

## 레이더 자료의 품질평가 기법 제안

### A Proposal of Quality Evaluation Methodology for Radar Data

유철상\* · 윤정수\*\*

Yoo, Chulsang · Yoon, Jungsoo

#### Abstract

This study proposed a methodology for evaluating the radar rainfall data, whose basic idea is similar to the analysis of variance in statistics. This method enables us to represent separately the error from the bias and that from the data variability. The proposed method was then applied to two storm events for its evaluation. As results, the error from the bias was found to comprises most of the raw radar data error, which becomes significantly decreased in the quality improved cases. On the other hand, the error from the data variability was rather increased due to the quality improvement procedure. The proposed methodology was found to be effective for evaluating the data quality of a storm event for steps of quality improvement, but has a limitation for comparing qualities of storm events. This limitation should be implemented for its general application.

**Keywords** : radar data, error, bias, variability

#### 요 지

본 연구에서는 레이더 강우자료의 품질평가를 위해 통계학 분야의 분산분석과 유사한 방법론을 제안하였다. 이 방법은 자료가 가지고 있는 편의로 인한 오차 및 변동성으로 인한 오차를 구분하여 나타내도록 한다. 제안된 방법론은 두 개의 호우사상에 적용하여 평가하였다. 그 결과 레이더 원자료의 경우는 편의로 인한 오차가 전체 오차의 대부분을 차지하는 반면, 품질 향상된 자료의 경우에는 편의로 인한 오차가 상대적으로 크게 줄어드는 것을 확인하였다. 그러나 변동성으로 인한 오차는 품질 향상 후 오히려 증가하였음을 파악하였다. 본 연구에서 제안된 방법론은 주어진 호우사상을 품질향상 단계별로 자료의 품질을 평가하는 데는 유효하나, 여러 호우사상의 품질을 비교하는데 한계를 가짐을 확인하였다. 보다 일반적인 적용을 위해서는 이에 대한 보완이 필요한 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 레이더자료, 오차, 편의, 변동성

#### 1. 서 론

수문 해석에서 가장 중요한 입력인자인 강우는 주로 점(point)관측에 의해 측정되어 왔다. 현재까지의 수준으로 볼 때 지상에 떨어지는 강우를 측정하는 가장 정확한 방법은 강우계(rain gage)를 이용하는 것이다. 그러나 지점에서 강우를 관측하는 것은 공간적인 강우장(rainfall field)을 파악하는데 한계가 있다. 더욱이 강우는 시-공간적 변동특성이 다른 기상인자에 비해 월등히 크며 간헐성(intermittency)이라고 표현되는 강우-무강우의 특성을 함께 보여주기 때문에 그 특성을 파악하고 정량화하는 것은 매우 어려운 일이다(유철상 등, 2006; 2008). 물론 밀도 있는 강우관측망이 구성되어 있다면 그것을 파악하는 것이 가능하지만 이를 구축하는 것은 설차 자체나 관리 측면에서 쉽지 않은 것임에 틀림없다. 더욱이 강우의 변동특성이 더욱 큰 산악지역은 접근성의 문제로 인해 높은 관측망을 유지하기가 매우 어려울 수밖에

없다(건설교통부, 2002; 한국수자원공사, 2004).

최근 기상 이변으로 인해 이상 강우가 빈번하게 발생하는 시점에서 점 관측을 중심으로 한 강우 관측은 더 큰 한계를 가지게 된다. 엘니뇨와 라니냐로 대변되는 기후변동이나 지구 온난화로 인한 기후변화 등으로 인해 비정상적으로 큰 강도를 가지는 집중호우가 예상치 못한 지역에서 발생함에 따라 그 피해가 점점 커지고 있다(신현석과 정상만, 2000; Fowler 등, 2005). 이와 같은 피해는 도시화로 인한 인구 집중 현상으로 인해 더욱 커지고 있는 상황이다(안상진 등, 2002; Brilly 등, 2006). 현실적으로 이상 강우에 의한 피해를 원천적으로 방지하는 것은 불가능하다. 그러나 어느 정도(accuracy) 이상의 강우예측이 전제된다면 피해의 규모를 크게 줄일 수 있는 것 또한 사실이다. 강우예측을 위해서는 강우장의 정량적 파악이 선행되어야 하며, 이를 기반으로 다양한 예측방법이 적용될 수 있다. 또한 공간적인 강우장의 정도있는 파악이 강우예측의 효용성을 극대화시킬 수 있다는 것은 기지의 사실이다(Takasao

\*정회원 · 교신저자 · 고려대학교 건축사회환경공학부 (E-mail : envchul@korea.ac.kr)  
\*\*정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정 (E-mail : civileng01@korea.ac.kr)

등, 1994; Sugimoto 등, 2001).

강우장의 공간적인 파악은 단순히 강우 현황을 파악하는 문제에 국한되지 않는다. 홍수예경보와 같이 강우의 예측 정도가 성패를 좌우하게 되는 경우에는 공간적으로 분포된 강우장은 예측 강우의 정도를 향상시키는데 큰 역할을 하게 된다. 주로 서해에서 유입되는 수증기로 강우가 발생하는 우리나라의 상황을 감안한다면, 지상에서 관측되는 강우장의 파악뿐만 아니라 해상에서 발생되고 있는 강우현황의 파악이 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다(심재관 등, 2005; Burlando 등, 1996).

점 관측의 한계를 극복하기 위한 방법으로 주목받고 있는 것이 바로 레이더이다. 레이더는 실시간으로 넓은 지역의 강우 현황을 파악하는 것을 가능하게 하므로 강우 예측에 있어 매우 큰 장점을 갖는다. 또한 해상에서 발생되고 있는 강우 현황을 파악하는 것이 가능하기 때문에 강우 예측의 정확도를 극대화시킬 수 있다. 무엇보다도 중요한 점은 관측이 불가능했던 우량계사이의 강우를 관측할 수 있다는 점이라 할 수 있다(건설교통부, 2003; 2004; 석미경 등, 2005). 추가로 공간적으로 분포된 강우장의 파악은 정도 있는 분포형 유출 모의를 가능하게 한다는 수문 해석의 장점도 살펴볼 수 있다(Krajewski 등, 1991; Faures 등, 1995; Smith 등, 2001).

이상과 같이 많은 장점을 갖는 레이더 강우는 그 자체가 직접 측정이 아닌 원격탐사된 자료라는 한계를 갖는다. 가장 근본적인 한계는 지구 곡면의 영향으로 인해 원거리에서의 레이더 강우와 지상 강우 사이의 상관성이 크게 떨어진다는 점이다. 이 외에도, 수신되는 전자기 반사파의 변환방법, 센서의 품질 및 유지관리 상태, 지형학적 조건 등에 따라 레이더 강우의 품질은 크게 달라질 수 있다. 이와 같은 한계를 갖는 레이더 강우의 품질을 향상하고자 하는 노력이 세계 여러 나라에서 경주되고 있으며, 우리나라에서도 마찬가지이다(유철상 등, 2008; 2009; Krajewski와 Smith, 2002; Gebremichael와 Krajewski, 2005).

강우가 강우-유출 해석의 입력자료로써 유출 결과에 큰 영향을 미친다는 것은 당연한 사실이다. 그러나 강우-유출 해석에 필요한 강우의 품질이 어느 정도가 되어야 하는지는 명확하지 않다. 사실, 그러한 기준의 제시가 아직 된 바 없으며, 보다 근본적으로 그러한 평가를 위한 방법론조차 제시되어 있지 못한 것이 현실이다. 기본적으로 강우의 품질에 따라 유출의 결과는 크게 다를 것이며, 따라서 이러한 강우 자료의 품질평가 과정은 유출해석에 있어서 매우 의미 있는 일이 될 것이다. 본 연구에서는 통계학 분야에서 군집분석 또는 회귀분석 결과의 평가목적으로 많이 이용되는 분산분석 기법을 응용하여 레이더 자료의 품질평가 방안을 제시하였다. 아울러 제시된 방법론은 레이더 원자료 및 편의보정이나 기타 자료합성 등의 과정을 거쳐 만들어진 품질 향상된 레이더 자료의 품질을 평가하는데 적용하였다.

## 2. 레이더강우의 품질평가

### 2.1 품질평가의 배경 및 의의

레이더 자료를 참값으로 가정되는 우량계 자료와 비교할 때 크게 두 가지의 문제점이 나타나게 된다. 그 하나는 평

균의 차이이다. 이 평균의 차이를 편의(bias)라고 하는데, 이 편이는 일반적으로 강우강도가 작을 때는 음의 값을 갖고(즉, 레이더 강우가 실제보다 더 크게 나타나고), 반대로 클 때는 양의 값을 갖는다. 즉, 레이더 강우가 작게 나타난다. 전체적으로는 강우강도가 커짐에 따라 편이의 크기도 커지는 경향이 있다. 따라서 레이더 강우의 편의보정은 단순히 편이를 제거하는 방식이 아닌 소위  $G/R$ 비(Ground gauge rainfall/Radar rainfall ratio)를 곱하는 방식이 채택되고 있다 (Anagnostou 등, 1998; Krajewski와 Smith, 2002; Chumchean 등, 2006).

또 다른 문제점은 이렇게 평균 보정을 한다고 해도 여전히 레이더 강우가 우량계 강우와 같지 않다는 점이다. 즉, 일관성 없이 크고 작고가 혼재되어 있어 레이더 강우의 불확실성으로 표현될 수 있는 부분이다. 이러한 불확실성 또는 변동성은 일반적으로 표준오차(standard error) 형태로 정량화 된다. 일반적으로 우량계망으로 관측된 강우는 편이가 없다고 가정하므로 주로 표준오차만을 가지고 자료를 평가하게 되나, 레이더 강우의 경우는 편이가 워낙 크게 부각되므로 편의와 표준오차가 함께 고려되어야 한다.

현재 상태로 보면, 레이더 강우가 강우-유출해석에 무난히 적용될 수 있는 정도를 보장해 주지는 못하고 있다. 그러나 레이더 관련 여러 분야의 기술적인 발전을 통해 레이더 강우의 품질자체도 따라서 향상될 것이다. 그 향상의 정도도 당연히 어떤 품질 기준을 통해 제시되어야 한다. 이러한 품질평가 방안은 레이더 강우, 보정된 레이더 강우뿐만 아니라 예측 강우 등에도 동일하게 적용될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 레이더 강우의 품질을 지상의 우량계 강우와 비교하여 평가하는 기법을 제시하고자 한다. 본 연구에서 제안하는 방법은 일반적으로 통계학 분야에서의 회귀분석이나 분산분석에서 사용하는 개념과 유사하다. 예를 들어, 분산분석에서는 총변동  $SST$ (Sum of Squares Total)를 그룹간 변동  $SSB$ (Sum of Squares Between)와 그룹 내 변동  $SSW$ (Sum of Squares Within)의 합으로 구분하여 표현한다. 부연하면  $SSB$ 는 전체평균과 그룹의 평균 차이로 인한 변동을 의미하고,  $SSW$ 는 그룹 내에 존재하는 자료의 변동을 의미한다. 회귀분석에서도 이러한 분산분석을 기초로 하여 총변동  $SST$ 를 회귀선에 의한 변동  $SSR$ (Sum of Squares Regression)과 잔차 자승합인  $SSE$ (Sum of Squares Error)의 합으로 구분하여 표현하고 있다. 본 연구에서 제시하는 레이더 자료의 품질평가방안도 이와 유사한데, 레이더 강우와 우량계 강우사이의 회귀선에 대한 잔차의 자승합  $SSE$  또는  $SSW$ 와 이상적인 경우 레이더 강우와 우량계 사이에 형성되는 1:1관계의 직선에 대한 변동 요인, 즉 편이를 반영하는  $SSR$  또는  $SSB$ 와의 합으로 총변동  $SST$ 를 표현하는 형태이다. 각 변동 요인에 대한 자유도를 고려하면 상대적인 비교가 가능한  $MSE$ (Mean of Squares Error) 또는  $MSW$ (Mean of Squares Within)와  $MSR$ (Mean of Squares Regression) 또는  $MSB$ (Mean of Squares Between)를 유도할 수 있고, 이를 레이더 자료의 품질 평가에 적용할 수 있을 것이다.

### 2.2 레이더 자료의 품질 평가 방안

현재 레이더 강우자료는 여러 가지 오차로 인하여 수문

해석에의 직접적인 적용은 불가능하다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 레이더 강우자료를 보정하며, 그 보정 방법에는 자료에 대한 평균보정과 변동성에 대한 보정이 있다. 물론 이러한 레이더 자료의 특성이 레이더 자료의 품질 평가에도 반영될 수 있어야 한다.

기본적으로 레이더 자료의 평가 기준은 참값으로 가정되는 우량계 강우가 된다. 실제 단 한개 지점에서의 우량계 강우로 레이더 강우를 평가하지는 않으므로, 우량계 강우와 레이더 강우의 비교 시 참값은 둘 사이에 1:1의 관계가 성립하는 기울기인 45° 직선이 된다. 레이더 강우의 대푯값도 한 점으로 표현되지 않는다. 레이더 강우와 우량계 강우를 비교하는 경우 강우강도의 변화를 고려하면 두 관측값에 대한 회귀식 자체가 레이더 강우의 대푯값 역할을 한다. 마지막으로 대푯값에 대한 오차는 회귀식에 대한 레이더 강우의 잔차가 된다. 따라서 레이더 강우가 가지는 총 오차는 참값과 관측치의 대푯값과의 비교, 즉 기울기가 45° 인 직선과 관측된 우량계 강우와 레이더 강우사이의 회귀식과의 차이를 나타낸 부분인 *SSB*와 이 회귀식의 잔차를 고려하는 *SSE*의 합으로 나타낼 수 있다. *SSB*와 *SSE*는 다음과 같이 계산된다.

$$SSB = \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - \bar{x}_{45^\circ})^2 \quad (1)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2 \quad (2)$$

위 식에서  $n$ 은 비교에 사용된 우량계와 레이더 강우자료의 개수를,  $x_i$ 는 레이더 강우를,  $\hat{x}_i$ 는 레이더 강우에 대응되는 레이더 강우와 우량계 강우의 회귀식 상의 값을, 마지막으로  $\bar{x}_{45^\circ}$ 는 레이더 강우에 대응되는 45° 직선상의 값을 의미한다. 이러한 과정을 분산분석표와 동일한 형태로 나타내면 Table 1과 같다. 이 표에서 *MSB*는 편의의 정도를 파악하는 부분이고, *MSE*는 편의의 보정으로 보정할 수 없는 레이더 강우의 무작위 오차부분을 설명하는 부분이다. 이 둘을 모두 고려한 *MST*(Mean Squares Total)가 레이더 강우의 품질을 나타내게 된다.

만일 레이더 강우의 편의보정이 완벽하게 이루어 졌다면 보정된 레이더 강우의 품질은  $MST=MSE$ 로 나타나게 된다.

Table 1. Evaluation Table of Radar Rainfall

	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean of Squares
Bias	1	SSB	MSB
Error	n-2	SSE	MSE
Sum	n-1	SST	MST

그러나 *MSE*가 클 경우 여전히 레이더 강우의 품질은 나쁜 상태로 남아있게 된다. 이러한 상황은 우량계 강우에 비해 레이더 강우의 공간적 불확실성이 더욱 큰 경우에 나타날 수 있다. 지형적인 영향이 크거나, 또는 유역이 레이더 지점을 기준으로 길게 뻗어 있는 경우에 이런 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제가 심각할 경우에는 우량계 강우와 레이더 강우의 합성을 통한 품질향상방안을 고려하여야 한다.

### 2.3 적용 예

Fig. 1은 2006년 7월 13일 01-18일 00시 사이에 관측된 우량계와 강화 강우레이더 강우를 비교한 것이다. Fig. 1(a)는 편의보정 전의 그림이고 Fig. 1(b)는 편의보정 후의 그림이다. Table 2는 Fig. 1의 편의보정 전·후에 대한 레이더 자료의 품질 평가 결과를 나타낸 것이다. 표를 통해 살펴볼 수 있듯이 편의보정 전에는 *SSB*가 *SST*에서 큰 비중을 차지하고 있으나, 편의보정을 실시한 후 *SSB*의 비중이 *SSE*에 비해 현저히 떨어짐을 살펴볼 수 있다. 그러나 여전히 *SSB*가 남아 있다는 것은 소위 지상강우와 레이더 강우의 비인

Table 2. An example of radar rainfall evaluation table

		Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean of Squares
Before Bias Correction	Bias	1	96,639.2	96,639.2
	Error	2,041	1,439.7	0.7
	Sum	2,042	98,078.9	96,639.9
After Bias Correction	Bias	1	8,393.7	8,393.7
	Error	2,041	38,298.5	18.8
	Sum	2,042	46,692.2	8,412.4

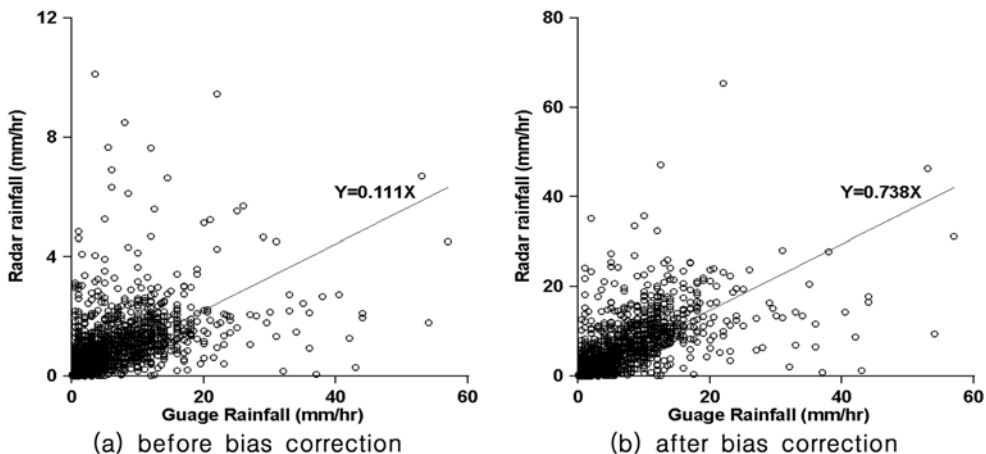


Fig. 1 An example of radar rainfall data quality evaluation

$G/R$ 비를 이용한 보정 자체가 편의를 완벽하게 제거하는 방법은 아니라는 것을 의미한다.

### 3. 레이더 강우 자료의 품질 향상과 정도 평가

#### 3.1 레이더 자료의 품질 향상

현재 레이더는 수문해석에 적용할 수 있는 정도의 자료를 제공하지는 못한다. 이는 근본적으로 레이더가 강우를 직접 관측하는 것이 아닌 일종의 원격탐사 장비라는 점에 기인한다(유철상과 김경준, 2007). 또한 레이더가 강우량을 정도 있게 측정한다고 할지라도 레이더 강우는 상공의 강우량을 측정하는 것이기 때문에 지상에 떨어지는 강우량과는 차이를 가지게 된다(Fulton 등, 1998). 이 외에도 여러 가지 오차 원인으로 인해 일반적으로 레이더 강우 추정치는 실제 강우를 과소 추정하는 경향을 가지게 된다(Krajewski와 Smith, 2002).

이와 같은 문제점을 해결하기 위해 먼저 시도되는 것이 바로 지상에서 관측된 자료를 이용한 레이더 강우자료의 평균적 편의보정(mean-field bias correction)이다. 일반적으로 오차 원인에 대한 충분한 고려 없이 지상에서 측정된 우량계 자료에 준하도록 레이더 강우 자료의 평균을 보정하게 된다(김진극과 안상진, 2006; Barnston, 1990). 이 경우 가장 많이 이용되는 방법으로 레이더 강우와 우량계 강우의 차이를 보정계수(mean field(multiplicative) bias)를 적용하여 보정해 주는 방법과(Emmanouil 등, 1998; Seo 등, 1999; Chumchean 등, 2006) 두 자료의 확률밀도함수(probability density function)를 비교하여 보정해 주는 방법이다(김효경 등, 2002; Rosenfeld 등, 1993).

그러나 평균적 편의가 완벽하게 제거된다 하더라도 강우의 공간적인 변동특성까지를 고려하는 데에 한계를 가지게 된다(김경준 등, 2008; Todini, 2001). 이 단계에서 우리는 적절한 방법으로 레이더 강우 자료와 지상 강우 자료를 합성(synthesis)하게 된다. 즉, 상대적으로 높은 정확도를 가지는 지상 강우 자료와 공간적인 분포경향을 파악할 수 있는 레이더 강우 자료의 장점을 적절하게 조합하게 되면, 공간적으로 분포된 정도 높은 강우 자료를 획득하는 것이 가능해진다. 여기서 두 자료를 합성한다는 의미는 독립적인 두 관측 방법의 특성을 합성한다는 의미를 포함하게 된다. 지상에서 측정되는 점 관측 자료는 시간적으로 연속적인 강우량을 파악하는 것이 가능하지만 공간적으로는 이산적인 관측 특성을 나타내고, 레이더의 경우는 공간적으로 연속적인 강우 관측을 수행하지만 시간적으로는 이산적인 관측 특성을 나타낸다. 따라서 두 강우 자료를 합성한다는 것은 단순히 정도 높은 지상 강우 자료와 레이더 강우 자료를 합성한다는 의미뿐만 아니라 다른 관측 특성으로 인한 강우의 오차 규모를 감소시킬 수 있다는 장점을 가지게 되는 것이다. 가장 빈번하게 이용되는 합성 방법은 지구통계학(Geostatistics)적 방법 중 하나인 Co-Kriging 방법이라 할 수 있다(Krajewski, 1987; Seo 등, 1990a; 1990b).

최근에는 추가로 자료동화기법(data assimilation technique)도 다양하게 시도되고 있다(McLaughlin, 2002). 자료동화기법은 전통적으로 기상학 분야에서 많이 발전되어 온 방법으로 제

한적인 정보, 즉 관측 자료를 이용하여 대기의 상태를 파악하는데 있어서 이를 잘 나타내는 모형을 이용하여 동화하는 방법이라고 정의할 수 있다(Kalnay, 2003). 여기서 동화(assimilation)란 관측치를 가장 잘 구현하는 모형을 찾아내는 과정을 의미한다. 전통적으로 자료동화기법들은 수치예보에 있어 성긴(course) 관측 자료를 모형의 초기장과 동일한 시-공간적 해상도의 자료로 보정하기 위해 많이 이용되어 왔다(Daley, 1991; Kuo 등, 1993; Errico 등, 2000). 자료동화기법은 연속수정법(successive correction method; Cressman, 1957), Nudging(Hoke와 Anthes, 1976), variational method(Grecu와 Krajewski, 2001), Kalman filtering(Caya 등, 2005; Chumchean 등, 2006) 등과 같이 많은 방법들이 개발되고 응용되어 왔다. 최근 수문 분야에서도 그에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

본 연구에서는 이들 방법 중 편의보정방법으로  $G/R$ 비를 적용하는 방법을 자료합성기법으로 Co-Kriging과 연속수정법을 고려하기로 한다. 먼저,  $G/R$ 비는 간단히 다음과 같은 식에 근거하여 추정한다(Seo 등, 1999; Chumchean 등, 2006).

$$G/R = \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (3)$$

여기서  $G/R$ 는  $G/R$ 비를,  $n$ 은 가용한 자료 쌍의 개수,  $G_i$ 는  $i$ 번째 지상 강우량, 그리고  $R_i$ 는  $i$ 번째 지상 강우 관측소에 대응하는 레이더 격자 자료를 나타낸다.  $G/R$ 비가 1.0일 경우는 레이더와 지상 강우 자료 간 편의가 없다는 것을 의미하며, 0.0~1.0의 범위를 가질 경우는 레이더 강우 추정치가 지상 강우자료에 비해 과대 추정되었다는 것을 의미한다. 일반적인 레이더 강우 추정치는 과소 추정되는 경향이 크기 때문에  $G/R$ 비는 1.0이상의 값을 가지게 된다. 자료합성기법으로 고려한 방법 중 Co-Kriging과 연속수정법의 구체적인 배경은 Seo 등(1990a; 1990b)와 김경준(2008) 등에서 자세히 살펴볼 수 있다.

#### 3.2 품질향상 방법별 효과 검토

본 연구에서는 레이더 강우자료의 품질평가 사례로 관악산 기상레이더와 127개의 지상강우를 적용(Fig. 2)하였고 2003년의 대류성 강우와 2002년 태풍 루사 사례를 검토하였다(Fig. 3). 대류성 강우의 경우에는 상대적으로 공간적 규모가 적으며, 시공간적 변동성이 크고, 아울러 간헐성도 매우 큰 경우에 해당한다. 이에 반해 태풍 루사의 경우는 공간적 규모가 크고, 특히 간헐성이 작은 특성을 갖는다.

Table 3은 각 호우사상에 대한 품질평가 결과를 나타낸다. 보정 전 자료인 레이더 원자료는 SSB 보다 SSE가 훨씬 작게 나타나고 있다. 이는 레이더 원자료는 값 자체가 작아 분산 자체가 작은 반면에, 참값이라고 가정하는 45° 회귀선과는 큰 차이를 나타내고 있기 때문이다. 즉, 레이더 원자료의 품질문제는 가장 크게 편의에서 기인하고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 적용한 3가지 품질향상 방법은 편의보정 방법인  $G/R$ 비를 적용하는 방법과 편의보정과 동시에 공분산의 보정도 고려되는 Co-Kriging 및 SCM 방법이다. 이 방법의 적용 결과를 살펴보면, 무엇보다도 레이더 원자료에 비해

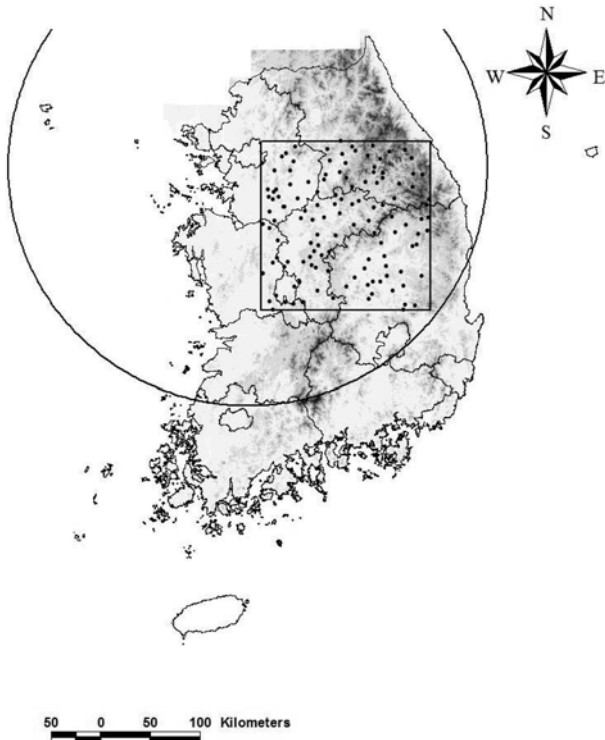


Fig. 2 Mt. Gwanak radar and ground gauges

*SSB*가 현격히 줄어들 수 있다. 즉, 위 방법을 통해 레이더 자료의 편의가 상당히 보정되었음을 나타낸다. 그러나 여전히 *SSB*가 0이 아닌 상태로 남아 있음에 주목할 필요가 있다. 즉, 이러한 방법의 적용에도 불구하고 편의가 완전히 제거되지 않았으며, 단순히 편의보정만을 수행하는 *G/R*비를 적용한 경우에도 편의가 0이 되지 않았다. 이러한 문제의 원인으로 여러 가지를 살펴볼 수 있으나, 이론적으로는 강우의 간헐성 문제와 강우자료가 정규분포를 따르지 않는다는 점을 들 수 있다. 즉, 무강우로 표현된 부분을 적절히 고려하지 않는 문제점과 정규분포를 따르지 않는 강우가 정규분포를 따른다고 가정하는 문제점이 이와 같은 부정확한 편의 제거의 원인인 것이다.

*SSE*의 경우는 *SSB*와는 다르게 오히려 증가하는 것으로

나타난다. 이는 편의 보정과정에서 레이더 강우의 값이 전반적으로 커짐에 따라 발생하는 현상이다. 그러나 이러한 현상은 편의제거의 방법으로 편의를 차감하는 형태가 아닌 참값과의 비율을 곱해주는 형식을 취하고 있기 때문이다. 현재와 같은 방법론을 적용하는 경우 이러한 *SSE*의 증가문제는 피할 수 없다. 고려한 세 가지의 방법론의 적용 결과를 비교하면, 단순히 평균 보정만을 수행하는 *G/R*비의 적용 결과보다는 우량계 자료의 공분산 구조를 반영하는 Co-Kriging 및 SCM 방법의 적용 결과가 보다 우수한 것으로 나타났다. *G/R* 비를 적용하는 방법은 공간적으로 평균화된 비를 레이더 강우에 곱하는 것으로 자료의 평균적인 편의를 제거하나 자료의 변동성으로 인한 오차를 제거하는 데에는 한계를 가진다. 반면 Co-Kriging과 SCM은 자료의 편의제거와 함께 오차분산을 최소화 만들어 주는 방법이기 때문에 *G/R*비 적용 방법보다 이론적으로 우수할 수 밖에 없다.

호우사상에 따른 비교에서는, 특히, 각 호우사상에 따라 자유도가 다르게 나타나므로, 자유도를 고려한 *MSB* 및 *MSE*를 살펴보아야 한다. 그러나 레이더 자료의 편의와 관련된 *MSB*의 경우에는 자유도가 언제나 1이므로 고려되는 자료의 수가 많을수록 오차의 규모가 커지게 되는 문제점이 있다. 이런 이유로 호우의 공간적인 규모가 큰 태풍의 경우가, 양의 값을 가진 우량계 강우 및 레이더 강우의 쌍이 훨씬 많아, 대류성 강우에 비해 *MSB*가 훨씬 크게 나타나는 것이다. 따라서 현재 상태로 두 호우사상에 대해 어떤 사상이 더 큰 오차를 포함하고 있다고 단정하는 것은 무리이다. 반대로 *MSE*의 경우에는 자료의 수만큼 자유도가 반영되기 때문에 자료수의 크고 작음에 따른 영향이 없다. 표에 나타난 결과를 살펴보면 세 경우 모두 *MSE*의 획기적인 증가가 있었음을 확인할 수 있다. 이는 과소 추정된 레이더 강우를 보정하는 과정에서 발생하는 결과이다. 즉, 편의에 의한 오차가 대폭 줄어드는 대신 잔차에 의한 오차는 반대로 크게 증가하는 식이다. 이러한 문제점은 현재 적용되는 평가 방법론에서는 피할 수 없는 문제이다. 추가로, 품질향상 방법론에 따른 결과가 호우사상에 따라 다르게 나타남에도 주목할 필요가 있다. 즉, 호우사상의 특성에 따라 보다 좋은 보정결과를

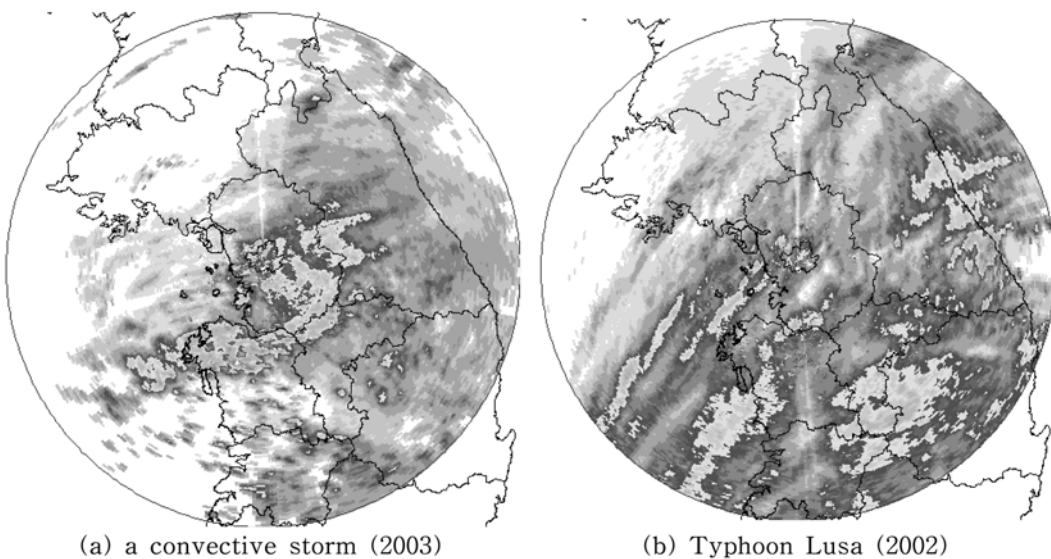


Fig. 3 Storm events considered in this study

Table 3. Evaluation table of radar and improved radar rainfall data

		Convective			Typhoon Lusa		
		Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean of Squares	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean of Squares
Raw Radar	Bias	1.0	42,549.0	42,549.0	1.0	124,271.0	124,271.0
	Error	1,309.0	258.6	0.2	1,858.0	467.2	0.3
	Sum	1,310.0	42,807.6	42,549.2	1,859.0	124,738.2	124,271.3
G/R	Bias	1.0	2,036.7	2,036.7	1.0	42,991.4	42,991.4
	Error	1,309.0	24,816.4	19.0	1,858.0	39,116.8	21.1
	Sum	1,310.0	26,853.1	2,055.6	1,859.0	82,108.2	43,012.5
Co-Kriging	Bias	1.0	1,880.8	1,880.8	1.0	34,238.7	34,238.7
	Error	1,309.0	430,312.6	328.7	1,858.0	42,747.8	23.0
	Sum	1,310.0	432,193.4	2,209.5	1,859.0	76,986.5	34,261.7
SCM	Bias	1.0	1,880.8	1,880.8	1.0	29,918.4	29,918.4
	Error	1,309.0	17,866.4	13.6	1,858.0	67,209.9	36.2
	Sum	1,310.0	19,747.2	1,894.4	1,859.0	97,128.2	29,954.6

나타내는 품질향상 방법론이 있을 수 있다는 결과이기도 하다. 그러나 각 호우사상의 어떤 특성이 어떤 품질향상 방법론을 보다 효율적으로 만드는지에 대해서는 알려진 바가 없다. 이 또한 추가로 연구되어야 할 문제이기도 하다.

#### 4. 결 론

강우는 강우-유출 해석의 입력 자료로서 유출 결과에 큰 영향을 미친다. 이러한 강우의 품질을 평가하는 것은 수문해석에 있어서 매우 중요한 일이다. 그 자체로 유출결과의 품질을 좌우하기 때문이다. 본 연구에서는 이러한 목적으로 레이더 자료의 품질평가 방안을 제시하였다. 제시한 방법론은 통계학 분야에서 많이 사용되는 분산분석의 개념과 유사하며, 편의로 인한 오차 및 변동성으로 인한 오차를 구분하여 나타내는 형태를 가지고 있다. 본 연구에서 제시된 방법론은 대류성 강우(2003년) 및 2002년의 태풍 루사 등의 호우사상에 적용하였다. 본 연구에서는 레이더 원시 자료, G/R 보정된 자료 및 Co-Kriging, SCM 등의 자료합성 기법을 적용한 자료에 적용하여 그 결과가 어떤 품질특성을 나타내는지 평가하였다.

본 연구에서 고려한 두 개의 호우사상에 대해 레이더 원시 자료 및 품질향상된 레이더 자료에 대해 품질 평가를 실시한 결과, 편의로 인한 오차는 품질향상기법의 적용으로 급격히 감소함을 확인하였다. 그러나 자료의 변동성으로 인한 오차는 이들 방법론의 적용으로 오히려 커짐을 확인할 수 있었다. 이러한 원인은 간단히 적용된 방법의 한계로 편의보정의 방법이 편의를 차감하는 형태가 아닌 참값과의 비율을 적용하는 형태이기 때문이다. 적용된 세 방법 중 편의보정 및 공분산 구조의 보정을 함께 반영하는 Co-Kriging 및 SCM 방법이 단순히 G/R 비를 적용하는 경우에 비해 우수한 것으로 평가되었다. G/R 비는 공간적으로 평균화된 비로 오차의 규모를 줄이는데 반해 Co-Kriging과 SCM은 자료의 공분산 구조를 통해 각 자료의 오차를 줄인다는 점에서 당연한 결과라 할 수 있다. 그러나 호우사상에 따른 일관된

결과는 확인할 수 없었다. 이는 호우사상의 특성에 따라 보다 좋은 성과를 낼 수 있는 품질향상 방법론이 있을 수 있음을 의미하는 결과이기도 하다.

본 연구에서 제시한 품질평가 기법은 주어진 호우사상에 대한 레이더 원자료 및 품질 향상된 자료의 품질 평가에 적용할 수 있다. 그러나 자료 수의 차이로 인해 호우사상에 따른 레이더 자료의 품질을 비교하는 데에는 한계를 갖는다. 이는 고려되는 자료 수에 따라 편의로 인한 오차규모가 달라지기 때문이다. 이러한 문제점은 보다 일반적인 방법론의 제시를 위해 개선되어야 함은 당연하다. 아울러, 강우에 대한 품질 평가는 궁극적으로 유출 해석의 품질평가로 이어질 것이며, 이러한 강우의 품질 평가가 유출의 품질 평가 방법에 어떻게 영향을 미치는 지에 대한 연구가 필요한 상황이다. 이러한 연구를 통해 강우-유출 자료에 적용 가능한 레이더 강우의 품질기준을 제시할 수 있기 때문이다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국수자원공사의 물산업 핵심분야 연구개발비 지원사업의 일환으로 수행되었습니다(No. KIWE2008-0003). 연구지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 건설교통부(2002) 수문관측효율성 제고방안 연구.
- 건설교통부(2003) 전국 강우레이더 설치 및 홍수에경보시스템 개선 기본계획 수립(II).
- 건설교통부(2004) 전국 강우레이더 설치 및 홍수에경보시스템 개선 기본계획 수립(III).
- 김경준, 최정호, 유철상(2008) 연속수정법을 이용한 레이더 자료와 지상 강우자료의 합성. 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제41권, pp. 681-691.
- 김효경, 이동인, 유철환, 권원태(2002) WPMM 방법을 이용한 레이더 강수량 추정 : 1. 1998년 여름철 관악산 DWSR-88C를 위한  $Z_e-R$  관계식 산출. 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제35권, pp. 25-36.

- 김진극, 안상진(2006) 기상레이더 강우량 산정법을 이용한 유출 해석. *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제26권 제1B호, pp. 7-14.
- 석미경, 남경엽, 김영화, 오성남(2005) WPM을 이용한 레이더 반사도로부터 정량적 레이더 강우강도의 추정. *한국기상학회지*, 한국기상학회, 제41권, pp. 123-138.
- 신현석, 정상만(2000) 엘리노라리나 영향 지수 기법의 개발 및 한반도 수자원에의 영향분석. *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제33권, pp. 327-332.
- 심재관, 장기호, 남경엽, 조천호(2005) 병합 기법을 이용한 정량적 강수 예측. *기상기술*, 제1권, pp. 111-120.
- 안상진, 연규방, 이재경, 이주현(2002) 2002년 중부지역 홍수피해 현황 및 분석. *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제35권, pp. 20-35.
- 유철상, 김경준(2007) 강우 레이더와 지상 우량계의 통합관측효과. *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제40권, pp. 841-849.
- 유철상, 윤정수, 김병수, 하은호(2009) 레이더 강우의 편차 보정을 위한 지역적으로 편중된 우량계 망의 평가: 강화강우레이더의 사례 연구. *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제42권, pp. 493-593.
- 유철상, 하은호, 김경준(2006) 강우의 공간상관구조에 대한 무강우자료의 영향. *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제39권, pp. 127-138.
- 유철상, 하은호, 김병수, 김경준, 최정호(2008) 부분적 레이더 정보에 따른 면적평균강우의 관측오차. *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제41권, pp. 545-558.
- 한국수자원공사(2004) 전국하천 수자원 · 환경기초조사 종합계획, 연구보고서.
- Anagnostou, E.N., Krajewski, W.F., Seo, D.-J., and Johnson, E.R. (1998) Mean-field rainfall bias studies for WSR-88D. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 149-159.
- Barnston A.G. (1990) An empirical method of estimating raingage and radar rainfall measurement bias and resolution. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 30, pp. 282-296.
- Brilly, M., Rusjan, S., and Vidmar, A. (2006) "Monitoring the impact of urbanisation on the Glinscica stream". *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 31, pp. 1089-1096.
- Burlando, P., Montanari, A., and Ranzi, R. (1996) Forecasting of storm rainfall by combined use of radar, rain gages and linear models. *Atmospheric Research*, Vol. 42, pp. 199-216.
- Caya, A., Sum, J., and Snyder, C. (2005) A comparison between the 4DVAR and the ensemble Kalman filter techniques for radar data assimilation. *Monthly Weather Review*, Vol. 133, pp. 3081-3094.
- Chumchean, S., Seed, A., and Sharma, A. (2006) Correcting of real-time radar rainfall bias using a Kalman filtering approach. *Journal of Hydrology*, Vol. 317, pp. 123-137.
- Cressman, G.P. (1957) An operational objective analysis system. *Monthly Weather Review*, Vol. 87, pp. 367-374.
- Daley, R. (1991) *Atmospheric data analysis*, Cambridge university press, Cambridge.
- Emmanouil, N.A., Krajewski, W.F., Seo, D.J., and Johnson, E.R. (1998) Mean-field rainfall bias studies for WSR-88D. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 3, pp. 149-159.
- Errico, R., Ohring, G., Derber, J., and Joiner, J. (2000) NOAA-NASA-DoD workshop on assimilation of satellite data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 81, pp. 2457-2462.
- Faures, J.M., Goodrich, D.C., Woolhiser, D.A., and Sorooshian, S. (1995) Impact of small-scale spatial rainfall variability on runoff modeling. *Journal of Hydrology*, Vol. 173, pp. 309-326.
- Fowler, H.J., Ekstrm, M., Kilsby, C.G., and Jones, P.D. (2005) New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 1. Assessment of control climate. *Journal of Hydrology*, Vol. 300, pp. 212-233.
- Fulton, R.A., Breidenbach, J.P., Seo, D.J., Miller, D.A., and O'Bannon, T. (1998) The WSR-88D rainfall algorithm. *Weather and Forecasting*, Vol. 13, pp. 377-395.
- Gebremichael, M. and Krajewski, W.F. (2005) Modeling the distribution of temporal sampling errors in area-time-averaged rainfall estimates. *Atmospheric Research*, Vol. 73, pp. 243-259.
- Greco, M. and Krajewski, W.F. (2001) Rainfall forecasting using variational assimilation of radar data in numerical cloud model. *Advanced in Water Resources*, Vol. 24, pp. 213-224.
- Hoke, J.E. and Anthes, R.A. (1976) The initialization of numerical models by a dynamic-initialization technique. *Monthly Weather Review*, Vol. 104, pp. 1551-1556.
- Kalnay, E. (2003) *Atmospherical modeling data assimilation and predictability*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Krajewski, W.F. (1987) Cokriging of radar-rainfall and rain gage data. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92, pp. 9571-9580.
- Krajewski, W.F., Lakshmi, V., Georgakakos, K.P., and Jain, S.C. (1991) A Monte Carlo study of rainfall sampling effect on a distributed catchment model. *Water Resources Research*, Vol. 27, pp. 119-128.
- Krajewski W.F. and Smith, J.A. (2002) Radar hydrology: rainfall estimation. *Advances in Water Resources*, Vol. 25, pp. 1387-1394.
- Kuo, Y.H., Guo, Y.R., and Westwater, E.R. (1993) Assimilation of precipitable water measurement into a mesoscale numerical model. *Monthly Weather Review*, Vol. 121, pp. 1215-1238.
- McLaughlin, D. (2002) An integrated approach to hydrologic data assimilation: interpolation, smoothing, and filtering. *Advances in Water Resources*, Vol. 25, pp. 1275-1286.
- Rosenfeld, D., Wolff, B.D., and Atlas, D. (1993) General probability-matched relations between radar reflectivity and rain rate. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 32, pp. 50-72.
- Seo, D.J., Breidenbach, J.P., and Johnson, E.R. (1999) Real-time estimation of mean field bias in radar rainfall data. *Journal of Hydrology*, Vol. 223, pp. 131-147.
- Seo, D.J., Krajewski, W.F. and Bowles, D.S. (1990a) Stochastic interpolation of rainfall data from rain gages and radar using cokriging: 1. Design of experiments. *Water Resources Research*, Vol. 26, pp. 469-477.
- Seo, D.J., Krajewski, W.F., Azimi-Zonooz, A., and Bowles, D.S. (1990b) Stochastic interpolation of rainfall data from rain gages and radar using cokriging: 2. Results. *Water Resources Research*, Vol. 26, pp. 915-924.
- Smith, J.A., Baeck, M.L., Zhang, Y., and Doswell, C.A., III (2001) Extreme Rainfall and Flooding from Supercell Thunderstorms. *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 2, pp. 469-448.
- Sugimoto, S., Nakakita, E., and Ikebuchi, S. (2001) A stochastic approach to short-term rainfall prediction using a physically based conceptual rainfall model. *Journal of Hydrology*, Vol. 242, pp. 137-155.
- Takasao, T., Shiba, M., and Nakakita, E. (1994) A real-time estimation of the accuracy of short-term rainfall prediction using radar. *Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering*, Vol. 10, pp. 339-351.
- Todini, E. (2001) A Bayesian technique for conditioning radar precipitation estimates to rain-gauge measurements. *Hydrology and Earth System Science*, Vol. 5, pp. 187-199.

(접수일: 2009.11.23/심사일: 2010.3.8/심사완료일: 2010.7.17)