오차

레이더 반사도 자료 산출 과정에는 다양한 오차가 포함될 수 있으며, 이러한 오차는 레이더 강우에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 레이더 반사도의 오차는 보통 다음과 같이 정의될 수 있다(Koistinen et al., 2004).

$$\epsilon(X, h) = 10 \log \frac{Z(X, h)}{Z_T(X, h)} = z(X, h) - z_T(X, h) \quad (1)$$

여기서, $\epsilon(X, h)$ 는 거리 r 과 방위각 θ 로 정의되는 위치 X 와 고도 h 에서의 오차를 의미하고 단위는 dBZ이다. $Z(X, h)$ 와 $z(X, h)$ 는 (X, h) 지점에서의 반사도를 의미하며 각각 mm^6/m^3 과 dBZ의 단위를 갖는다. $Z_T(X, h)$ 와 $z_T(X, h)$ 는 참값의 반사도를 나타낸다.

반사도 z 의 평균은 Eq. (1)로부터 참값의 반사도 z_T 의 평균과 오차 ϵ 의 평균의 합으로 정의될 수 있다. z_T 는 참값이기 때문에 그 자체가 평균의 값과 같으며 오차 ϵ 의 평균은 편 의 μ_ϵ 로 정의하였다. 따라서 반사도 z 의 평균은 $z_T + \mu_\epsilon$ 가 된다. 반사도 z 의 분산 역시도 참값의 반사도 z_T 의 분산과 오차 ϵ 의 분산의 합으로 정의 될 수 있다. 물론 참값의 반사도 z_T 의 분산은 0이기 때문에 반사도 z 의 분산은 결국 오차 ϵ 의 분산과 같다. 오차 ϵ 의 분산은 σ_ϵ^2 으로 정의하였다.

따라서 반사도 z 의 분산은 σ_z^2 가 된다.

Yoon (2013)에서는 정규분포를 따르는 것으로 가정된 레이더 반사도에 편 μ_z 와 오차분산 σ_z^2 이 존재하는 경우 함수변환을 통해 레이더 강우 R 의 평균 μ_R 과 분산 σ_R^2 를 다음과 같이 유도하였다.

$$\mu_R = \exp\left[\frac{(z_T + \mu_z - a)}{(10b/\ln 10)} + 0.5(\sigma_z^2 / (10b/\ln 10))^2\right] \quad (2)$$

$$\sigma_R^2 = \mu_R^2 \left[\exp\left[\frac{\sigma_z^2}{(10b/\ln 10)}\right] - 1 \right] \quad (3)$$

또한 Yoon (2013)에서는 비율(ratio)로 표현되는 레이더 강우 R 의 편의를 다음과 같이 유도하였다.

$$B = \mu_R / R_T = \exp\left[\frac{\mu_z}{(10b/\ln 10)} + 0.5(\sigma_z^2 / (10b/\ln 10))^2\right] \quad (4)$$

Eq. (4)를 살펴보면, 비율로 표현되는 R 의 편 B 는 반사도의 편 μ_z , 오차분산 σ_z^2 그리고 ZR 관계식의 b 로 표현될 수 있다. 이러한 Eq. (4)로부터 μ_z 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mu_z = (10b/\ln 10) \cdot \ln(B) - \frac{0.5\sigma_z^2}{(10b/\ln 10)} \quad (5)$$

2.2 경험적 방법을 이용한 레이더 반사도 편 추정

Yoon, Suk, et al. (2016)에서 제시한 경험적 방법은 WRC (2015)에서 제시한 $Z-Z_{DR}$ 및 $Z-K_{DP}$ 관계를 이용하여 레이더 변수를 조절 후 레이더 강수량의 정확도를 향상시킨 방법이다. 본 방법의 과정은 다음과 같다. 먼저, 우량계 지점과 동일한 레이더 지점에서의 호우사례 전체 시간에 대한 $Z-Z_{DR}$ 의 이변량 분포와 $Z-K_{DP}$ 의 이변량 분포를 추출한다. 그리고 그 이변량 분포의 최빈값이 이중편파변수 관계 위에 있도록 한다. 그러나 문제는 최빈값이 이중편파변수의 어느 곳에 위치해 있느냐 이다. 이에 0에서 10등급까지 반사도를 0 dBZ에서 10 dBZ까지 1 dBZ 간격으로 가산하여 이때 이변량 분포의 최빈값이 이중편파변수 관계 위에 있도록 Z_{DR} 과 K_{DP} 를 증감한다.

각 등급에 따른 Z , Z_{DR} , K_{DP} 를 산정하여 레이더 강수를 추정하고 그 레이더 강수의 정확도를 산정하여 최고 등급에서의 Z , Z_{DR} , K_{DP} 를 최적의 편파변수로 보았다. 이때 사용된 정량적 정확도 기준은 Eq. (6)과 같은 $1-NE$ 이다. $1-NE$ 는 1에서 NE (Normalized Error)를 뺀 후 백분율화 한 값으로 100%에 가까울수록 품질이 높음을 의미한다. 이러한 $1-NE$ 는 편의와 변동성이 함께 정량화된 값이기 때문에 최대값을 나타내는 $1-NE$ 에서 편의와 변동성이 혼합된 오차가 최소가 됨을 의미한다.

$$1-NE = \left(1 - \frac{\sum |R_i - G_i|}{\sum G_i} \right) \times 100(\%) \quad (6)$$

여기서, R_i 는 레이더 강수량을, G_i 는 우량계 강수량을 나타낸다.

본 연구에서는 단일편파인 반사도만을 적용하기 때문에 Yoon, Suk, et al. (2016)의 방법에서와 같이 반사도만을 조절해가며 레이더 강수의 정확도가 최적이 되는 레이더 반사도를 결정하였다. 이를 위해 반사도를 0 dBZ에서 20 dBZ까지 1 dBZ 간격으로 가산하였다.

3. 대상 영역 및 적용자료

본 연구에서는 관악산기상레이더를 적용하였다. 관악산기상레이더는 1969년 수도권 기상감시를 목적으로 도입된 국내 최초의 기상레이더이다. 관악산기상레이더는 최초 도입 후 1988년과 2005년에 각각 C밴드와 S밴드 도플러 레이더로 교체되었다. 관악산기상레이더가 S밴드 레이더로 교체되어 관측이 개시된 시점이 2005년 12월이고 2016년부터 이중편파레이더로 교체되었기 때문에 본 연구에서는 2006년부터 2015년까지 6월에서 10월 사이의 189개 강수 사례를 적용하였다.

레이더 반사도는 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 공간 해상도와 10분 시간 해상도의 1.5 km CAPPI로 표출되었고 레이더 강우 강도로 변환하기 위해 $A=300$, $b=1.4$ 를 적용하였다. 10분 단위의 레이더 강우 강도는 1시간 단위의 레이더 강수량으로 변환하였고 이러한 1시간 단위의 레이더 강수량은 레이더 반경 100 km 이내의 AWS 1시간 단위 강수량과 비교하였다(Fig. 1).

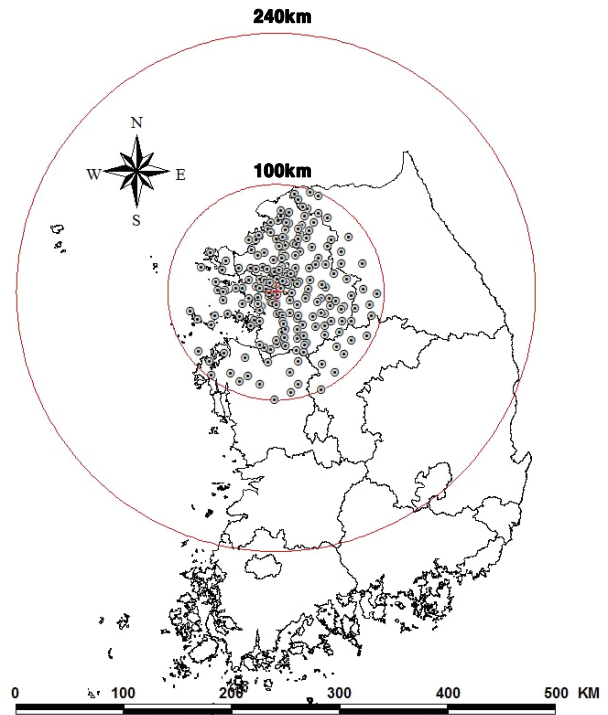


Fig. 1. Location of Kwanaksan Weather Radar and AWS Within Radar Range of 100km

4. 레이더 반사도 오차 정량화

4.1 레이더 강우 추정 편의를 이용한 반사도의 편의 산정

본 연구에서는 총 189개의 강수 사례를 이용하여 레이더 반사도의 오차를 정량화하였다. Fig. 2(a)는 189개 강수 사례에 대한 레이더 강우와 우량계 강우의 상관계수를 나타낸다. 그림에서와 같이 레이더 강우와 우량계 강우의 상관계수는 0.6 이상으로 그 변수들 간의 상관성이 높게 나타나고 있다. Fig. 2(b)는 우량계 평균강우량과 레이더 평균강우량의 산점도를 나타낸다. 전체 강수 사례에 대한 우량계강우의 평균은 4.79 mm이며, 레이더강우의 평균은 1.78 mm로 레이더 강우는 우량계 강우에 비해 정량적으로 37% 정도로 나타나고 있다.

Fig. 3은 우량계 평균강우량과 레이더 평균강우량에 따른 추정 편의 \hat{B} 의 역수를 나타낸다. Eq. (4)에서 레이더 강우 편의를 레이더 강우와 참값의 강우의 비로 정의되며 추정 편의 \hat{B} 는 레이더 강우와 우량계 강우의 비로 산정하였다.

또한 Fig. 3에서 \hat{B} 의 역수로 표현한 것은 \hat{B} 의 역수가 클수록 편의가 크다는 것을 보여주기 위함이다. 그림에서와 같이 \hat{B} 의 역수는 우량계의 평균강우량이 작은 부분에서는 변동성이 크게 나타나다 그 평균강우량 값이 커질수록 대략 2~3 사이 값으로 수렴하는 것으로 나타나고 있다. 이는 곧 실제 지상에 떨어지는 강우량이 작은 경우 레이더의 편의가 변동성이 크게 나타나고 있으나 레이더강우가 큰 경우에는 그 편의가 어느 정도 일정하게 나타남을 의미한다. 한편 레이더의 평균강우량에 따른 \hat{B} 의 역수를 살펴보면, \hat{B} 의 역수가 레이더강우량의 크기에 반비례 관계로 명확히 나타나고 있다. 즉, 레이더강우량이 작은 경우는 그 편의가 매우 크게 나타나며 큰 경우는 대략 2~3 정도로 수렴함을 의미한다.

레이더 반사도의 편의를 Eq. (5)로부터 산정할 수 있다. Eq. (5)의 B 는 Fig. 3에서 산정한 \hat{B} 를 적용하였고 b 는 본 연구에서 적용한 ZR 관계식의 1.4이다. 그러나 오차분산인 σ_z^2 는 산정할 수 없다. 이에 오차분산을 0으로 가정하여 레이더 반사도의 편의를 산정한 결과가 Fig. 4와 같다. 그림에

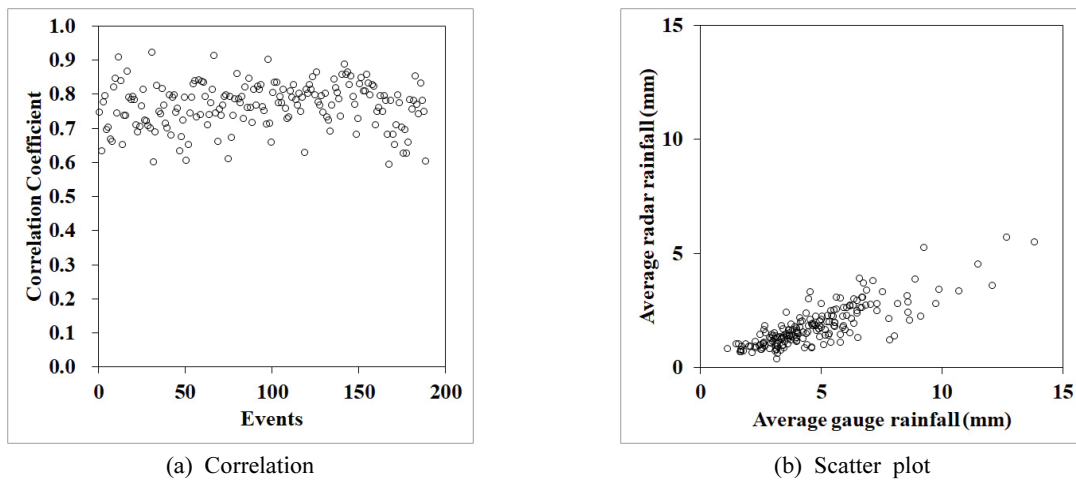


Fig. 2. Correlation and Scatter Plot Between Gauge Rainfall and Radar Rainfall

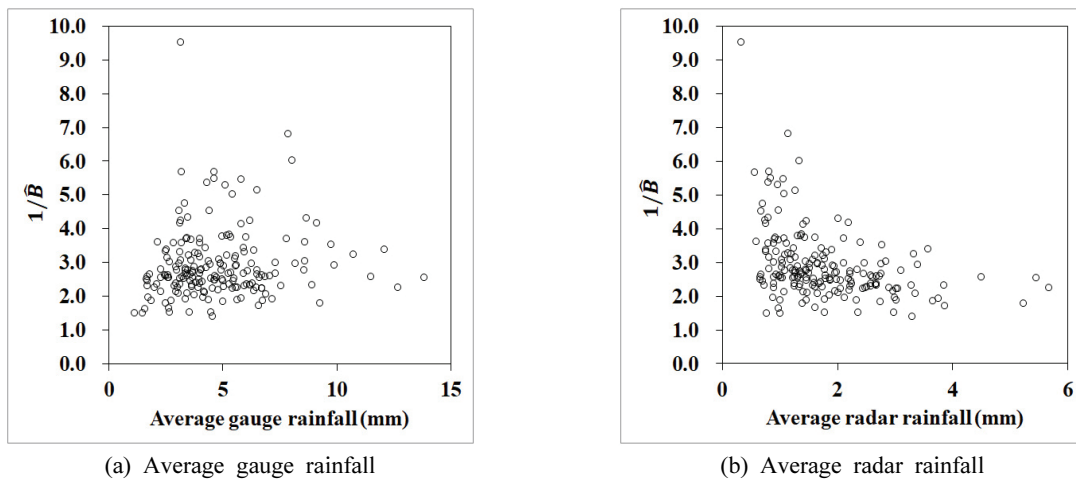


Fig. 3. Estimated Bias of Radar Rainfall with Respect to Average Rainfall

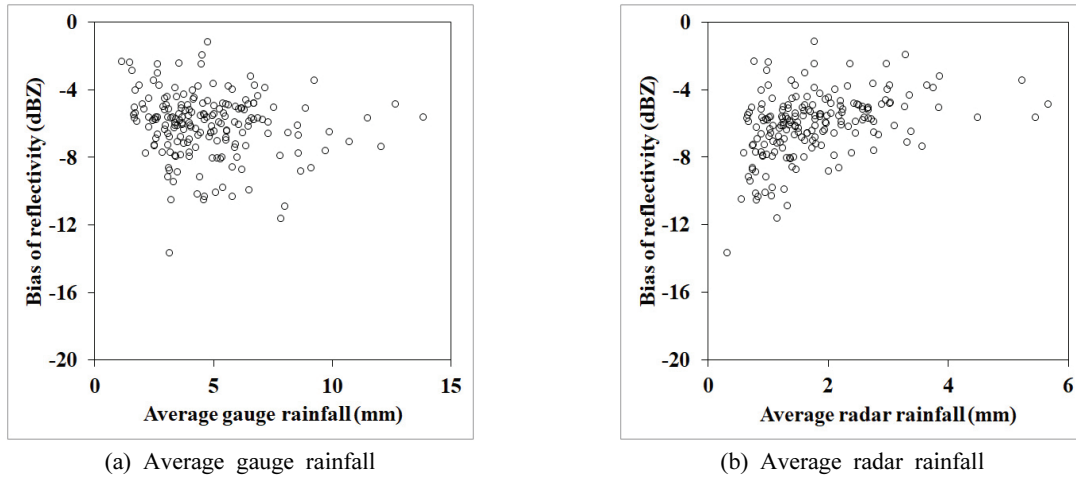


Fig. 4. Bias of Reflectivity in the Case of Assuming Error Variance is 0

서와 같이 레이더반사도의 편이는 우량계의 평균강우량이 작은 부분에서는 변동성이 크게 나타나다 그 평균 강우량 값이 커질수록 대략 -5~-6 dBZ 사이 값으로 수렴하는 것으로 나타나고 있다. 한편 레이더의 평균강우량에 따른 레이더 반사도의 편이를 살펴보면, 편이가 레이더강우량의 크기에 반비례 관계로 명확히 나타나고 있다. 즉, 레이더강우량이 작은 경우는 그 편이가 매우 크게 나타나며 큰 경우는 대략 -5~-6 dBZ 정도로 수렴함을 의미한다. 전체적으로 레이더 반사도의 편이는 -1 dBZ에서 -14 dBZ로 나타났다.

레이더 반사도는 Fig. 4에서와 같이 산정된 반사도의 편이를 이용하여 보정할 수 있다. 예를 들어 2013년 7월 22일 호우사례의 \hat{B} 는 0.296이며 Eq. (5)로부터 오차분산이 0인 경우에 산정된 반사도 편이는 -7.402 dBZ이다. 편이 값이 음수이기 때문에 반사도의 편이를 보정하기 위해서는 관측 반사도에 7.402를 더해 주어야 한다. Fig. 5는 2013년 7월 22일 호우사례의 반사도 편이 보정 전후의 우량계 강우와 레이더 강우의 산점도를 나타낸다. 그림에서와 같이 편이

보정 전 레이더 강우는 그 편이가 크게 나타나 29.247%의 1-NE 값을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 우량계 강우가 최대가 나타난 지점에서(110.5 mm)에서 레이더 강우는 22.87 mm로 나타나고 있다. 이는 우량계강우량의 대략 20.7%에 불과한 양으로 레이더 강우가 매우 과소하게 추정되고 있음을 나타낸다.

한편 보정 이후에는 그 편이가 다소 개선되어 73.543% 1-NE 값으로 나타났다. 이는 편이 보정으로 44.296%의 개선 효과를 보인 결과이다. 앞서 우량계 강우가 최대가 나타난 지점에서 레이더 강우는 77.25 mm로 나타나고 있으며 이는 그 우량계 강우의 대략 69.9%에 해당하는 양이다. 그러나 이러한 편이 보정 이후에도 레이더 강우는 여전히 우량계 강우에 비해 작게 나타나고 있다. 이는 앞서 Eq. (5)에서 오차분산 σ_z^2 를 0으로 가정하였기 때문이다. 만약 오차분산이 존재하는 경우 Eq. (5)의 우측 두 번째 항은 음수 값이기 때문에 레이더반사도의 편이는 오차분산이 0으로 가정한 경우에 산정된 값보다 더 커질 수밖에 없다. 즉, 오차분산이

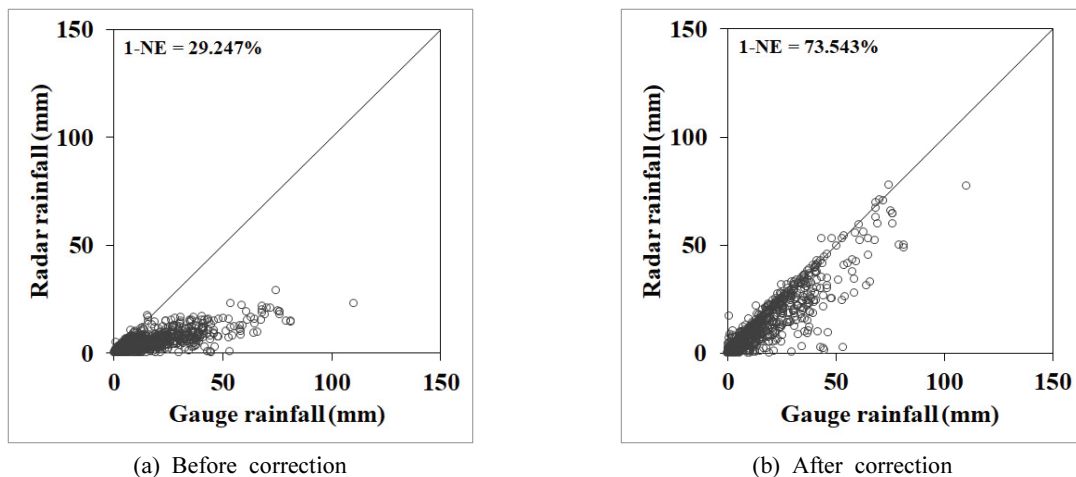


Fig. 5. Scatter Plots Between Gauge Rainfall and Radar Rainfall Before and After Correction for Reflectivity Bias

존재하는 경우 2013년 7월 22일 호우사례의 반사도 편의 역시도 -7.402보다 더 음의 값으로 커야 한다.

4.2 경험적 방법을 이용한 반사도 편의 산정과 오차분산 추정

Fig. 6은 Yoon, Suk, et al. (2016)에서 적용한 경험적 방법을 이용하여 산정된 조절등급에 따른 레이더강우량의 정확도이다. 적용된 호우사례는 2013년 7월 22일 사례이다. 그림에서와 같이 레이더강우량의 정확도는 조절등급이 높아짐에 따라 증가하다 10 등급에서 최고값을 나타내고 있다. 그리고 10 등급 이후부터는 정확도가 감소하는 것으로 나타나고 있다. 레이더 반사도에 10 dBZ를 가산해야 최소의 오차를 나타내므로 이 호우사례에서 경험적으로 산정된 레이더편의는 -10 dBZ 임을 의미한다. 이는 앞서 오차분산이 0으로 가정한 경우에서 산정된 -7.402 dBZ보다 2.598 dBZ 더 낮은 값이다. 이러한 2.598 dBZ 부분의 편의는 앞서 설명한 바와 같이 오차분산으로 인한 것이다. Eq. (5)로부터 오차분산을 역으로 추정하면 오차분산은 5.621^2 dBZ²로 추정된다.

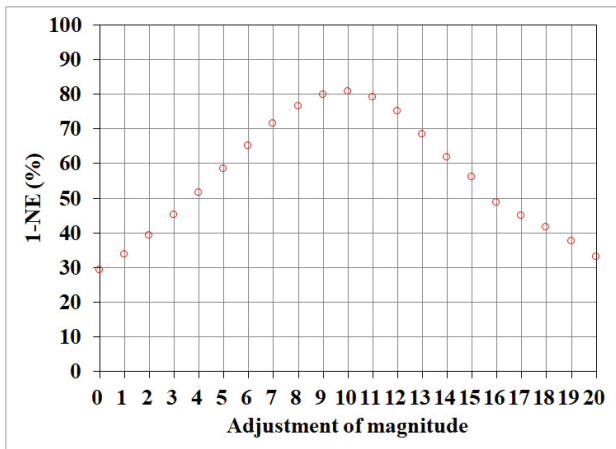


Fig. 6. Accuracy of Radar Rainfall with Respect to Adjustment of Reflectivity Bias (22 JUL 2013)

Fig. 7(a)은 우량계 강우와 실제 레이더 반사도의 편의가 보정된 레이더강우와의 산점도를 나타낸다. 레이더 강우의 정확도는 80.802%의 1-NE 값을 나타내고 있으며 이는 오차분산을 0으로 가정한 경우에 비해 7.259% 높은 값이다. 이 경우 우량계 강우가 최대로 나타난 지점에서(110.5 mm)에서 레이더 강우는 109.23 mm로 나타나고 있으며 이는 우량계 강우의 대략 98.9%에 해당하는 양이다. 그림에서와 같이 레이더 강우의 편의는 거의 제거되었고 무작위 오차만이 남아 있다. 한편 Fig. 7(b)은 우량계 강우와 G/R비를 이용하여 보정된 레이더 강우의 산점도를 나타낸다. G/R비를 이용하여 보정된 레이더 강우는 양적으로 우량계강우와 거의 유사해졌음을 알 수 있다. 즉, 편의는 거의 제거되었다. 그러나 무작위 오차가 너무 크게 나타나고 있어 1-NE의

값도 반사도 편의를 보정한 경우에 비해 25.575%나 작은 55.227%에 불과하였다. 이러한 결과로부터 본 연구의 방법보다 G/R비를 이용하여 보정하는 경우 레이더 강우의 편의는 제거 되고 있으나 오차에 대한 변동성이 높아지고 있음을 확인할 수 있다.

전체 강우사례에 대한 레이더 반사도의 실제 편의를 구한 결과가 Fig. 8과 같다. 전체적으로 레이더 반사도의 편의는 -3 dBZ에서 -15 dBZ로 나타났다. 그림에서와 같이 레이더 반사도 편의의 경향성은 앞서 오차분산이 0인 경우와 크게 달라진 것은 없다. 다만 그 편의가 앞선 경우보다 크게 나타나고 있을 뿐이다. 한편 Fig. 9는 우량계 평균강우량과 레이더 평균강우량에 따른 오차분산을 나타낸다. 그림에서와 같이 오차분산은 $2^2 \sim 8^2$ dBZ² 사이에서 변동하는 것으로 나타나고 있다.

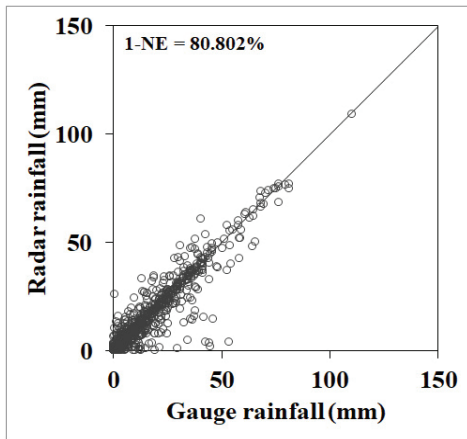
레이더 반사도의 편의를 보정하기 위해서는 레이더 반사도에 편의의 크기만큼을 더해주면 된다. 그러나 오차분산은 무작위 오차로 나타나는 부분이기 때문에 그 제거가 편의를 제거하는 것과 같이 쉽지 않다. 예를 들어 관악산레이더의 경우 반사도에 2013년 7월 22일 호우사례의 편의 7.402 dBZ를 더해주면 Eq. (5)에서 B는 1이 되어 우측 첫 번째 항은 0이 되나 σ_z^2 는 여전히 남아있게 된다. 즉, 레이더 강우의 추정 편의 \hat{B} 를 적용하여도 오차분산으로 인해 레이더 강우의 편의가 여전히 나타날 수 있다.

5. 결론

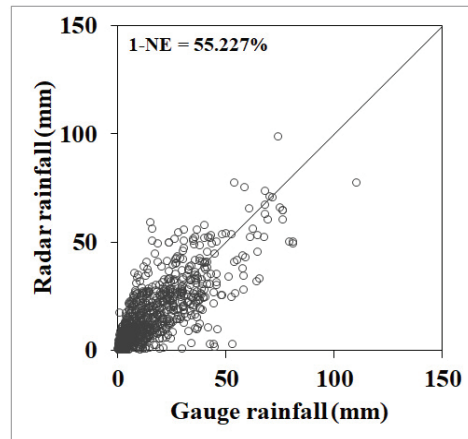
본 연구에서는 지난 10년 동안 국내에서 제기되어 온 레이더 강우의 과소한 문제점에 대한 해결책을 제시하기 위해 레이더 반사도에 내재되어 있는 오차를 정량화 하였다. 이를 위해 2006년부터 2015년까지 6월에서 10월 사이의 189개 강수 사례를 적용하였으며 그 결과는 다음과 같다.

첫 번째, 189개 전체 강수 사례에 대한 우량계강우의 평균은 4.79 mm이고 레이더강우의 평균은 1.78 mm로, 레이더 강우는 우량계 강우에 비해 정량적으로 37% 정도에 불과하였다. 레이더 강우의 추정 편의 \hat{B} 에 대한 역수는 우량계의 평균강우량이 작은 부분에서는 변동성이 크게 나타나다 그 평균강우량 값이 커질수록 대략 2~3 사이 값으로 수렴하는 것으로 나타나고 있었다. 한편, 레이더의 평균강우량에 따른 \hat{B} 의 역수는 레이더 평균강우량의 크기에 반비례 관계로 명확히 나타났다.

두 번째, 레이더 반사도의 편의는 우량계의 평균강우량이 작은 부분에서는 변동성이 크게 나타나다 그 평균 강우량 값이 커질수록 대략 -5~-6 dBZ 사이 값으로 수렴하는 것으로 나타났다. 한편 레이더의 평균강우량에 따른 레이더 반사도의 편의는 레이더 평균강우량이 작은 경우 그 편의가 매우 크게 나타나며 큰 경우에는 대략 -5~-6 dBZ 정도로 수렴하였다. 전체적으로 레이더 반사도의 편의는 -1 dBZ에서 -14 dBZ로 나타났다.

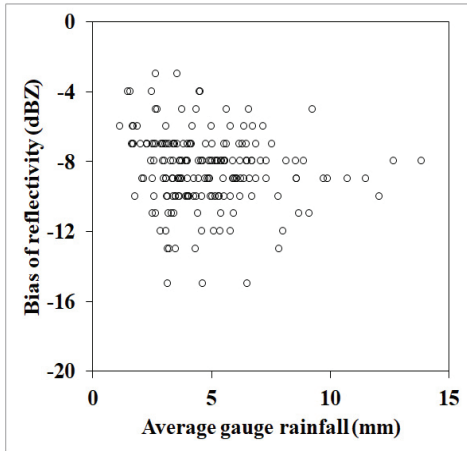


(a) Method in this study

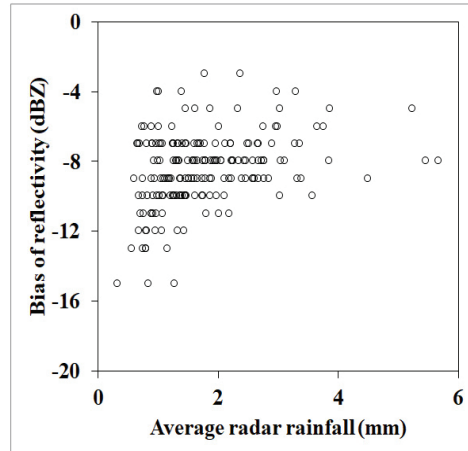


(b) G/R method

Fig. 7. Scatter Plots Between Gauge Rainfall and Radar Rainfall Corrected by the Method in this Study and G/R Method (22 JUL 2013)

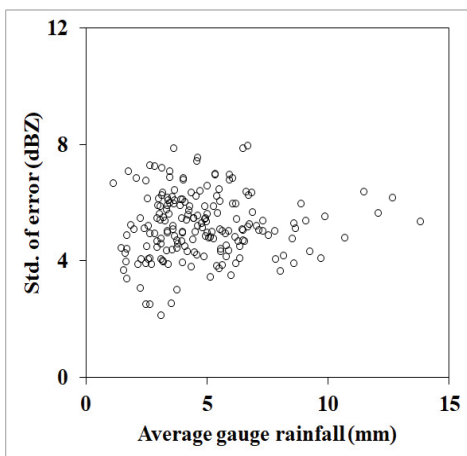


(a) Average gauge rainfall

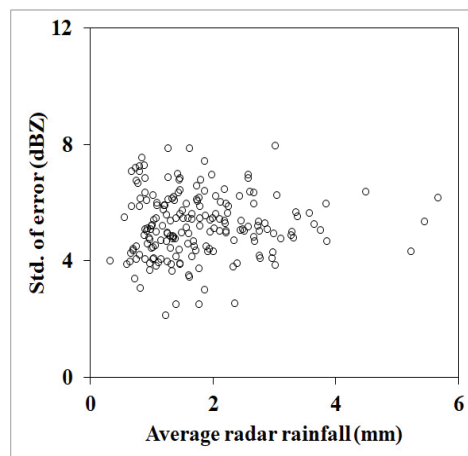


(b) Average radar rainfall

Fig. 8. Bias of Reflectivity with Respect to Average Rainfall



(a) Average gauge rainfall



(b) Average radar rainfall

Fig. 9. Error Variance of Reflectivity with Respect to Average Rainfall

세 번째, 우량계 강우와 레이더 강우로부터 추정된 \hat{B} 를 이용한 반사도 편의 보정 이후에도 레이더강우량은 여전히 우량계 강우량에 비해 작게 나타나고 있다. 이는 오차분산 σ_z^2 를 0으로 가정하였기 때문에 오차분산이 존재하는 경우 레이더 반사도의 편의는 오차분산을 0으로 가정한 경우에 산정된 편의 보다 더 커져야 한다. 이에 Yoon, Suk, et al. (2016)에서 적용한 경험적 방법을 이용하여 실제 레이더 반사도의 편의를 추정하였다. 그 결과 레이더 반사도의 편이는 -3 dBZ에서 -15 dBZ까지 나타났다.

네 번째, 경험적 방법으로 추정된 실제 레이더 반사도의 편의와 레이더 강우의 추정 편의 \hat{B} 를 이용하여 레이더 반사도 오차분산을 추정한 결과 $2^2 \sim 8^2$ dBZ² 사이의 범위로 나타났다. 이러한 오차분산으로 인한 레이더 강우의 편이는 레이더의 환경(온도 및 습도) 변화로 인한 것으로 어쩔 수 없이 나타나는 편의이다. 이와 같은 편의는 이중편파레이더의 경우에는 Self-consistency를 통해 보정이 가능하며 단일편파레이더의 경우에는 본 연구에서와 같은 방법으로 경험적으로 보정해야 한다.

레이더 강우는 수문 분야에서의 높은 활용 가능성에도 불구하고 그 정확도에 대한 문제점으로 자료 활용성에 대한 의구심이 제기되어 왔다. 그러나 본 연구를 통해 레이더 반사도의 오차를 정량화하고 보정한다면 레이더 강우의 활용성은 매우 높아질 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원 (18AWMP-B079625-05)에 의해 수행되었습니다.

References

- Atlas, D. (2002). Radar calibration: Some simple approaches. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 83, pp. 1313-1316.
- Gosset, M., Zahiri, E.P., and Moumouni, S. (2010). Rain drop size distribution variability and impact on X-band polarimetric radar retrieval: Results from the AMMA campaign in Benin. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 136, No. s1, pp. 243-256.
- Kim, J., and Yoo, C. (2014). Using extended Kalman filter for real-time decision of parameters of Z-R relationship. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 2, pp. 119-133.
- Kim, K., Choi, J., and Yoo, C. (2008). Synthesis of radar measurements and ground measurements using the successive correction method (SCM). *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 7, pp. 681-692.
- Koistinen, J., Michelson, D.B., Hohti, H., and Peura, M. (2004). Operational measurement of precipitation in cold climates. *Weather Radar*, Edited by P. Meischner, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 78-114.
- Krajewski, W.F. (1987). Cokriging of radar-rainfall and rain gage data. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92, No. D8, pp. 9571-9580.
- Krajewski, W.F., and Smith, J.A. (2002). Radar hydrology: Rainfall estimation. *Advances in Water Resources*, Vol. 25, No. 8-12, pp. 1387-1394.
- MRI (Meteorological Research Institute). (2004). *Development of METRI X-Band Doppler weather radar operations and radar data analysis technique (IV)*. Seoul, Korea, p. 224.
- Park, S.G., and Lee, G.W. (2010). Calibration of radar reflectivity measurements from the KMA operational radar network. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 46, No. 3, pp. 243-259.
- Seo, B.C., and Krajewski, W.F. (2011). Investigation of the scale-dependent variability of radar-rainfall and rain gauge error covariance. *Advances in Water Resources*, Vol. 34, No. 1, pp. 152-163.
- Seo, D.J., Krajewski, W.F., and Bowles, D.S. (1990). Stochastic interpolation of rainfall data from rain gages and radar using cokriging: 1. Design of experiments. *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 3, pp. 469-477.
- Suk, M., Nam, K., Kim, Y., and Oh, S. (2005). Estimation of quantitative rain intensity from radar reflectivities using a window probability matching method. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 41, No. 1, pp. 123-138.
- WRC (Weather Radar Center). (2015). *Development and application of cross governmental dual-pol. radar harmonization*. Seoul, Korea.
- Yoo, C., Park, C., Yoon, J., and Kim, K. (2013). Interpretation of mean-field bias correction of radar rain rate using the concept of linear regression. *Hydrological Processes*, Vol. 28, No. 19, pp. 5081-5092.
- Yoo, C., Yoon, J., Kim, J., and Ro, Y. (2016). Evaluation of the gap filler radar as an implementation of the 1.5 km CAPPI data in Korea. *Meteorological Applications*, Vol. 23, pp. 76-88.
- Yoon, J. (2013). *Studies on the error structure of the radar reflectivity to estimate the bias of the radar rain rate*. Ph.D. dissertation, Korea University, Seoul,

Korea.

- Yoon, J., Choi, J., Yoo, C., and Kim, K. (2016). The runoff uncertainty caused by the mismatch between the radar rain rate and the topographical information data. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 20, No. 2, pp. 960-970.
- Yoon, J., Joo, J., Yoo, C., Hwang, S., and Lim, S. (2017). On quality of radar rainfall with respect to temporal and spatial resolution for application to urban area. *Meteorological Applications*, Vol. 24, No. 1, pp. 19-30.
- Yoon, J., Suk, M-K., Nam, K-Y., and Park, J-S. (2016). Application of an empirical method to improve radar rainfall estimation using cross governmental dual-pol. radars. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 7, pp. 625-634.

Received	■	May 18, 2018
-----------------	---	--------------

Revised	■	May 18, 2018
----------------	---	--------------

Accepted	■	May 23, 2018
-----------------	---	--------------