

# 수문학적 활용을 위한 레이더 강우의 정확도 평가 방법

## A Method to Evaluate the Radar Rainfall Accuracy for Hydrological Application

배 덕 효\* / 트란 앙 푸옹\*\* / 윤 성 심\*\*\*

Bae, Deg-Hyo / Tran Anh Phuong / Yoon, Seong-Sim

### Abstract

Radar measurement with high temporal and spatial resolutions can be a valuable source of data, especially in the areas where rain gauge installment is not practical. However, this kind of data brings with it many errors. The objective of this paper is to propose a method to evaluate statistically the quantitative and qualitative accuracy at different radar ranges, temporal intervals and raingage densities and use a bias adjustment technique to improve the quality of radar rainfall for the purpose of hydrological application. The method is tested with the data of 2 storm events collected at Jindo (S band) and Kwanak (C band) radar stations. The obtained results show that the accuracy of radar rainfall estimation increases when time interval rises. Radar data at the shorter range seems to be more accurate than the further one, especially for C-band radar. Using the Monte Carlo simulation experiment, we find out that the sampling error of the bias between radar and gauge rainfall reduces nonlinearly with increasing raingage density. The accuracy can be improved considerably if the real-time bias adjustment is applied, making adjusted radar rainfall to be adequately good to apply for hydrological application.

**Keywords** : Radar rainfall, accuracy, hydrological application, sampling error, time interval, radar range

### 요 지

고해상도의 시공간 분해능을 갖는 레이더 추정강우는 특히 강우계가 설치되어 있지 않은 지역에서 수문학적 활용에 유용한 정보를 제공할 수 있으나, 레이더 관측자료는 기본적으로 많은 오차 요소를 포함하고 있다. 이러한 이유로 레이더 자료를 특정한 목적에 활용하기 위해서는 그 목적에 적합한 자료의 평가가 요구된다. 본 연구에서는 레이더 추정강우의 수문학적 활용을 위한 정성적, 정량적 정확도 평가 방법 및 절차를 제안하고자 한다. 제안한 방법의 적용을 위해 진도(S-band) 및 관악산(C-band) 레이더와 자동기상관측장비시스템(Automatic Weather Stations, AWS)내 강우계의 자료를 이용하였으며, 대표적인 두 호우사상에 대한 적용성을 검토하였다. 연구 결과, 관측누적시간이 증가할수록 레이더 추정강우의 정확도가 증가하고, 레이더 사이트의 관측반경이 짧을수록 레이더 추정강우의 정확도가 향상되는 것을 파악할 수 있었으며, 특히 C-band 레이더의 경우 그 경향이 더 명확하게 나타났다. 또한 강우계 관측망의 밀도에 따른 평균편이 표준오차를 조사하기 위해 Monte Carlo 모의실험을 수행하였으며, 그 결과 강우계 밀도

\* 세종대학교 물자원연구소 · 토목환경공학과 교수

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

\*\* 세종대학교 토목환경공학과 석사과정

Ms.D Candidate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

\*\*\* 교신저자, 세종대학교 토목환경공학과 박사과정

Corresponding Author, Ph.D Candidate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea  
(e-mail: lome970303@paran.com)

의 감소에 따라 편이오차가 증가하는 것으로 나타났으며, 이를 통해 강우계 관측망의 밀도가 레이더 강우추정의 정확도에 중요한 영향을 미치는 인자중에 하나라는 것을 확인하였다. 또한, 실시간 편차 보정기법은 현재의 국내 레이더의 수문학적 활용을 위해 필요한 과정이라 판단된다.

**핵심용어** : 정성적 및 정량적 정확도, 표본오차, 시간간격, 레이더 관측반경, 수문학적 적용

## 1. 서론

최근의 홍수 발생빈도는 다양한 인위적인 요소로 인해 증가하고 있으며, 이러한 위험요소들을 완화시키는 방법 중의 하나는 홍수에보의 질을 향상시키는 것이다. 홍수에보의 정확도를 향상시키기 위해서는 수문 및 기상 자료의 정확성, 홍수현상을 재현하는 수문모형의 적절성, 유출특성을 반영하는 지형정보의 활용 등의 복합적인 고려가 필요하다. 그 중 홍수에보 정확도 향상의 관건은 수문모형의 입력자료인 강우정보를 사전에 정확히 얻는 것이라 해도 과언이 아니다(Sun *et al.*, 2000). 그러나 현재의 강우관측망은 높은 시공간적 변동성을 갖는 강우자료를 측정하기에 충분하지 않으며, 특히 짧은 응답시간으로 인해 돌발홍수가 빈번히 발생하는 산악지역에서는 더욱 문제가 된다(Andrieu and Creutin, 1996; Sun *et al.*, 2000; Thielen *et al.*, 2000; Smith *et al.*, 2007). 이러한 측면에서 강우레이더는 지상관측망에 비해 큰 가능성을 지니고 있다. 넓은 지역에 대해 고해상도의 분해능을 갖는 레이더는 지표면 강우의 실시간 산정을 통해서 선택적으로 필요한 강우정보를 제공할 수 있다는 장점이 있다(Calheiros and Zawadzki, 1986; Sun *et al.*, 2000; Meischner, 2004; Germann *et al.*, 2006). 그러나 레이더 강우에는 다양한 원인으로 인해 오차가 포함되어 있으며, 레이더 강우가 수문모형의 입력자료로 사용될 때 이러한 오차요소들은 강우-유출 모형의 결과의 부정확성을 초래하는 근본 원인이 되어 레이더 강우를 수문학적으로 활용하는데 어려움으로 작용한다. 따라서 다양한 수문학 분야에 레이더 강우를 활용하기 위해서는 레이더 강우의 정확도를 평가하고, 오차요인을 분석하는 기법의 정립이 요구된다.

레이더 강우의 시공간적 정확성 평가에 관한 연구는 일부 연구자에 의해 수행되어 왔다. Zawadzki (1975)는 레이더 추정강우와 지상 관측강우 자료를 비교할 때 수 시간 동안의 총강우량은 어느 정도 일치성이 있다는 것을 제시하였다. 또한, 다양한 누적관측시간에 따른 레이더 강우의 정확도 평가에서 임의오차와 편이를 무시할 수 있는 정도의 적정 시간간격이 존재한다는 것을 제시한 바 있다. Calheiros and Zawadzki (1986)는 레이더

관측반경에 따른 강우계 강우(G)와 레이더 강우(R)의 보정인자(G/R)의 변동성 연구를 통해 관측반경이 증가할수록 보정인자의 값이 증가하는 것을 확인하였다. Anagnostou *et al.* (1998)은 WSR-88D 기상 레이더의 레이더 강우감지 조건부확률(Conditional Probability of Radar-rain Detection, CPRD)의 변화와 레이더 강우 및 지상 관측강우의 공간적 상관성(Correlation Coefficient, CC)을 연구하였으며, 그 결과 레이더 관측반경이 증가함에 따라 CPRD와 CC가 감소하나, CC는 CPRD에 비해 상대적으로 명확한 경향을 나타내지 않음을 제시하였다. 그러나 이와같은 결과는 강우형태 및 지역 레이더 특성에 따라 달리 나타날 수 있는 결과이나 아직 국내에서는 이와같은 연구를 체계적으로 수행한 바가 없다.

한편, 레이더 추정강우의 유출량 산정 영향 및 활용성에 관한 연구도 상당 부분 수행되었다(Collier and Knowles, 1986; Pessoa *et al.*, 1993; Borga, 2002; Carpenter and Georgakakos, 2004). 이들 대부분의 연구들은 유역출구에서의 유출량을 산정할 때 레이더 추정강우의 불확실성(오차)을 평가하는데 주력하였고, 이들 오차가 레이더 추정강우에서 기인한 것인지, 유출모형에 의한 것인지 평가하는 부분에서는 한계가 있었다. 이외에도 많은 연구에서 수문학적 활용을 위한 레이더 추정강우의 정확도를 언급하였지만, 레이더 강우자료의 수문학적 활용을 위해 레이더 추정강우의 정확도를 체계적으로 평가할 수 있는 방법론이 제시되어 있지 않다. 특히, 국내에서는 레이더 강우에 대해 Z-R 관계식의 산정 및 적용 결과의 평가에 관한 연구(김효경 등, 2002; 안상진과 김진국, 2003), 일정 유역을 대상으로 지상 강우계와 레이더 강우의 관측오차의 규모를 평가하는 연구를 수행하였다(유철상 등, 2007; 유철상 등, 2008). 또한 김진훈 등(2005)이 레이더 추정강우가 가질 수 있는 불확실성이 유출 모형에 미치는 영향을 평가하였으나, 레이더 강우의 수문학적 활용을 위한 체계적인 레이더 강우의 정확도 평가 방법은 제시된 바가 없다.

따라서 본 연구에서는 지역적 특성이 강한 레이더 추정강우의 수문학적 활용을 위해 국내 레이더 추정강우의 정확도를 정량적, 정성적으로 평가할 수 있는 방

법 및 절차를 제공하고자 한다. 2절에서는 레이더자료의 정확도 평가방법을 제시하고, 3절에서는 제안된 방법의 사례연구와 적용결과를 정리하였으며, 결론 및 향후과제는 4절에 제시하였다.

## 2. 레이더자료 평가방법

본 연구에서 제안하는 레이더 강우의 수문학적 활용을 위한 정확도 평가방법 및 절차를 요약하면 Fig. 1과 같다. 이는 크게 두 부분으로 나눌 수 있으며, 첫 번째 부분은 각 호우사상의 레이더 반사도와 자동기상관측장비시스템(Automatic Weather Stations, AWS)내 강우계 관측 강우를 이용하여 최소자승법(Least-square fitting)으로 Z-R 관계식을 개발한 후 레이더 강우를 산정하는 것이고, 나머지 한 부분은 개발된 식에 의해 산정된 레이더 강우의 정확도를 평가하는 것이다. 본 연구에서는 기본적으로 CAPPI 형식의 레이더 자료와 이에 대응되는 강우계 관측자료를 사용하였으며, 레이더 강우의 정확도 평가는 관측자료 시간간격과 레이더 관측반경 및 강우계 밀도를 고려하여 평가하였다. 이에 본 연구에서 제시한 평가방법을 Fig. 1의 각 단계별 수행과정으로 구분하여 설명하였다.

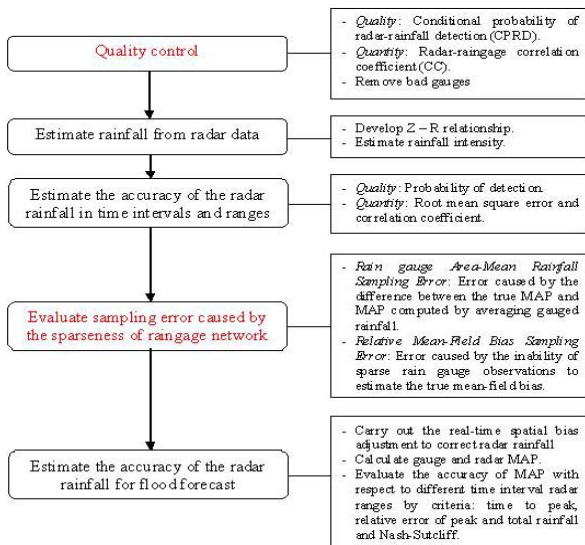


Fig. 1. Diagram for evaluating the accuracy of radar rainfall estimation

### 2.1 품질검사

본 단계는 레이더와 강우계 관측치 사이의 일치성을 확인하고 레이더 강우산정에 보다 적합한 품질을 갖는 강우계를 추출하는 과정이다. 이를 고려하기 위한 통계적 지표로 레이더 강우감지의 조건부확률(CPRD)과 레이더와 강우계의 상관계수(CC) 두 가지를 사용하였다.

자료의 질적 평가지표로 사용된 CPRD는 Eq. (1)과 같이 강우계가 위치한 레이더 격자에서 강우계가 관측한 강우조건에서 임계치 0 이상의 강우가 감지되는 확률로써 결정(Anagnostou *et al.*, 1998)되며, Eq. (2)의 CC는 i번째 강우계에서의 레이더 강우와 지상강우의 상관계수이다.

$$P(R > 0 | G > 0) = \quad (1)$$

$$\frac{H(R > 0, G > 0)}{M(R = 0, G > 0) + H(R > 0, G > 0)} \times 100$$

$$CC_i = \frac{\sum_{j=1}^m (R(i,j) - \overline{R(i)})(G(i,j) - \overline{G(i)})}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (R(i,j) - \overline{R(i)})^2 \sum_{j=1}^m (G(i,j) - \overline{G(i)})^2}} \quad (2)$$

여기서, H(R>0, G>0)는 지상강우가 0보다 클 때 레이더 강우도 0보다 큰 경우를 나타내며, M(R=0, G>0)은 지상강우는 0보다 크나 레이더 강우가 0인 경우를 나타낸다. R(i,j)와 G(i,j)는 j 시간의 i 번째 강우계에 해당하는 레이더와 강우계의 강우이다.  $\overline{R(i)}$ 와  $\overline{G(i)}$ 는 시간 평균된 i번째 강우계에 대응되는 레이더와 강우계의 강우이다. m은 적용자료의 기간을 나타낸다. 본 논문에서는 품질관리 검사를 통해 좋은 품질을 갖고 있다고 고려할 수 있는 CC가 0.3 이상이고, CPRD가 0.2 이상인 강우계만이 레이더 강우산정에 활용될 수 있도록 하는 것을 제안하였다.

### 2.2 레이더 자료를 이용한 강우 산정

본 연구에서는 레이더 강우 산정을 위해 각 호우사상별 반사도 Z(mm<sup>6</sup>/m<sup>3</sup>) 자료와 강우강도 R(mm/h) 자료 사이의 관계식을 구하였다(Krajewski and Smith, 2002; Morin *et al.*, 2003). 기존의 레이더 강우산정에 관한 연구들에서는 일반적으로 다음 Eq. (3)과 같이 Z와 R의 관계를 멱급수의 관계로 정의하였다.

$$Z = aR^b \quad (3)$$

Eq. (3)과 같이 레이더 반사도로부터 강우강도를 계산하기 위해서는 경험적 매개변수 a와 b를 결정해야 하며, 통상 a는 20~1000, b는 1~3 범위 값을 갖는다(Smith and Krajewski, 1993). 이들 a, b를 결정하는 방법에는 구름속 물방울의 직경분포(Drop Size Distribution)를 이용하는 방법과 지상의 우량계 관측값을 이용하는 방법이 있다. 본 연구에서는 후자의 방법

을 이용하였으며, 최소자승법(least square fitting)을 이용하여 Z-R 관계식을 산정하였다.

$$a = 10^{\frac{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^n \log(R_i) D_b Z_i - \sum_{i=1}^n \log(R_i) \sum_{i=1}^m D_b Z_i}{\left( \sum_{i=1}^n \log(R_i) \right)^2 - \sum_{i=1}^n (\log(R_i))^2}} \quad (4)$$

$$b = \frac{1}{10} \left( \sum_{i=1}^n D_b Z_i - 10 \log(a) \sum_{i=1}^n \log(R_i) \right) \quad (5)$$

### 2.3 관측누적시간과 레이더 관측반경에 따른 산정 강우의 정확도 평가

레이더 강우량의 수문학적 활용을 위해서는 각 레이더 사이트별 유효한 관측반경과 관측누적시간간격에 따른 레이더 강우의 정확도를 규명할 필요가 있다. 이를 위한 정성적 지표로 Eq. (1)을 백분율로 환산하지 않은 강우감지확률(Probability Of Detection, POD)를 사용하였으며, 따라서 POD의 범위는 0에서 1이며 완벽한 값은 1이다. 정량적 지표로 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE) 및 상관계수(CC)를 사용하였다. CC는 전술한 Eq. 2)에 의해 산정되며, RMSE는 다음 Eq. (6)을 통해 산정된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (R(i,j) - G(i,j))^2} \quad (6)$$

여기서, n, m은 레이더 사이트에서의 강우계의 수와 자료의 기간이며, R(i,j)와 G(i,j)는 i번째 강우계에서의 시간 j에 해당하는 레이더와 강우계에서 관측된 강우이다. 본 연구에서 제시하는 레이더 강우의 시간적, 공간적 정확도 평가를 위한 절차는 다음과 같다. 1) 10분 시간간격의 레이더와 강우계의 강우 자료를 이용한다. 2) 레이더 중심에서부터의 누적거리를 60, 120, 180 km 별로 구분하고 레이더 관측반경내의 강우계를 그룹별로 분류한다. 3) 각 그룹별로 강우계의 강우자료와 이에 대응되는 레이더 강우자료를 이용하여 POD, CC 및 RMSE를 계산한다. 4) 관측누적시간을 10분 간격으로 증가시키면서 2)와 3) 과정을 반복한다. 이러한 과정을 관측누적시간이 240분이 되면 중단한다. 5) 레이더 관측반경과 관측누적시간별 수행능력을 평가하고 비교·분석한다.

### 2.4 지상강우관측망의 밀도에 따른 표본오차 평가

공간평균편이(mean-field bias)는 유역평균강우

(Mean Areal Precipitation, MAP)의 참값을 유역내 모든 레이더 격자점의 강우평균값으로 산정되는 레이더 MAP 값으로 나누어 산정하며, 이는 레이더 추정강우의 편차보정과 편차보정된 MAP의 정확도 평가를 위한 중요한 기준이 된다. 그러나 MAP의 참값은 알 수 없으며, 실제적으로는 지상관측강우지점의 평균값으로부터 산정된다. 따라서 MAP의 참값의 정확도는 지상강우관측망의 밀도에 영향을 받으며, 강우표본오차 역시 참값과 연계가 있다. 본 연구에서는 이들 표본오차산정을 위해 강우계 관측강우의 MAP 표본오차분산(Rain gauge Area-Mean Rainfall Sampling Error Variance, RAMRSEV)과 상대적인 평균편이 표본오차분산(Relative Mean-Field Bias Sampling Error Variance, RMFBSEV) 두 지표를 사용하였다.

본 연구에서는 RAMRSEV를 Anagnostou *et al.* (1998)이 제안한 절차를 따라 Monte Carlo 모의실험을 통해 산정하였으며, 그 절차는 다음과 같다. 1) 강우계 관측망의 크기를 결정한다. 2) 임의로 레이더 관측반경안의 강우계의 위치를 선정한다. 3) 다음 식

을 이용하여 선택된 강우

계의 시간 j와 반복횟수 i에서의 표본 오차를 계산한다. 여기서 e는 표본오차를 의미한다. Rt(j)는 j시간에서의 모든 레이더 격자들로부터 산정한 평균강우이고, Rg(i,j)는 j시간과 반복횟수 i에서의 선택된 강우계 강우 자료로 산정한 평균강우이다. 4) 모든 사용 자료에 대한 계산이 끝날 때까지 3)의 과정을 반복하여 표본오차를 계산한다. 5) 강우계 관측망의 구성을 임의로 조정 한 후 2)의 과정부터 다시 반복한다. 이 절차를 500번 반복한다. 6) 주어진 관측망의 크기에 대응되는 표본오차의 변동성을 계산한다. 7) 강우계 관측망의 크기를 결정하는 1)의 과정으로 되돌아간다. 이 과정은 강우계 관측망의 크기가 레이더 관측반경의 강우계의 최대 개수에 도달하게 되면 중지한다.

한편, 공간평균편이의 참값은 강우계가 위치한 레이더 격자점들의 강우계 산정 강우량과 레이더 산정 강우량으로부터 결정할 수 있다. 이 방법은 실제 MAP의 표본오차를 제거할 수 있을지 모르지만, 또 다른 형태의 표본오차, 즉 공간평균편이를 계산함에 있어 관측강우의 밀도에 따른 오차가 발생할 것이다. 이와 같은 표본오차는 상대적인 평균편이 표본오차 분산으로 정의할 수 있다. 이는 전체 관측망에 의해 편이는 참 편이라는 가정하에 전술한 RAMRSEV의 산정과정과 동일한 절차로 산정 가능하다. 단, 3번째 단계의 표본오차는 로 계산된다. 여기서

는 j시간에서의 모든 강우관측소들로부터 산정한 평균편이이고, 는 j시간과 반복횟수 i에서의 선택된 강우계로부터 계산된 평균편이다.

## 2.5 수문학적 적용을 위한 레이더 강우의 정확도 산정

높은 시공간적 분해능을 갖는 레이더 강우는 수문학적 활용성이 크다. 특히, 미계측 유역이나 강우관측망의 밀도가 홍수예보에 충분하지 않은 지역에서는 더욱 유용하다. 그러나 레이더 자료는 다양한 원인에 의해 오차를 포함하고 있으므로 수문학적 활용을 위해서는 반드시 이들 오차를 적절한 방법으로 평가하여야 한다. 이에 본 연구에서는 홍수예보를 위한 강우-유출모델의 입력자료로 사용될 수 있는 레이더 MAP의 정확도를 평가하는 방법을 제안하였다.

일반적으로 홍수예보를 위한 두 가지 중요한 요소는 홍수의 지속시간과 강도이며, 따라서 홍수예보를 위한 MAP의 유용성 평가를 위해서는 호우기간 동안의 총 강우량과 최대강우량의 상대오차와 Nash-Sutcliffe 지수를 평가지표로 사용하였다. 레이더 원자료는 짧은 시간동안 많은 불확실성을 포함하고 있으며, 레이더 원자료의 불확실성을 감소시켜 정확도를 개선시키기 위해 본 연구에서는 공간적 편차보정 알고리즘을 사용하였다.

관측누적시간 간격과 레이더 관측반경을 변화시켜가면서 반복하고, 실시간 편차보정을 수행하며 레이더 산정강우의 정확도를 평가하는 절차는 다음과 같다. 1) 시간 t에서의 각 강우계 위치에 대응되는 레이더 격자의 강우(R)와 강우계 관측강우(G)를 사용하여 보정계수 G/R을 각 강우계별로 계산한다. 2) 각 지점별 G/R을 이용하여 보정된 레이더 강우장을 계산하기 위해 보정계수의 적용 범위를 결정한다. 각 격자별 보정계수는 가장 가까이 위치한 강우계에서의 관측값과 동일하게 되도록 결정한다. 이미 레이더 강우 원자료를 알고 있는 t+1 시간의 격자 (i,j)에서 보정된 강우를 식을 따라 계산한다. 여기서 과 은 t+1시간에서의 원 강우와 보정된 강우이며, 는 격자(i,j)에서의 시간 t에서의 보정계수이다. 4) 호우사상의 각 시간에서 강우계 관측강우, 보정되기 전후의 레이더 강우 등 세 가지 종류의 MAP를 계산한다. 5) 다음의 식에 따라 총 강우량과 최대강우량의 상대오차, 첨두우량 발생 시간 및 Nash-Sutcliffe 지수를 계산한다.

$$Time\ to\ peak = TG_{peak} - TR_{peak} \quad (7)$$

$$Relative\ peak = \frac{abs(R_{peak} - G_{peak})}{R_{peak}} 100\% \quad (8)$$

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (R_i - G_i)^2}{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2} \quad (9)$$

여기서  $TG_{peak}$  및  $TR_{peak}$ 는 각각 지상강우 및 레이더 MAP의 첨두값까지의 시간을 나타내며,  $R_{peak}$  및  $G_{peak}$ 는 시간 i에서 레이더 및 지상강우 MAP의 최대값,  $R_{sum}$  및  $G_{sum}$ 은 레이더 및 강우계 강우 MAP의 총합,  $abs(\quad)$ 는 절대치를 나타낸다. 또한  $R_i$ 와  $G_i$ 는 i 시간에서의 레이더와 강우계 관측 MAP이다.  $\bar{G}$ 는 시간 평균한 강우계 관측 MAP이다. 앞서 제시한 1)~5)까지의 절차를 관측누적시간과 관측반경의 변화에 따라 반복하여 정확도를 평가한다.

## 3. 사례연구

### 3.1. 대상유역 및 자료 가용현황

본 연구에서 제시한 레이더 강우의 정확도 평가방법 적용을 위해 진도 S 밴드 레이더와 관악산 C 밴드 레이더 자료를 이용하였으며, 관측반경은 각각 240 km이다(Fig. 2). 진도레이더 사이트의 좌표는 34.470°N, 126.32°E이고, 고도는 499 m로 한반도의 남서부에 위치하며, 관악레이더 사이트의 좌표는 37.440°N, 126.970°E이고, 고도는 637 m이다. 각 레이더 사이트별 관측현황을 살펴보면, 관측 Sweep의 수는 관악산은 8, 진도는 9이고, 각 sweep에는 360개 방위각별로 360개의 빈이 존재한다. 방위각의 범위는 0.50°에서 359.50°이다.

본 연구에서는 두 호우사상을 선정하여 정확도를 평가하였으며, 각 호우사상의 특성은 Table 1에 제시한 바와 같다. 2003년 7월 9~10일의 호우사상은 장마기간 동안 전선의 이동으로 발생한 층상우 형태의 호우이며, 2004년 7월 3~4일의 호우사상은 태풍 민들레에 의해 발생한 대류성 호우이다. 본 연구를 위해 사용한 자료는 진도와 관악산 레이더 사이트에서 관측한 레이더 반

Table 1. Events for Evaluating the Accuracy of Z - R Relationship

Event	Date	Rain type	Radar type	Number of gages	Storm duration (h)	Average rainfall (mm/h)
1	9-10/07/2003	Stratiform	S band	224	48	1.04
			C band	445	48	1.29
2	3-4/07/2004	Convective	S band	224	48	1.59
			C band	445	48	1.38

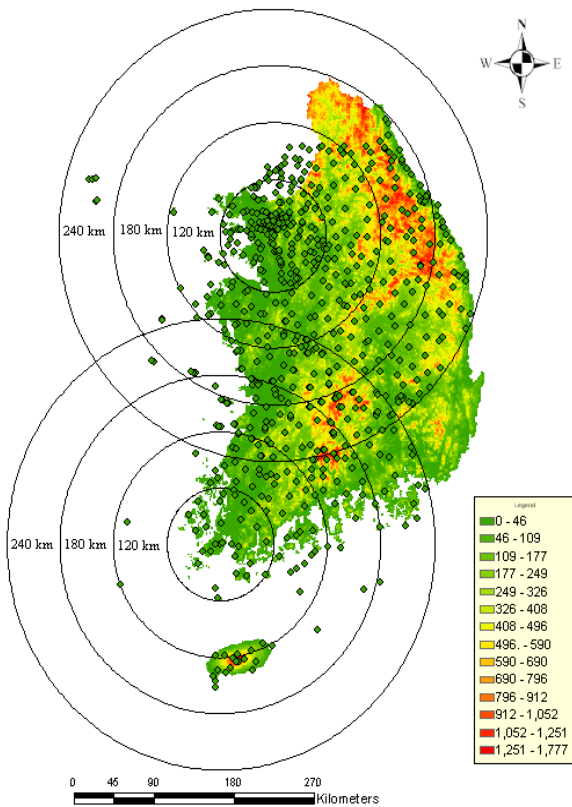
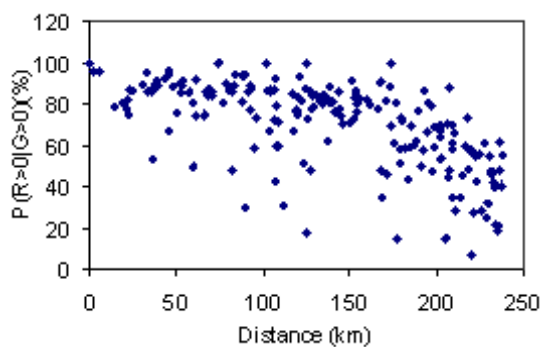


Fig. 2. Jindo and Kwanak Radar Station

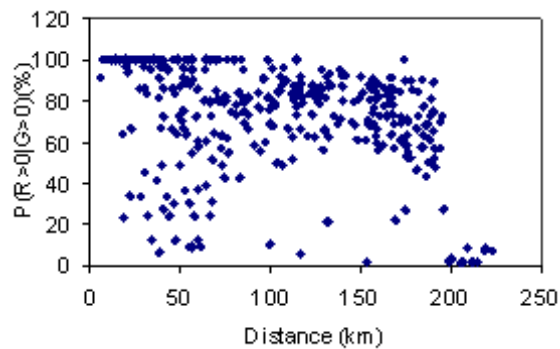
사도(dBZ) 자료와 해당 레이더 사이트 내 AWS의 강우계 관측 자료이다(Fig. 2). 레이더 자료는 UF(Universal Foramt) 형태이며, 관측시간분해능은 10분, 공간분해능은 1 km이다. 반면, 강우 자료는 1분 시간간격의 최소단위로 0.5 mm 강우를 감지하는 tipping bucket 형태의 기상청 AWS의 강우계 관측 자료이다. 본 연구에서는 레이더 자료 처리를 위해 Mohr and Vaughan (1979)이 제안한 보간방법을 적용하여 1.5 km 고도의 CAPPI 반사도 자료를 추출하였다. 또한 레이더 자료에 대응되는 강우계 강우자료를 10분 단위의 ASCII 형식의 자료로 변환하였다.

### 3.2 적용 결과 및 평가

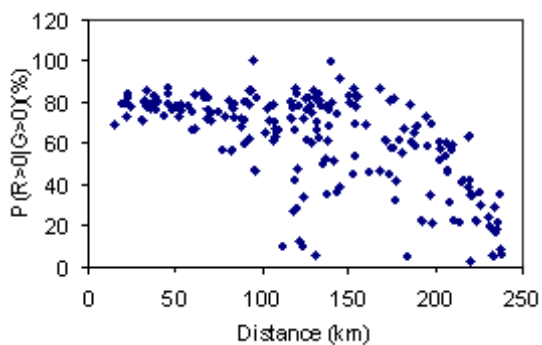
본 연구에서는 제시한 레이더 강우의 정확도 평가 방법에 따라 관측반경과 관측누적시간에 따른 정확도 평가를 수행하였으며, 이를 위해 10분 간격의 시간 분해능과 1 km의 공간 분해능을 갖는 자료를 이용하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 레이더 강우산정에 보다 적합한 품질을 갖는 강우계를 추출하는 품질검사를 수행한 결과이다. Fig. 3은 레이더 강우추정의 정성적 평가지표로 사용되는 CPRD값이 레이더 관측반경별로 대부분 30%에서 90% 범위에 있으며, 관측반경이 증가함에 따라 감소하는 것을 보여준다. 한편, Fig. 4는 정량적인 평가지표로 사용한 CC 값의 레이더 반경에 따른 정확도의 경향을 나타낸 것으로, CC가 일반적으로 관측반경이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이나 그 경향이 뚜렷하지 않다. 각각의 강우사례에 대해 해당 지역의 평균값을 계산한 결과 0.45에서 0.55의 값을 나타내었다. 이들 두 호우사상을 비교한 결과, 첫 번째 호우사상은 레이더 강우가 넓게 분산되는 경향이 있으며 두 번째 호우사상에 비해 관측반경이 증가함에 따른 변화가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이러한 원인은 두 번째 호우사상이 대류성 강우로 강우강도가 보다 강했기 때문에 강우입자가 상대적으로 쉽게 탐지된 것이다. 반면, 첫 번째 호우사상은 약한 층상우 강우로 강우입자가 레이더 중심에 가까이 위치함에도 불구하고 레이더를 이용한 강우탐지가 용이하지 않았을 것으로 사료된다. 또한 Fig. 3은 첫 번째 호우사상의 레이더와 강우관측치의 일치성이 두 번째 호우사상보다 상대적으로 낮음을 보여준다. 본 연구에서는 이들 품질검사결과를 통하여 보다 정확한 Z-R 관계식 산정을 위해 강우계 관측강우와의 상관계수가 0.3보다 작고 CPRD가 0.2보다 작은 지점자료는 제외하였다. 이러한 기준에 의하면 관악산 레이더 사이트에는 55개, 진도 레이더 사이트에는 64개 강우계가 제거된다.



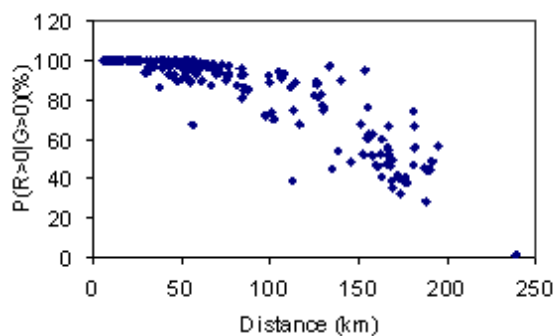
a) Event 9-10/07/2003, S band



b) Event 9-10/07/2003, C band

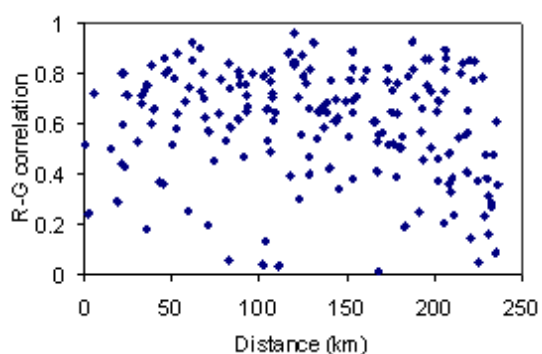


c) Event 3-4/07/2004, S band

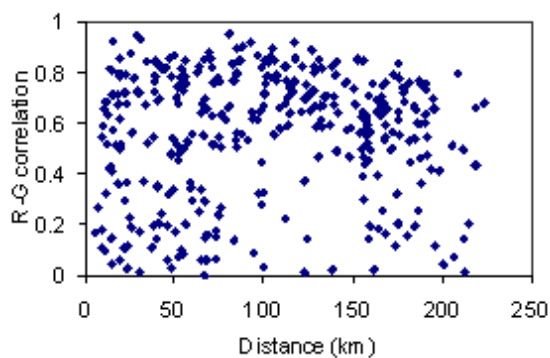


d) Event 3-4/07/2004, C band

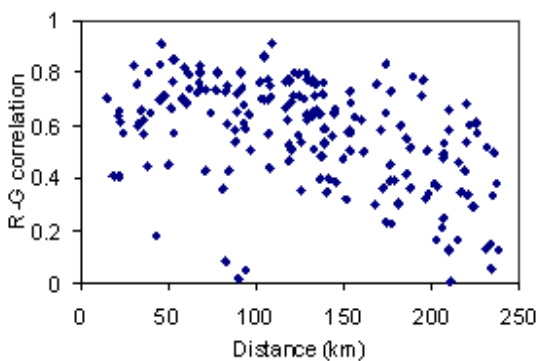
Fig. 3. CPRD for All Gauge Locations in Radar Domain



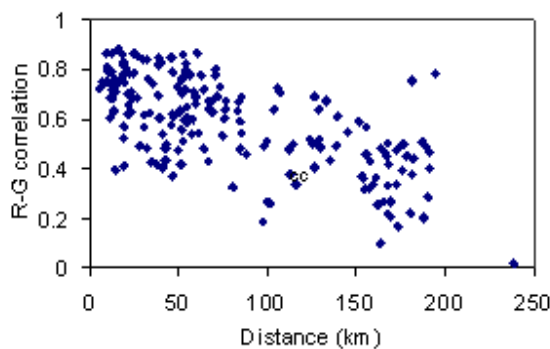
a) Event 9-10/07/2003, S band



b) Event 9-10/07/2003, C band



c) Event 3-4/07/2004, Sband



d) Event 3-4/07/2004, Cband

Fig. 4. CC for All Gauge Locations in Radar Domain

**Table 2. Events for Evaluating the Accuracy of Z-R Relationship**

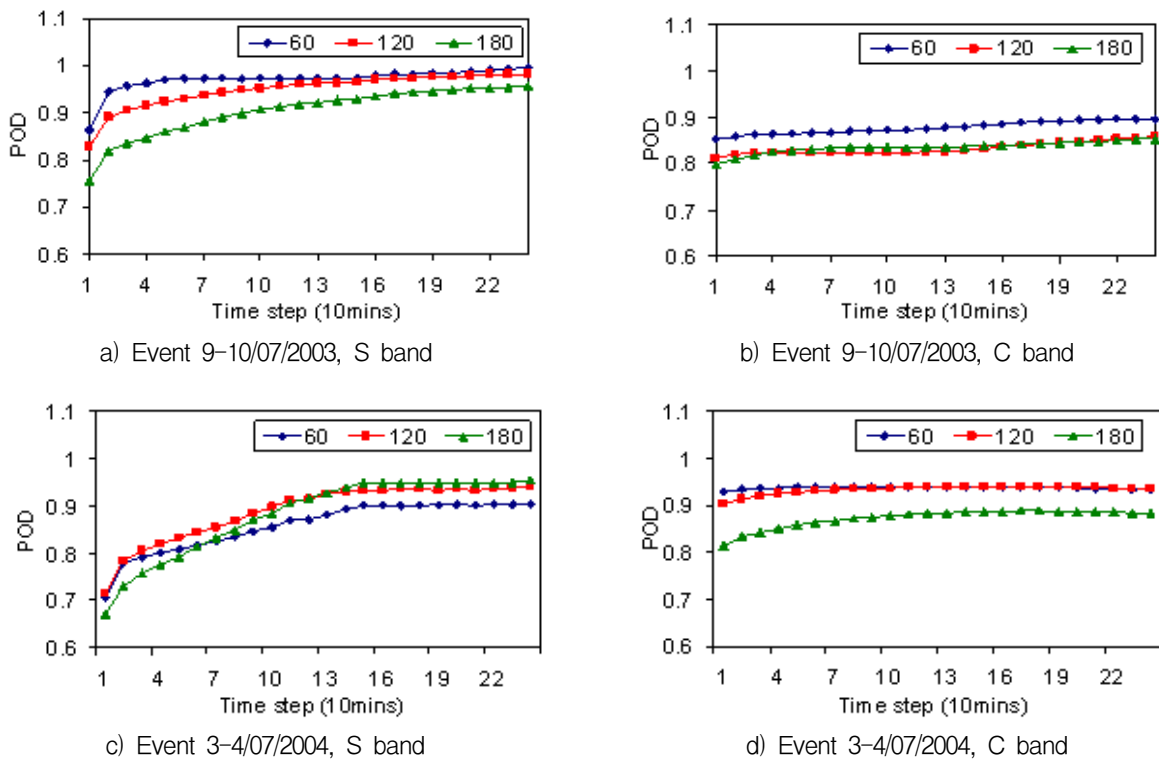
Event	Date	Radar type	Z-R relationship
1	9-10/07/2003	S band	$Z = 145R^{1.71}$
		C band	$Z = 85R^{1.2}$
2	3-4/07/2004	S band	$Z = 140R^{1.55}$
		C band	$Z = 130R^{1.4}$

품질검사 과정을 거친 후 10분 간격의 레이더 반사도 자료와 강우계 강우강도 자료쌍을 이용하여 최소자승법을 적용하여 각 호우사상별 레이더 사이트 별로 Z-R 관계식을 산정하였으며, 그 결과는 Table 2에 제시된 바와 같다. 이들 관계식을 적용하여 10분 간격의 레이더 강우강도를 산정하고, 강우계 관측강우와 비교하여 정확도를 평가하였다.

Figs. 5~7은 전술한 방법에 따라 레이더 강우의 시공간적 분해능에 따른 정확도를 평가한 결과이다. 본 연구에서는 이를 위해 관측누적시간을 10분부터 240분까지 다양하게 선택하고, 레이더 관측반경을 60, 120, 180 km씩 누적시켜 정확도를 분석하였다. Fig. 5는 정성적 평가지표로 사용한 POD의 결과이며, Fig. 6과 Fig. 7은 정량적 평가지표로 사용한 상관계수(CC)와 평

균제곱근오차(RMSE)의 결과이다. Fig. 5에 나타난 것처럼 누적시간에 따른 POD 결과는 예상한 바와 같이 관측반경에 따라 다르게 나타났으며, 누적시간이 증가함에 따라 POD도 일반적으로 증가하는 경향을 나타내다가 특정시간 이후에는 수렴하는 경향을 나타내었다. 그러나 그 값은 강우사상별로 다소 차이를 나타내고 있다. 이는 국내에서 관측되는 레이더 반사도 자료를 다양한 강우형태별로 POD 분석을 수행하여 국내 레이더 강우자료의 특성을 규명할 필요가 있음을 의미하며, 이를 위해서는 다양한 강우사상에 대한 레이더 강우자료 데이터베이스의 구축이 무엇보다 시급함을 의미한다. 또한, Fig. 5에 제시한 바와 같이 레이더 반경이 60 km 일 때 일반적으로 가장 정확한 값을 보였으며 180 km의 반경에서는 가장 낮은 POD 값을 보였다. 이러한 경향은 C 밴드 레이더가 감쇠에 상당한 영향을 받음을 보여준다(Fig. 5b and 5d).

Fig. 6과 Fig. 7은 두 호우사상에 대한 누적거리 및 누적시간별 레이더 추정강우의 상관계수 및 RMSE 결과를 나타낸 것으로 일반적으로 시간간격이 증가함에 따라 레이더 추정강우의 정확도가 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 선택된 두 사상 모두 시간간격이 10분에서 50분으로 증가할 때 상관계수가 급격히 증가하는 것을 알 수 있으며, 첫 번째 호우사상의 C 밴드 레이더 자료는 상관계수가 점진적으로 감소하는 것을 제외하고 모두 일정한 값으로 수렴하는 경향이 있음을



**Fig. 5. POD Criterion with Different Events at Two Radar Station**



알 수 있다. 누적시간에 따른 RMSE는 레이더 종류와 호우사상 모두에서 비선형적으로 감소하는 경향을 나타내었으며, 누적시간이 증가할수록 감소율은 감소하면서 일정한 값에 수렴하는 경향이 있음을 알 수 있다. 그림을 통해 레이더 관측반경에 대한 정확도의 영향을 확인하면 일반적으로 60 km 반경 내의 지역에서 보다 높은 상관계수 값을 갖고, 180 km 반경 내의 지

역과 비교할 때 낮은 RMSE를 갖는 것을 알 수 있다. 이는 레이더 반경이 증가함에 따라 정확도가 감소되는 것을 의미한다. 한편, 레이더의 종류를 고려할 경우 C 밴드 레이더는 두 관측반경 범위 사이에서 상당한 불일치가 생김을 알 수 있으며, 이는 레이더 빔 감쇠가 레이더 추정강우의 정확도에 상당한 영향을 미침을 의미한다.

1.1

1.1

a) Event 9-10/07/2003, S band

b) Event 9-10/07/2003, C band

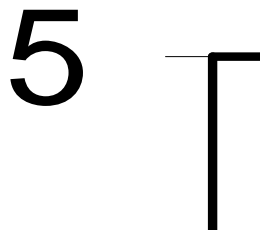
1.1

1.1

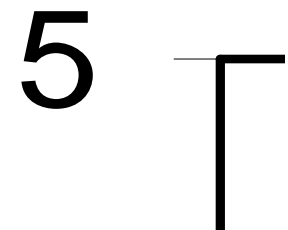
c) Event 3-4/07/2004, S band

d) Event 3-4/07/2004, C band

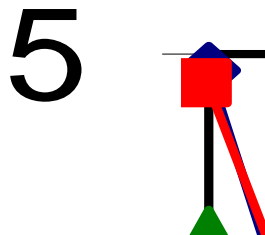
Fig. 6. Changes of CC with Various Time Steps and Regions



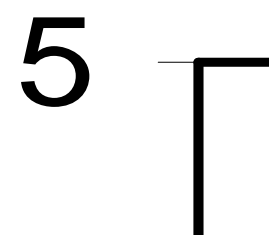
(a) Event 9-10/07/2003, S band



(b) Event 9-10/07/2003, C band



(c) Event 3-4/07/2004, S band



(d) Event 3-4/07/2004, C band

Fig. 7. Changes of RMSE with Various Time Steps and Regions

Fig. 8과 Fig. 9는 강우관측망의 밀도에 따른 표본오차분산의 결과를 나타낸 것이다. 이는 10분 간격의 레이더 강우와 강우계로 관측된 강우를 이용하여 산정된 것이며, 강우관측망의 크기는 강우계 수를 5개씩 늘려진 레이더 사이트는 5에서부터 160, 관악레이더 사이트는 5에서 390까지 나타낸 것이다. 각 호우사상별, 레이더 종류별 RAMRSEV (Fig. 8) 및 RMFBSEV (Fig. 9)는 강우관측망의 수가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 8에서와 같이 첫 번째 호우사상의 표본오차 변동성은 두 번째 호우사상의 것보다 작은 것으로 나타났는데, 이는 첫 번째 호우사상의 강우구조의 공간적 분포에 따른 것으로 층상우가 대류성 강우보다 균등하게 분포하기 때문인 것으로 판단된다. 이는 국내에서 발생하는 다양한 호우사상별로 이와 같은 분석을 수행하여 강우형태별로 레이더 강우산정에 미치는 영향을 분석할 필요가 있음을 나타낸다.

Fig. 9는 강우관측망의 수에 따른 표본오차편이의 상대적인 변동성(Relative Variance of the Bias Sampling Error, RVBSE)을 나타낸 것이다. 이는 진도 레이더의 경우 160개, 관악산 레이더의 경우 390개의 강우계를 사용하여 계산한 것이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼

강우계의 밀도가 작은 경우(<50) RMFBSEV는 150 % 과 300 % 이상의 매우 큰 값을 나타냄을 알 수 있으며, 강우관측망의 수가 증가함에 따라 RMFBSEV가 급속히 줄어들음을 알 수 있다. 이는 실제 평균편이와 적은 수의 강우계로 산정된 평균편이 사이에는 상당히 큰 차이가 있다는 것을 의미하며, 강우관측망의 수가 MAP 산정뿐 아니라 레이더 강우의 편차보정에도 주요한 오차요인이 됨을 알 수 있다. 또한 두 번째 호우사상과 같은 대류성 강우가 층상우보다 RMFBSEV가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

홍수예보와 같은 수문학적 응용을 위한 레이더 강우산정의 정확도 평가를 위해 본 연구에서는 10분에서 60분 범위의 작은 시간누적범위에서 레이더 강우산정의 정확도를 평가하였다. 우선 홍수예보의 정확도 확보를 위해 레이더 산정강우의 실시간 공간편차보정 절차를 수행하였으며, 그 결과 보정을 사용하기 전보다 상대적으로 좋은 결과를 얻었다. Fig. 10은 관측반경 180 km, 시간누적 30분의 강우계 관측치와 보정 전후의 레이더 강우량의 시간적 변화 사례를 나타낸 것이다. Fig. 10을 통해 보정 후 강우 정확도가 향상되는 것을 알 수 있으며, 레이더 강우의 수문학적인 활용을 위해서는 편차

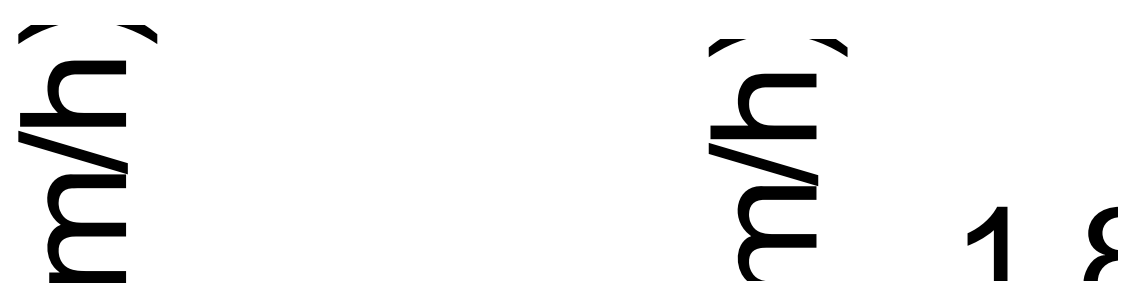


Fig. 8. Rain Gauge Area-Mean Rainfall Sampling Error Variance versus Rain Gauge Network Size



Fig. 9. Relative Mean-Field Bias Sampling Error Variance versus Rain Gauge Network Size

보정기법과 보정된 자료를 활용하는 것이 보다 유용함을 알 수 있다. 뿐만 아니라 레이더 추정강우의 정확도 평가를 위해 MAP의 시계열 자료를 이용하여 홍수의 4 가지 주요 평가항목인 총강우량의 상대오차, 침투시간, 침투유량의 상대오차 및 Nash-Sutcliffe 지수를 산정하였다. 다음 Table 3은 누적관측반경별 산정한 총강우량의 상대오차와 침투시간을 제시한 것으로, 누적관측반경이 증가함에 따라 변화하는 것을 확인할 수 있다. 총강우량의 상대오차의 경우 180 km의 거리에서 첫 번째 호우사상의 S 밴드 자료, 120 km의 거리에서 두 번째 호우사상의 C 밴드 자료를 제외하고, 다른 모든 사례는

상대오차가 15 % 이하의 값을 나타내었다. 또한 대부분의 사례에서는 이 평가항목들이 10 % 이하로 작아 수문학적 적용에 상대적으로 좋은 결과를 나타낼 수 있을 것으로 판단된다. 또한 누적관측반경별 침투시간은 Table 3에서 볼 수 있는 것처럼 강우계 관측강우와 보정된 레이더 강우 간의 차이가 발생하였으나 두 호우사상의 침투시간은 20분 이상 차이가 나지 않았다. 침투시간은 S 밴드의 두 번째 호우사상에서 10분 일찍 발생하는 반면, 첫 번째 호우사상에서는 동시에 발생하였으며, C 밴드의 경우 반경 60 km, 120 km에서는 20분 늦게 발생하고, 180 km에서는 10분 늦게 발생하였다.

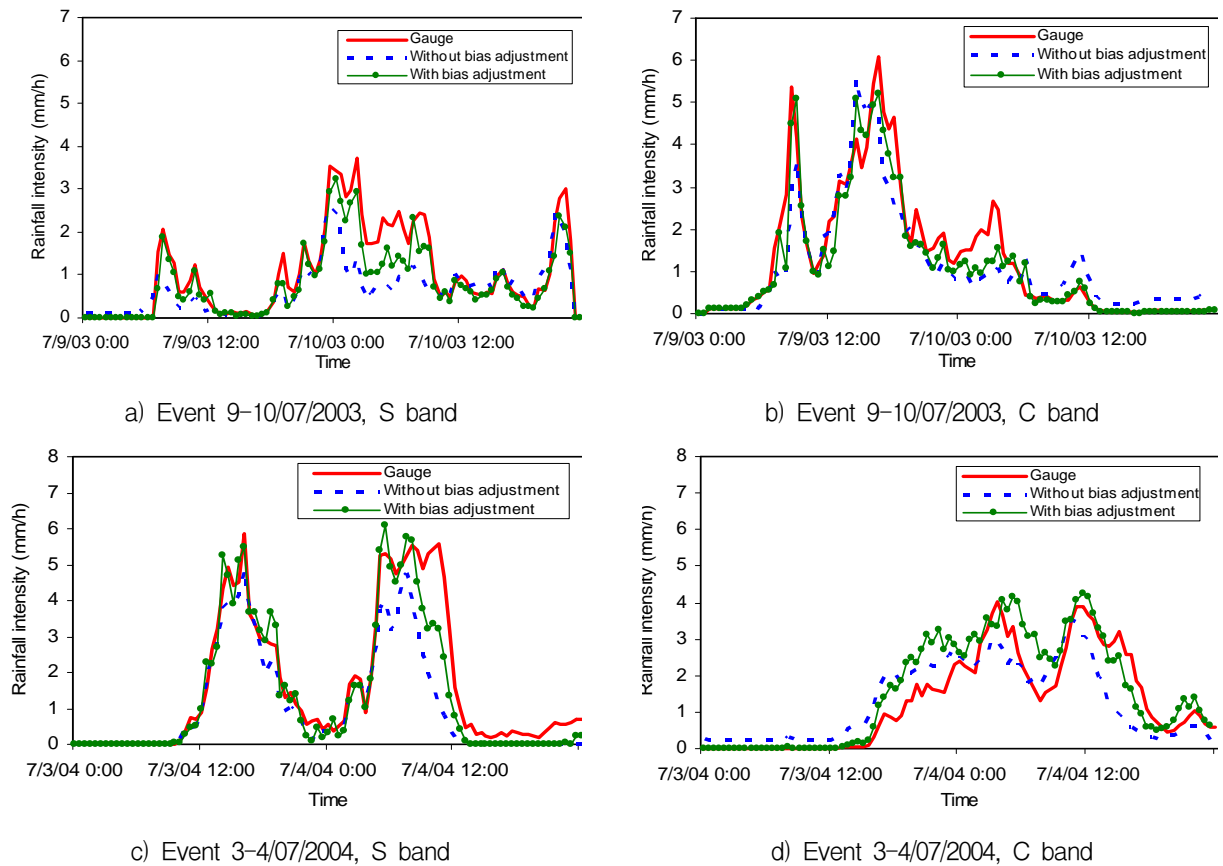


Fig. 10. Example of Observed and with and without Bias Adjusted MAP with the Time Step of 30 Minutes and the Distance of 180 Kilometers

Table 3. Changes of the Relative Error of Total Rainfall and Time to Peak of the Events with Different Radar Distances

Event	Relative error of total rainfall (%)			Time to peak (Minutes)		
	60 (km)	120 (km)	180 (km)	60 (km)	120 (km)	180 (km)
Event 1 - S band	5.1	9.9	22.0	0	0	0
Event 1 - C band	2.1	14.4	10.3	20	20	10
Event 2 - S band	8.9	5.7	14.2	-10	-10	-10
Event 2 - C band	15.0	21.4	2.3	20	20	10

Table 4는 두 호우사상에 대해 60, 120, 180 km의 반경 범위를 고려하여 10분에서 60분 범위의 시간간격을 적용하여 침투값의 상대오차 및 Nash-sutcliffe 지수를 산정한 결과이다. 침투값의 상대오차 분석결과에 따르면 15 % 이상의 값이 일부 존재하지만 대부분의 값은 10 % 이하로 나타났으며, 시간간격과 관측반경의 차이에 따른 값의 변화를 고려할 때 이 값들은 불규칙적으로 변화하는 것으로 사료된다. 한편, Nash-sutcliffe 지수 분석 결과 일반적으로 시간간격이 증가함에 따라 지수가 점진적으로 증가하였다. 이는 강우계와 레이더 관측치의 일치성이 시간 분해능이 증가할수록 향상되는 것을 나타내나 시간간격에 따른 값의 차이가 크지는 않았다. 레이더 반경의 경우 편차보정의 효과 때문에 관측반경의 증가에 따른 정확도의 감

소가 명확하게 관측되지 않았으며, 반경별 값의 차이는 대부분의 사상에서 크지 않았다. 또한, Nash-sutcliffe 지수가 대부분 0.7 이상의 값으로 수문학적 예측에 활용하기에 적정할 것으로 판단된다. 즉, 통계적인 기준에 따르면 편차보정을 수행한 레이더 강우량의 정확도가 편차보정을 수행하기 전과 비교하면 향상된 것을 알 수 있으며, 결과적으로 레이더 강우를 강우-유출모형의 입력자료로 활용되기 전에 본 연구에서 제안한 이와 같은 레이더 추정강우의 정량적, 정성적 분석을 수행하여 레이더 추정강우가 제공할 수 있는 오차의 한계 등을 예상하고 자료를 활용하여야 할 것이다. 이를 위해서는 향후 강우사상에 대한 지속적인 데이터베이스의 구축 및 레이더 강우의 정량적, 정량적 평가가 요구된다.

**Table 4. Change of the Nash - Sutcliffe Efficiency and Peak Relative Error with radar distances and time intervals**

Event-radar type	Time interval (minutes)	Relative Peak Error (%)			Nash-Sutcliffe efficiency		
		60 km	120 km	180 km	60 km	120 km	180 km
Event 1 - S band	10	20	25.97	15.59	0.60	0.74	0.68
	20	3.82	4.21	7.15	0.81	0.87	0.78
	30	12.01	14.71	13.32	0.90	0.91	0.81
	40	18.03	7.46	1.63	0.87	0.92	0.80
	50	16.12	2.51	4.05	0.90	0.93	0.81
	60	20.28	18.31	12.28	0.94	0.94	0.82
Event 1 - C band	10	16.88	4.46	10.29	0.71	0.81	0.83
	20	3.48	13.96	16.09	0.78	0.86	0.87
	30	1.92	6.90	14.17	0.79	0.88	0.89
	40	9.73	0.52	10.75	0.81	0.89	0.90
	50	4.08	11.78	18.97	0.80	0.88	0.90
	60	16.31	20.83	11.69	0.82	0.90	0.91
Event 2 - S band	10	10.80	8.90	8.29	0.83	0.87	0.85
	20	9.60	6.70	5.42	0.90	0.93	0.89
	30	5.78	5.60	4.47	0.94	0.95	0.90
	40	5.30	3.40	8.34	0.94	0.95	0.90
	50	3.21	1.36	8.14	0.96	0.95	0.90
	60	3.50	8.38	4.73	0.96	0.96	0.91
Event 2 - C band	10	3.36	2.19	9.79	0.80	0.82	0.80
	20	3.21	2.55	7.70	0.82	0.83	0.81
	30	4.56	4.32	12.62	0.82	0.84	0.81
	40	13.61	9.92	16.83	0.82	0.84	0.81
	50	3.60	2.97	13.76	0.83	0.85	0.82
	60	11.78	10.09	14.17	0.83	0.84	0.82

#### 4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 레이더 추정강우를 수문학적으로 활용할 수 있도록 레이더 추정강우의 정확도를 정량적, 정성적으로 평가할 수 있는 방법 및 절차를 제안하였다. 제안한 방법의 적용을 위해서는 우선 최소자승법으로 각 강우사상별 Z-R 관계식을 산정하여야 하며, 산정된 관계식을 이용하여 레이더 강우강도를 계산한 후 다음의 세 가지 통계적 기준에 의해 평가를 수행해야 한다. 첫째, 레이더 관측반경과 관측누적시간에 따른 정량적, 정성적 정확도 변동성을 검토하기 위해 시간 및 공간 분해능에 따른 레이더 강우산정의 정확도를 평가한다. 둘째, 강우관측망의 영향에 따른 레이더 강우산정의 영향을 검토하기 위해 강우계 밀도에 따른 평균편이의 표본오차 변화를 계산한다. 셋째, 수문학적 적용 측면에서의 평가를 위해 공간평균강우량에 대해 홍수특성을 고려하여 정확도를 평가한다.

본 연구에서 제안한 방법의 실제 호우 사상에 대한 적용을 통해 수문학적 활용을 위한 레이더 강우자료의 시공간적 정확도를 평가할 수 있었으며, 수문학적 모형의 입력자료에 적합한 레이더 관측범위와 관측누적시간을 선택할 수 있었다. S 밴드와 C 밴드 두 레이더 사이트의 호우사상에 대해 적용한 결과, 레이더와 강우계 자료의 품질로 인한 변동성을 감안하더라도 일반적으로 알려진대로 정성 및 정량적인 측면에서 레이더 추정강우의 정확도는 시간간격이 증가할수록 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 정확도의 증가율은 시간간격이 증가할수록 감소하여 일정한 값으로 수렴하였다. 관측반경별 정확도 분석결과, 대체적으로 60 km일 때 최적의 결과를 나타내었고, 180 km일 때 가장 부정확한 결과를 나타내었다. 본 연구에서는 120 km 범위를 레이더 강우 산정에 허용 가능한 범위로서 제시하였다. 또한, Monte Carlo 모의를 통해 강우관측망의 크기 변화에 따른 평균편이 표본오차를 산정하였으며, 강우계의 MAP의 표본오차 변동성과 상대적인 평균편이의 표본오차를 산정하였다. 그 결과 두 매개변수 모두 강우계 밀도에 따라 비선형적으로 감소하는 것을 보여주었다. 이에 표본오차는 계산된 편이와 편차보정된 MAP의 정확도에 영향을 미치는 중요한 요소임을 확인하였다. 또한, 레이더 추정강우의 정확도 개선을 위해 실시간 공간적 편차보정을 적용한 결과, 편차보정을 수행하기 전보다 정확도가 대체적으로 향상되었다. 수문학적 적용 측면에서의 평가를 위해 MAP에 대한 정확도 평가 결과, 관측된 MAP와 계산된 MAP 사이의 침투시간 차이는 모든 사례에서 30분 이내로 나타났다. Nash-Sutcliffe 지

수는 0.7보다 크고 상대적인 침투오차는 10 %이하였다. 또한, 편차보정 후 레이더 관측반경에 따른 정확도의 경향은 보이지 않았으며, 시간간격이 증가함에 따라 그 성능은 향상되었으나 그 향상 정도는 크지 않았다. 이러한 결과를 통해 편차보정이 레이더 추정강우의 정확도에 영향을 미치는 시간간격과 공간분해능의 영향을 축소시키는 것으로 판단할 수 있었다.

본 연구에서는 수문학적 활용을 위한 레이더 강우의 정확도 평가 방법을 제시하고, 그 방법론의 적절성을 실제 호우사상에 적용하여 평가하였다. 그 결과, 레이더 추정강우는 강우형태 및 누적관측시간과 관측반경의 레이더 특성에 따라 서로 상이하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 따라서 무엇보다 시급한 것은 국내에서 생산되는 레이더 자료를 체계적으로 수집하고, 이들 각각에 대해 정확도를 정량적, 정성적으로 평가하여 데이터베이스화 할 필요가 있다. 즉, 레이더 추정강우를 강우-유출모형의 입력자료로 활용하기 전에 국내에서 발생하는 다양한 호우사상별로 추정강우의 정확도 및 오차를 파악한 후, 레이더 추정강우가 제공할 수 있는 자료의 한계 등을 예상하고 자료를 활용하여야 할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 2008년 세종대학교 교내 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

- 김진훈, 이경도, 배덕효 (2005). "레이더 추정강우의 수문학적 활용 (II): 불확실성 해석." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제12호, pp. 1051-1060.
- 김효정, 이동인, 유철환, 권원태 (2002). "WPMM 방법을 이용한 레이더 강수량 추정 : 1. 1998년 여름철 관악산 DWSR-88C를 위한 Z<sub>e</sub>-R 관계식 산출." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제1호, pp. 25-36.
- 안상진, 김진국 (2003). "레이더 반사강도와 강우강도의 Z-R 관계식 산정." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제1호, pp. 13-21.
- 유철상, 김병수, 김경준, 최정호 (2007). "우량계 강우를 이용한 레이더 강우의 Ground-truth 방법 검토." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제9호, pp. 743-754.
- 유철상, 하은호, 김병수, 김경준, 최정호 (2008). "부분적 레이더 정보에 따른 면적평균강우의 관측오차." **한국**

- 수자원 학회 논문집, 한국수자원학회, 제41권, 제5호, pp. 545-558.
- Anagnostou, E.N., Krajewski, W.F., Seo, D.J., Johnson E.R., (1998). "Mean-field rainfall bias for WSR-88D." *J. Hydrol. Eng.*, Vol. 3, pp. 149-159.
- Andrieu, H., Creutin, J. (1996). "Identification of vertical profiles of radar reflectivity for hydrological applications using an inverse method. Part 1: Formulation." *J. Appl. Meteor.*, Vol. 34, pp. 225-239.
- Borga, M. (2002). "Accuracy of radar rainfall estimates for streamflow simulation." *J. Hydrol.*, Vol. 267, pp. 26-39.
- Calheiros, R.V., Zawadzki, I. (1986). "Reflectivity-Rain rate relationships for radar hydrology in Brazil." *J. Climate Appl. Meteor.*, Vol. 26, pp. 118-132.
- Carpenter, T.M., Georgakakos, K.P. (2004). "Impacts of parametric and radar rainfall uncertainty on the ensemble streamflow simulations of a distributed hydrologic model." *J. Hydrol.*, Vol. 298, pp. 202-221.
- Collier, C.G., Knowles, J. M. (1986). "Accuracy of rainfall estimates by radar, part III: Application for short-term flood forecasting." *J. Hydrol.*, Vol. 83, pp. 237-249.
- Germann, U., Galli, G., Boscacci, M., Bolliger, M. (2006). "Radar precipitation measurement in a mountainous region." *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, Vol. 132, pp. 1669-1692.
- Krajewski, W.F., Smith, J.A. (2002). "Radar hydrology: rainfall estimation." *Adv. Water Resour.*, Vol. 25, pp. 1387-1394.
- Meischner, P. (2004). *Weather Radar: Principles and Advanced Applications*. Springer, 2004, pp. 337.
- Mohr, C.G., Vaughan, R.L. (1979). "An economic procedure for Cartesian Interpolation and Display of reflectivity factor data in three-dimensional space." *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 18, pp. 661-670.
- Morin, E., Krajewski, F.W., David C.G., Gao, X., Soroosian S. (2003). "Estimating radar intensities from weather radar data: The scale-dependency problem." *J. Hydrol.*, Vol. 4, pp. 782-797.
- Pessoa, M.L., Bras, R.L., Williams, E.R. (1993). "Use of weather radar for flood forecasting in the Sieve River basin: a sensitivity analysis." *J. Appl. Meteor.* Vol. 32, pp. 462-475.
- Smith, J.A., Baeck, M.L., Meierdiercks, K.L., Miller, A.J., Krajewski, W.F. (2007). "Radar rainfall estimation for flash flood forecasting in small urban watersheds." *Adv. Water Resour.*, Vol. 30, No. 10, pp. 2087-2097.
- Smith, J.A. and Krajewski, W.F. (1993). "A modeling study of rainfall rate-reflectivity relationships." *Water Resources Research*, Vol. 29, pp. 2505-2514.
- Sun, X., Mein, R.G., Keenan, T.D., Elliott J.F. (2000). "Flood estimation using radar and raingauge data." *J. Hydrol.*, Vol. 239, pp. 4-18.
- Thielen, J., Boudevillain, B., Andrieu, H. (2000). "A radar data based short-term rainfall prediction model for urban areas - a simulation using meso-scale meteorological modeling." *J. Hydrol.*, Vol. 239, pp. 97-114.
- Zawadzki, I. (1975). "On radar - raingage comparison." *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 14, pp. 1430- 1435.

논문번호: 09-056	접수: 2009.05.25
수정일자: 2009.08.07/09.29	심사완료: 2009.09.29