

우량계 강우를 이용한 레이더 강우의 Ground-Truth 방법 검토

On Ground-Truth Designs of Radar Rainfall Using Rain Gauge Rainfall

유철상* / 김병수** / 김경준*** / 최정호****

Yoo, Chulsang / Kim, Byoungsoo / Kim, Kyoungjun / Choi, Jeongho

Abstract

This study theoretically compared three possible methods for the ground-truth, that is three ground-truth designs of radar rainfall using the rain gauge rainfall. Theoretical results derived are first applied to the rainfall field generated by the Waymire-Gupta-Rodriguez Iturbe(WGR) model, and then to the Mt. Gwanak radar data using the rain gauge data from MOCT within the radar range of observation. Overall application results were found to be similar to those from theoretical studies, also those from the application to the WGR rainfall field. In conclusion, the ground-truth design using only positive(+) rainfalls from both radar and rain gauges causes serious design bias to be inappropriate as a ground-truth design.

keywords : radar rainfall, ground-truth, design bias, retrieval bias

요 지

본 연구에서는 레이더 강우의 ground-truth를 위해 가능한 3가지 비교방법, 즉 3가지 ground-truth 설계를 이론적으로 검토하였다. 이론적인 결과는 먼저, WGR 강우모형으로 모의된 3차원 강우장에 적용하여 검토하였으며, 아울러 실측자료인 관악산 레이더 자료 및 레이더 관측영역 내 건설교통부 관할 지상관측소 강우 자료에 적용하여 평가하였다. 전체적인 적용결과는 이론적인 분석내용 및 모의 강우를 이용하여 수행한 내용과 유사함을 확인하였다. 결론적으로 레이더 및 우량계 강우가 양(+)인 경우만을 비교하는 형태는 심각한 설계편의를 유발하여 레이더 강우의 ground-truth에 적절하지 못함을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 레이더 강우, ground-truth, 설계편의, 보정편의

* 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수

Professor, Dept. of Civil & Environmental System Engrg., Korea Univ., Seoul 136-713, Korea
(e-mail: envchul@korea.ac.kr)

** 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental System Engrg., Korea Univ., Seoul 136-713, Korea
(e-mail: keslo@naver.com)

*** 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정

Doctoral Student, Dept. of Civil & Environmental System Engrg., Korea Univ., Seoul 136-713, Korea
(e-mail: guitar77@korea.ac.kr)

**** 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정

Doctoral Student, Dept. of Civil & Environmental System Engrg., Korea Univ., Seoul 136-713, Korea
(e-mail: justinchoi@korea.ac.kr)

1. 서론

1990년대 후반부터 엘리뇨, 라니냐 현상 등의 기후변동 및 지구온난화로 대변되는 기후변화의 영향으로 전 세계적으로 많은 기상이변을 겪고 있다(신현석과 정상만, 2000). 우리나라의 경우도 예외가 아니어서 보다 강력한 태풍 및 국지적인 대류성 강우의 발생으로 인해 강우기록이 연일 경신되고 있는 상황이다(오테석 등, 2005). 또한 도시화 및 산업화의 급속한 진행에 따라 이러한 호우사상에 의한 피해규모도 급격한 증가추세를 보이고 있다(김양수, 2002; 박상덕, 2002; 안상진 등, 2002).

현실적으로 이상호우에 의한 피해를 원천적으로 방지하는 것은 불가능하다. 그러나 어느 정도(accuracy) 이상의 강우예측이 전제된다면 피해의 규모를 크게 줄일 수 있는 것이 또한 사실이다. 강우예측에는 물론 강우장의 정량적 파악이 선행되어야 하며, 이를 기반으로 다양한 예측방법이 적용될 수 있다(심재관 등, 2005; Burlando et al., 1996). 우리나라에서도 이러한 목적으로 5대강, 7대 중소하천 및 7개 주요 도시지천에 대하여 전국 강우레이더 설치 기본계획을 3개년에 걸쳐 수립한 바 있으며(건설교통부, 2002, 2003, 2004), 이에 따라 현재 5대강 홍수통제소에서는 강우레이더의 설치에 관한 계획을 수립중이다. 특히, 낙동강과 영산강 수계에 강우레이더 설치 기본 및 실시설계가 수행중이다.

레이더는 넓은 지역에 걸쳐 실시간으로 강수현상을 감시하고 지상우량계로는 파악이 불가능한 우량계 틈새로 통과하는 국지적인 호우나 강우 이동 및 강우 상황 등의 파악도 가능하다. 아울러 다양한 강수의 패턴이나 정보를 얻는데도 뛰어난 성능을 가지고 있다(건설교통부, 2003, 2004; 석미경 등, 2005; 엄원근, 1995; Ha and North, 1994; Ha et al., 2002). 이와 같은 이유로 레이더를 이용한 강우의 측정 방법이 강우장의 특성파악 및 예측에 중요한 도구로 대두되고 있는 것이다. 우리나라에는 1970년부터 기상청에서 가동 중인 관악산 레이더를 비롯해 총 11기의 기상레이더가 있으나 강우관측만을 대상으로는 하는 것은 아니다. 현재 강우관측만을 목적으로 설치 운영 중인 강우레이더는 임진강 유역의 특수성을 감안하여 도입한 강화 수문레이더가 유일하다(염경택 등, 2000).

레이더를 이용하여 정량적인 강우량을 추정하는 경우, 정확도의 확보 측면에서 많은 문제점이 발생한다. 이는 레이더가 일종의 원격탐사 장비로써 강우장에 대한 전자파의 반사 및 감쇄특성을 이용하여 강우강도를 간접적으로 추정하기 때문이다. 특히 강우특성과 지역

적인 특성에 따라 다르게 나타나는 변환과정의 비선형성으로 인해 지상우량계 자료 수준의 강우강도 제공은 현재까지도 매우 어려운 것으로 알려져 있다(Barnston and Thomas, 1983; Wilson, 1970; Wilson and Brandes, 1979; Woodley et al., 1975). 따라서 레이더 강우 자료의 정도를 높이기 위해 다양한 보정 방법들이 시도되고 있는 것은 당연한 일이다.

레이더 강우의 보정 문제는 근본적으로 레이더 강우의 평균을 보정하는 것에서 출발한다. 즉, 관측방법에 따른 편의(bias)를 어떻게 찾아서 제거하느냐가 일차적으로 중요한 문제이다. 이 문제가 해결되어야만 그 다음 문제인 강우장의 시-공간적 공분산구조를 보정할 수 있다. 궁극적으로는 평균 및 시-공간적 공분산 구조를 일치시킨 두 자료를 적절히 이용함으로써 강우의 시-공간적인 분포를 포괄적으로 측정할 수 있는 레이더의 장점과 강우량을 한 지점에서 상대적으로 정확하게 측정할 수 있는 우량계의 장점이 서로 잘 융합될 수 있다(건설교통부, 2002; Barnston, 1990; Wilson and Brandes, 1979).

현재는 레이더 강우가 갖는 편의의 제거를 위한 다양한 방법론이 시도되고 있는 상황이다. 이들 방법론들은 관측지역 전체에 대한 단일 매개변수를 추정하여 이용하는 방법(Creutin et al., 1997), 지점별 매개변수를 추정하여 이용하는 방법(김진극과 안상진, 2006), 레이더 강우와 지상우량계 강우 사이의 회귀식을 추정하여 이용하는 방법(Barnston and Thomas, 1983; Barnston, 1990), 확률밀도함수를 비교하는 방법(Calheiros and Zawadzki, 1987; Rosenfeld et al., 1993; 김효경 등, 2002) 등 매우 다양하다. 이들 방법은 물론 모두 이론적으로 유도된 $Z-R$ 관계식에 근거를 두고 연구한 방법들이다(Wilson, 1963; Seed et al., 2002; Li and Lai, 2004). 그러나 보다 근본적인 연구에 해당하는 편의 자체의 존재를 확인하고 그 특성을 정량화하는 연구는 레이더 수문학 분야에서 많지 않다. Ha and North(1999), Ha et al.(2002), Yoo et al.(2006) 등의 연구를 이 분야의 연구로 분류할 수 있는데, 모두 인공위성을 이용하여 강우를 관측할 경우 발생하는 편의의 제거와 관련한 연구들이다.

레이더 강우자료가 가지는 편의의 제거문제는 소위 우량계 자료를 이용한 ground-truth 문제라고 정의할 수 있다. 이는 기본적으로 레이더 강우의 보정에 참값이라고 가정되는 지상의 우량계 강우자료를 이용하기 때문이다. 그러나 레이더 강우와 우량계 강우를 비교하여 그 편의를 찾아내는 데에는 먼저 어떤 자료를 비교해야 되느냐의 문제부터 단순하지 않다. 전절에서 언급

한 일련의 방법들은 일반적으로 레이더와 지상우량계의 양(+)의 강우만을 고려한다. 그러나 이런 경우에는 강우의 가장 중요한 특성중의 하나인 강우의 시-공간적인 간헐성(intermittency)을 고려하지 못하는 문제점을 갖게 된다(Ha and Yoo, 2006). 실제로 강우의 통계적 특성들은 무강우 부분의 정도에 매우 민감하게 반응하며, 강우부분만을 가지고 추정된 통계적 특성과 크게 다를 수 있다(유철상 등, 2006; Shimizu, 1993).

본 연구는 레이더 강우의 ground-truth를 목적으로 어떻게 레이더 자료와 우량계 자료를 비교해야 하는지에 초점을 맞추고자 한다. 즉, 비교하는 방법 또는 형태(본 연구에서는 설계(design)라 칭함)에 따라 편의의 추가여부, 즉 설계편의(design bias)의 도입가능성을 이론적으로 파악해 보고 이를 실제 관측된 자료를 이용하여 확인해 보고자 한다. 설계편의가 도입되는 경우에는 레이더 강우 및 우량계 강우사이의 정량적인 차이를 파악할 수 없게 되고, 따라서 이를 기준으로 보정된 레이더 강우는 더욱 왜곡된 자료가 될 수 있는 것이다. 레이더 강우와 우량계 강우를 고려하는 비교 형태는 모두 세 가지이다. 먼저 design 1은 무강우를 포함한 모든 자료를 사용하는 경우이며, design 2는 레이더 강우가 양(+)인 경우만을, design 3은 레이더 및 지상강우가 모두 양(+)인 경우만을 고려한다. 본 연구에서는 동시간대의 관악산레이더 자료와 건설교통부가 운영하는 강우 관측소 자료를 이용하였다. 아울러 레이더의 해상도 및 태풍, 장마, 대류성 강우 등 호우특성에 따른 영향도 함께 파악해 보고자 하였다.

2. 배경이론

2.1 Ground-Truth의 정의

x, y 평면에서의 위치 벡터 $\mathbf{r}=(x,y)$ 과 시간 t 에서 무작위 강우장을 $\psi(\mathbf{r},t)$ 라 할 때, $\psi(\mathbf{r},t)$ 의 앙상블 평균은 $\langle\psi(\mathbf{r},t)\rangle$, 그리고 공간상 한 점에서의 분산은 σ^2 라 정의한다. 여기서 무작위 변수인 $\psi(\mathbf{r},t)$ 는 시-공간적으로 약한 통계학적 등질성(homogeneous) 가진다고 가정한다. 다시 말해서 시-공간 지체 공분산(lagged covariance)은 $\xi=|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|$ 과 $\tau=t-t'$ 만의 함수로 표현된다.

무작위 변량 $\psi(\mathbf{r},t)$ 는 $\{\psi(\mathbf{r},t)=0\}$ 인 사상에 대하여 $1-p$ 의 확률(즉, 무강우 확률)을 가지고 있지만 $x > 0$ 인 경우에는 $P[\bar{\psi}(\mathbf{r},t)=x]=0$ 이 된다(연속확률밀도함수의 특성을 고려하면 쉽게 이해할 수 있다). 다시 말하자면 G 를 $\psi(\mathbf{r},t)$ 의 누가확률밀도함수 $P[\psi(\mathbf{r},t) \leq x]$ 라고 놓으면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G(r) = (1-p)H(r) + pF(r) \quad (1)$$

$$\text{여기서 } H(r) = 0, \quad r < 0 \quad (2)$$

$$H(r) = 1, \quad r \leq 0 \quad (3)$$

그리고 F 는 $f(r) = F(r) \geq 0$ ($r > 0$)과 같은 확률 밀도함수를 가지고 아울러 $F(r) = 0$ ($r \leq 0$)인 연속 함수이다.

다음으로 레이더가 어떤 우량계가 위치한 지점 \mathbf{r}_g 를 포함한 지역을 측정하는 경우를 고려해 보자. 먼저, 레이더가 그 대상 지역을 측정할 경우에 레이더 측정치는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi_r = \frac{1}{A} \int_R \psi(\mathbf{r},t) d^2\mathbf{r} \quad (4)$$

여기서 R 은 레이더의 관측구역(FOV: Field of View)를 나타내며 A 는 FOV의 면적이다. 반대로 지상 우량계 지점에서의 순간적인 강우량을 관측하므로 FOV에 대한 대푯값은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi_g = \psi(\mathbf{r}_g,t) = \frac{1}{A} \int_R \psi(\mathbf{r},t) K(\mathbf{r}) d^2\mathbf{r} \quad (5)$$

여기서 $K(\mathbf{r}) = A\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_g)$ 이다. 아울러 Eq. (4) and (5)에서 아래첨자는 각각 레이더와 지상강우관측소를 나타낸다. 또한 총 관측이 n 번 수행되는 경우 각각을 Ψ_r^n 와 Ψ_g^n 라고 표현한다.

FOV 내에서의 우량계의 위치 또는 우량계에 대한 FOV의 중심 위치는 공간상으로 균일분포를 따른다고 가정할 수 있다. 따라서 우량계의 위치는 FOV 내에서 균등분포를 따르는 무작위변량처럼 분포된 것으로 가정하는 것이 가능하다. 즉,

$$P(\mathbf{r}_g) = \begin{cases} \frac{1}{A} & \text{when } \mathbf{r}_g \in R \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

본 연구에서 고려하는 3개의 ground-truth 설계 중 design 1은 (Ψ_r^n, Ψ_g^n) 의 모든 경우를 고려하며 design 2는 $\Psi_r^n > 0$ 인 경우만을, 그리고 design 3은 $\Psi_r^n > 0, \Psi_g^n > 0$ 인 경우만을 고려한다. 각각의 설계에 대한 두개의 측정치는 $(\Psi_{ri}^n, \Psi_{gi}^n)$ 로 나타내며 여기서 $i=1, 2, 3$ 이다.

n 번째 데이터 쌍에 대한 오차 ϵ_{di}^n 는 $\epsilon_{di}^n = \Psi_{ri}^n - \Psi_{gi}^n$ 으

로 나타낼 수 있다. 그리고 일반적으로 지상관측치와 레이더 관측치 간의 정확도를 비교하는데 하나의 지표로 사용되는 평균제곱오차(mean-square error)는 다음 식과 같이 정의된다.

$$\langle \epsilon_{di}^n \rangle^2 = \langle (\Psi_{ri}^n - \Psi_{gi}^n)^2 \rangle \quad (7)$$

위와 같은 평균제곱오차의 개념은 인공위성에서 관측한 강우를 시-공간 축상에서 포괄적으로 관측할 때 발생하는 오차를 추정하는데 유용하게 사용된 바 있다 (North and Nakamoto, 1989).

N 개의 자료 쌍에 대한 평균오차(average error)의 평균은 하나의 자료 쌍에 대한 오차의 평균과 같다. 즉 N 개의 독립적인 자료 쌍에 대한 평균오차의 분산은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\langle \epsilon_N^2 \rangle = \left\langle \frac{\epsilon^2}{N} \right\rangle \quad (8)$$

위 Eq. (8)은 새로운 측정치를 추가함에 따라서 오차의 크기가 작아질 수 있음을 의미한다.

2.2 Ground-Truth 설계

Ground-truth 설계의 목적은 소위 ‘보정편의(retrieval bias)’를 찾아내기 위한 목적으로 이용된다. 이를 위해서는 다음 두 가지 조건을 만족해야 한다. 첫 번째는 오차 $\epsilon_{di} = \Psi_{ri} - \Psi_{gi}$ 에 편의가 없어야 한다는 것이다. 즉, $\langle \epsilon_{di} \rangle = \langle \Psi_{ri} - \Psi_{gi} \rangle = 0$ 을 의미한다. 만일 오차가 설계편의라고 불리는 편의를 가진다면 보정편의와 설계편의가 조합되어 우리가 알고자 하는 보정편의를 계산하기가 어려워진다. 두 번째는, $\langle \epsilon_{di} \rangle = 0$ 을 만족하는 ground-truth 설계에 대하여 지상 우량계 강우와 레이더 강우의 차이의 평균제곱오차 $\langle \epsilon_{di}^2 \rangle$ 가 레이더 강우의 보정편의보다 최소한 작거나 같아야 한다는 점이다. 그렇지 않은 경우 보정편의의 유의한 추정은 어렵게 된다.

만일 여러 ground-truth 설계의 통계치들(평균, 분산, 평균제곱오차 등) 사이에 어떤 관계가 있다면 어떤 설계의 오차는 다른 설계의 통계치를 이용하여 추정하는 것이 가능할 것이다. Ha et al.(2002)과 Yoo et al.(2006)은 ground-truth 설계에 따른 통계치들 사이의 관계를 구명하고, 특히 design 1의 통계치를 이용하여 design 2와 design 3에 대한 통계치를 계산하는 방법을 제시하였다. 이를 위해서는 다음과 같은 조건부 기대치 이론을 이용한다(Parzen, 1962). 즉,

$$\langle h(Y) \rangle = \sum_{\text{over } x} \langle h(Y) | X = x \rangle P(X = x) \quad (9)$$

Eq. (9)는 비조건부 통계치가 조건부 통계치에 비조건부 통계치와 교집합을 갖지 않는 모든 경우의 확률을 곱하여 합한 것과 같다는 것을 의미한다.

보정편의를 명백하게 알아내기 위해서는 설계에 따른 오차의 평균이 ‘0’이 되어야 한다. 따라서 어떤 설계가 레이더 측정치를 보정하는데 적합한지를 판단하려면 각각의 ground-truth 설계에 대한 오차의 앙상블(ensemble) 평균을 계산해야 한다. 무작위 강우장이 시-공간적으로 등질하다고 가정하였기 때문에 design 1의 지상 우량계 강우와 레이더 강우는 같은 평균을 갖는다. 즉, $\langle \Psi_{r1} \rangle = \langle \Psi_{g1} \rangle = \langle \psi(\mathbf{r}, t) \rangle$. 따라서 design 1에서 오차 ϵ_{d1} 의 앙상블 평균은 $\langle \epsilon_{d1} \rangle = 0$ 이고 편의가 발생하지 않는다.

Design 1과 design 2에서 지상관측치의 앙상블 평균 간 관계는 다음과 같다.

$$\langle \Psi_{g1} \rangle = \langle \Psi_{g2} \rangle P(\Psi_{r1} > 0) = \langle \Psi_{g2} \rangle P_s \quad (10)$$

여기서 P_s 는 FOV 내에 관측치가 강우를 나타내는 확률을 의미한다. P_s 는 비백색잡음의 무작위 강우장(the non-white noise random field)인 경우에는 계산하기가 쉽지 않지만, 백색잡음인 무작위 강우장(the white noise random field)에 대해서는 $P_s = 1 - (1-p)^A$ 로 간단히 나타낼 수 있다. 여기서 A 는 FOV의 면적을 나타낸다. 확률 P_s 는 실제 강우확률 p , FOV의 크기 그리고 강우장의 상관구조와 관련되어 있다. FOV의 크기가 크거나 강우확률이 커지는 경우에는 P_s 가 커지게 된다. 따라서 design 1에 대한 레이더 강우의 앙상블 평균은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\langle \Psi_{r1} \rangle = \langle \Psi_{r2} \rangle / P_s \quad (11)$$

따라서 design 2에 대한 오차 ϵ_{d2} 의 앙상블 평균은 Eq. (12)와 같이 나타낼 수 있으며 design 1에서와 같이 편의가 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \langle \epsilon_{d2} \rangle &= \langle \Psi_{r2} - \Psi_{g2} \rangle \\ &= \langle \psi(\mathbf{r}, t) \rangle / P_s - \langle \psi(\mathbf{r}, t) \rangle / P_s = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

그러나 design 3에 대한 오차의 앙상블 평균은 다음

식과 같이 나타나며,

$$\langle \epsilon_{d3} \rangle = -\frac{1-p}{p} \langle \psi(\mathbf{r}, t) | \psi(\mathbf{r}_g, t) = 0 \rangle \quad (13)$$

위 결과 식은 양상을 평균 $\langle \epsilon_{d3} \rangle$ 가 강우장 $\psi(\mathbf{r}, t)$ 의 값이 모두 '0'일 경우에만 '0'이 된다는 것을 의미한다. 그러나 이것은 비현실적인 경우에 해당한다. 결국 design 3은 항상 음의 설계편의를 가지게 된다. 비록 계산하기는 쉽지 않지만 $\mathbf{r} \neq \mathbf{r}_g$ 인 경우에 대해 $\psi(\mathbf{r}_g, t)$ 에 대한 $\psi(\mathbf{r}, t)$ 의 조건부 확률분포를 알 수 있다면 $\langle \psi(\mathbf{r}, t) | \psi(\mathbf{r}_g, t) = 0 \rangle$ 을 정량화할 수 있으며 이를 이용하여 설계편의의 규모도 계산할 수 있다. 백색잡음인 무작위 강우장에 대해서는 주어진 $\psi(\mathbf{r}_g, t)$ 에 대한 $\psi(\mathbf{r}, t)$ 의 조건부 확률분포가 $\mathbf{r} \neq \mathbf{r}_g$ 일 경우, $\psi(\mathbf{r}, t)$ 의 분포와 같아지므로 편의의 규모를 쉽게 계산할 수 있다.

Ground-truth 설계에 대한 설계편의는 보정 편의를 구하기 위하여 '0'이 되어야 한다. 따라서 지상 우량계 강우가 '0'(무강우)인 경우를 제외시키는 design 3은 심각한 설계편의를 야기시킬 수 있다.

3. Ground-Truth 설계의 적용 결과

3.1 모의강우를 이용한 결과

3.1.1 WGR 모형

모의 강우에 사용된 WGR 강우모형(Waymire et al., 1984)은 중규모 강우(호우범위 20~200 km)를 표현하기 위해 개발된 모형이다. 이 모형은 개념적인 모형으로서 중규모 강우의 대기 동역학적 특성과 강우의 통계학적 특성이 비교적 잘 반영된 모형이다. 강우전선(rain band)의 도달은 포아송 과정(Poisson process)에 의해 지배되고, 각 강우전선은 다수의 클러스터 포텐셜

(cluster potential)을 2차원 포아송 과정에 의해 위치시킨다. 궁극적으로 이 모형은 클러스터 포텐셜 내·외로 분포되어 있는 강우세포(rain cell)의 생성 및 소멸과정 등으로 강우를 표현한다. 또한 강우의 군집특성 및 이송·확산에 의한 시-공간적인 변화도 잘 고려하고 있는 것으로 알려져 있다. WGR 모형과 관련된 사항은 Waymire et al.(1984)에 자세히 설명되어 있다.

3.1.2 강우자료 및 강우의 모의 발생

적용된 용담댐 유역은 한국에서 세 번째로 큰 금강 권역의 상류에 자리 잡고 있다. 유역면적은 930.38 km²이고, 주하천의 길이는 61.3 km이다. 유역 내에 5개의 건설교통부 산하 우량관측소를 보유하고 있다. WGR 강우모형의 매개변수 추정을 위하여 사용된 강우관측소는 유역 내의 용담, 대불, 진안, 안성장 및 장수 우량관측소로, 1980~1996년(17개년) 6~9월 강우 시간자료를 수집하여 이용하였다. 추정된 매개변수를 사용하여 용담댐 유역의 6~9월 각각의 월별 강우를 1시간 간격으로 총 12년간 모의하였다. 모의된 결과는 Yoo et al.(2006)에서 발췌한 것이며, 최종 모의된 강우자료는 3가지 ground-truth 설계에 적용되었다. 그 결과로서 파악된 레이더 강우, 지상 우량계 강우 및 오차에 대한 통계적 특성은 Table. 1과 같고, 각각에 대한 도수분포는 Fig. 1에 나타나 있다.

모의 강우를 이용하여 각 ground-truth 설계를 적용한 결과, Table 1의 통계치에서 확인할 수 있는 것처럼, design 1과 design 2에서는 편의가 거의 발생하지 않은 반면, design 3은 음(-)의 설계편의가 발생하였다. 즉, design 3을 이용한 ground-truth에는 심각한 문제가 있음을 보여주고 있다. 이 같은 결과는 전절에서 이론적으로 증명한 내용과 일치하는 결과이기도 하다.

Table 1. Ensemble mean of the radar rainfall $\langle \psi_{si} \rangle$, gauge rainfall $\langle \psi_{gi} \rangle$, and error(= radar rainfall - gauge rainfall) $\langle \epsilon_{di} \rangle$ with Yongdam rainfall data in July (Yoo et al., 2006)

Width of footprint	Design 1			Design 2			Design 3		
	$\langle \psi_{s1} \rangle$	$\langle \psi_{g1} \rangle$	$\langle \epsilon_{d1} \rangle$	$\langle \psi_{s2} \rangle$	$\langle \psi_{g2} \rangle$	$\langle \epsilon_{d2} \rangle$	$\langle \psi_{s3} \rangle$	$\langle \psi_{g3} \rangle$	$\langle \epsilon_{d3} \rangle$
4 km	0.133	0.133	0.000	5.339	5.339	0.000	5.339	5.339	0.000
8 km	0.133	0.134	0.000	3.238	3.249	-0.010	4.215	5.332	-1.118
12 km	0.133	0.133	-0.001	2.486	2.502	-0.016	3.446	5.375	-1.929
16 km	0.132	0.130	0.003	2.131	2.086	0.045	2.957	5.297	-2.340
20 km	0.133	0.130	0.003	1.909	1.869	0.040	2.807	5.214	-2.406
24 km	0.134	0.134	0.000	1.858	1.859	-0.001	2.685	5.479	-2.794
28 km	0.132	0.133	-0.001	1.713	1.729	-0.016	2.448	5.509	-3.061
32 km	0.132	0.124	0.008	1.636	1.532	0.104	2.327	5.015	-2.688
36 km	0.133	0.130	0.003	1.572	1.540	0.033	2.297	5.328	-3.031
40 km	0.133	0.130	0.003	1.530	1.490	0.040	2.319	5.274	-2.955

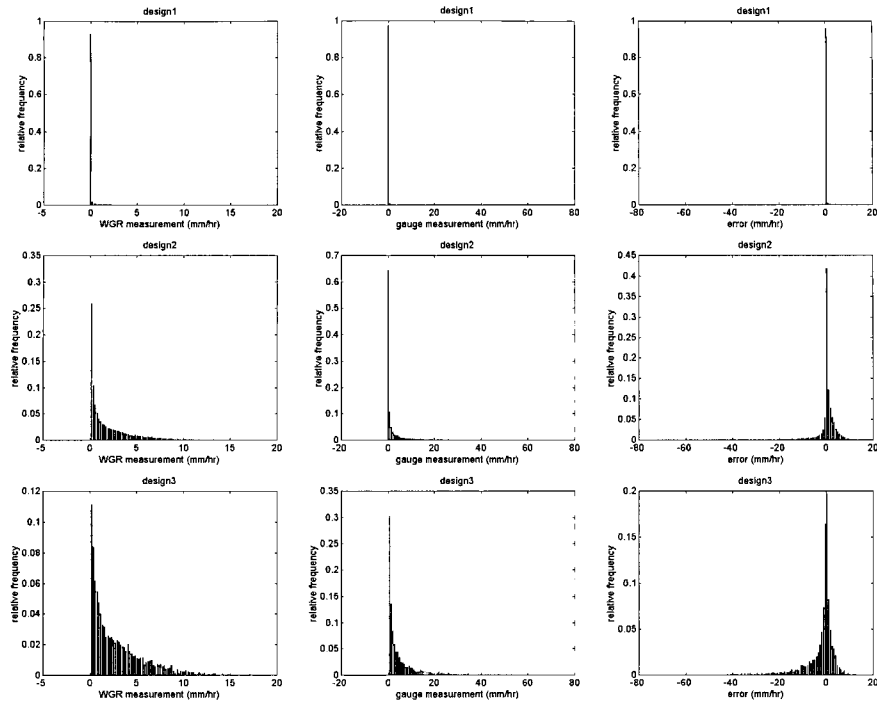


Fig. 1. The histogram of the radar and gauge rainfall and errors. The Yongdam rainfall data in July are applied for the FOV of size 20 km×20 km (resolution is 4 km) (Yoo et al., 2006)

3.2 실측강우를 이용한 결과

대한 개념적인 과정은 Fig. 3과 같다.

3.2.1 대상 자료

본 연구에서는 2003년도 관악산 레이더 자료(C band, $R=240$ km)와 레이더의 관측 반경 내 존재하는 남한의 강우관측소 중 공간적으로 균일한 분포를 나타내는 건교부 산하 47개 관측소를 선정하여 이용하였다. 레이더 강우 자료는 일관된 반사도-강우강도 관계($Z-R$ relationship, $Z=AR^b$)가 적용된 자료이며, 이에 사용된 매개변수는 Marshall-Palmer가 제안한 $A=200$ 과 $b=1.6$ 이다(Marshall and Palmer, 1948). 레이더 강우자료는 1 km의 공간해상도로 481×481 개의 격자를 형성하고 있다. 관악산 레이더의 기본 제원은 Table 2(엄원근 등, 1988)와 같으며 관악산 레이더와 본 연구에서 고려한 지상강우관측소의 공간분포는 Fig. 2와 같다.

건설교통부 강우관측소는 관측 단위가 1 mm이며, 최소 시단위의 자료를 제공하기 때문에 10분 간격인 레이더 자료를 1시간 자료로 변환하였다. 아울러 1시간 단위로 변환된 자료는 공간해상도(spatial resolution)에 따른 편의(bias)의 거동 특성을 살펴보기 위해 상향 해상도 조정(upscaling)을 실시하였다. 즉, FOV의 크기가 1 km × 1km 보다 큰 경우에 대해서도 동일한 적용을 수행하였다. 각 레이더 강우 자료의 격자 내에 위치한 우량계 자료는 산술평균(arithmetic average)하여 그 격자에 대한 지상 관측값으로 간주하였다. 이 과정에

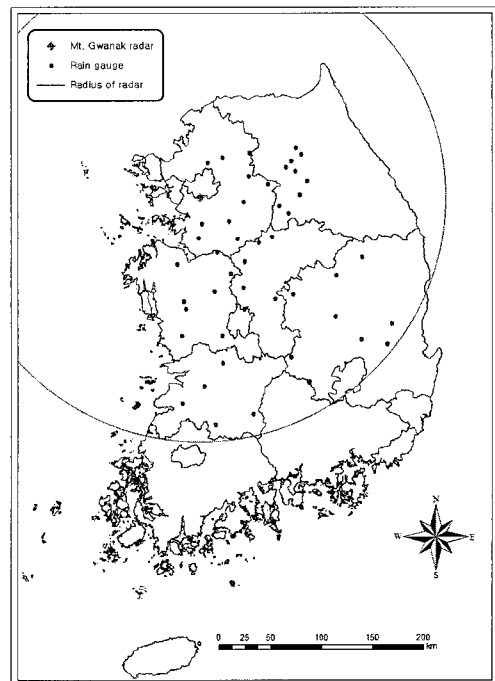


Fig. 2. Locations of Mt. Gwanak radar and ground rain gauges

3.2.2 레이더와 지상 우량계 강우량의 편차 분석

레이더와 지상 우량계 강우량의 편차분석은 고려하는 해상도에 대해 레이더 강우를 산정한 후 이에 대응하는 지상 강우량과의 차이를 비교하는 형태로 수행하

Table 2. Main technical characteristics of Mt. Gwanak radar (MOCT, 2003)

Radar site		Seoul(Mt. Gwanak)
Launch date		1970. 2
Location		LAT : 37° 26' 38" LON : 126° 57' 50"
Manufacturer		EEC (USA)
System		DWSR-88C
Transmitter	Type	Magnetron
	Band	C band
	Frequency	5,340 MHz
	Peak Power	250 KW
	Wave length	5.6 cm
	Pulse Recurrence Frequency (PRF)	250, 1180 Hz
	Pulse Width (PW)	0.83, 2.0 μs
Receiver	Dynamic range	95 dB
Antenna	Beams width	1.2 °
	Antenna diameter	3.6 m
Signal processor	Gate size	1,000 m
	Nyquist velocity	3.51 m/s

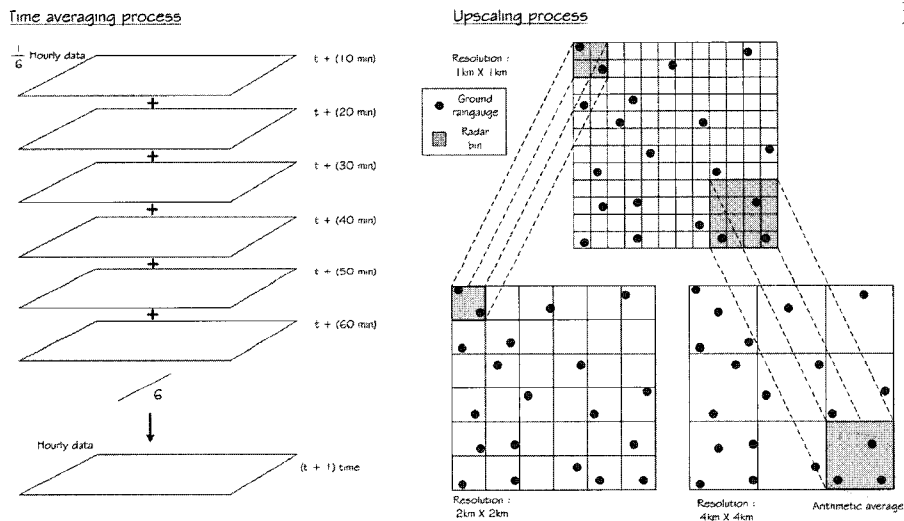


Fig. 3. Schematic diagram of time averaging and upscaling process

였다. 본 연구에서는 만일 하나의 레이더 강우의 격자에 대응하는 지상강우관측소의 수가 2개 이상일 경우에 지상강우관측소의 강우량을 산술평균하여 지상에서 측정된 강우량으로 간주하였다.

본 연구에서 고려된 해상도는 원시 자료의 1 km 해

상도 이외에 5 km, 10 km, 15 km, 20 km, 25 km, 30 km, 35 km, 40 km, 50 km 등이다. 또한 강우 유형별로 오차가 어떤 형태로 발생하는지를 살펴보기 위해 강우 사상을 태풍, 장마, 대류성 강우로 구분하여 분석을 실시하였다. 사용된 자료의 기간은 Table 3과 같다.

Table 3. Periods of data used in this study

Types of rainfall	Period	Duration(hr)	Remarks
Typhoon	2003/09/12/00:00 ~ 2003/09/13/07:00	31	Maemi
Jangma	2003/08/17/06:00 ~ 2003/08/20/10:00	76	
	2003/08/22/10:00 ~ 2003/08/25/00:00	50	
Convective	2003/06/27/00:00 ~ 2003/06/27/23:00	23	

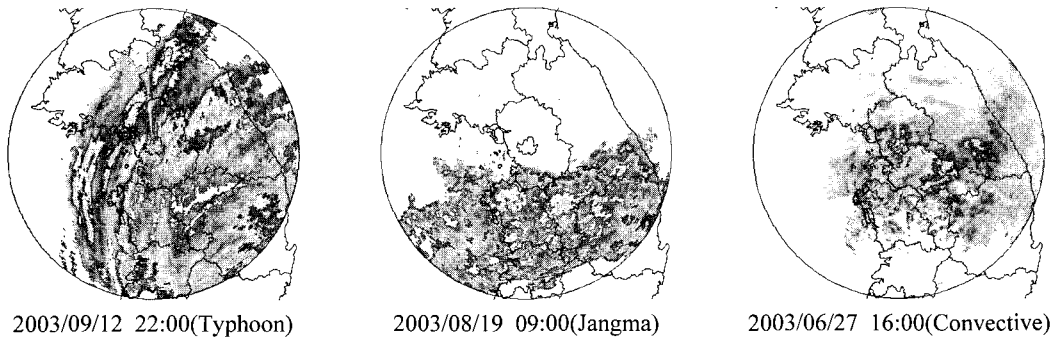


Fig. 4. Image of Mt. Gwanak radar precipitation

호우상상별 자료를 이용하여 각각의 경우에 대한 도수분포와 통계적 특성치는 Figs. 5~7과 Table 4와 같다. Figs. 5~7에 나타난 레이더의 공간해상도는 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 이다.

본 연구에서 고려한 세 가지 호우 발생 특성인 장마, 태풍 및 대류성 강우는 각각 다른 통계적 특성을 나타낸다. 강우장이 유역 전반에 걸쳐 있는 태풍의 경우는 design 1, 2, 3에서 적용된 레이더 자료에서 '0'을 포함할 확률이 낮다. 따라서 이 경우 각각의 설계 별 자료계열은 큰 차이를 가지지 못한다. 태풍의 경우 비교 형태별 통계적 특성치(Table 4)에서는 차이가 나지만 도수분포(Fig. 5)는 큰 차이가 나지 않는다. 반면에 장마와 대류성 강우의 경우는 태풍의 경우와는 다르게 도수분

포에서도 design 3에서 오차가 더 큰 편의를 나타내는 것을 확인 할 수 있다. 이와 같은 사실은 Fig. 4에 나타난 관악산 레이더 영상을 보면 확연히 드러난다. 태풍의 경우에는 강우장이 한반도 영역을 거의 뒤덮고 있는 반면에 장마나 대류성 강우의 경우에는 한반도의 국지적인 부분에만 비를 내리고 있다. 이 때문에 무강우를 반영한 비교 형태별 특성은 장마나 대류성 강우가 태풍보다 뚜렷하게 나타날 것으로 예상할 수 있다. 전반적인 결과를 살펴보면 Table 4에서와 같이 design 1, 2에 대한 통계적 특성치는 거의 같은 값을 가지나 design 3는 큰 차이를 보이고 있고, 오차의 편이 또한 design 3에서 가장 크게 발생하였다. 따라서 전철의 이론적 설명에서처럼 design 3은 ground-truth를 하는데 있어서

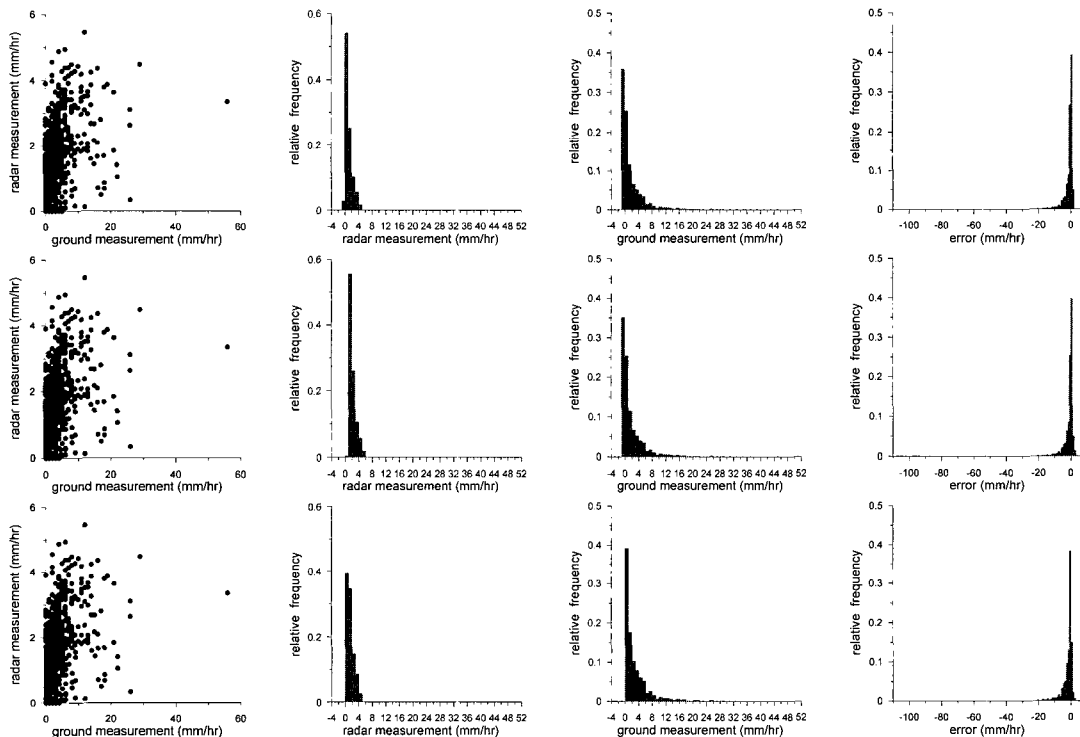


Fig. 5. Scatter plot between radar and ground measurements and histogram of radar and ground measurements, and errors (spatial resolution: 10 km , Typhoon)

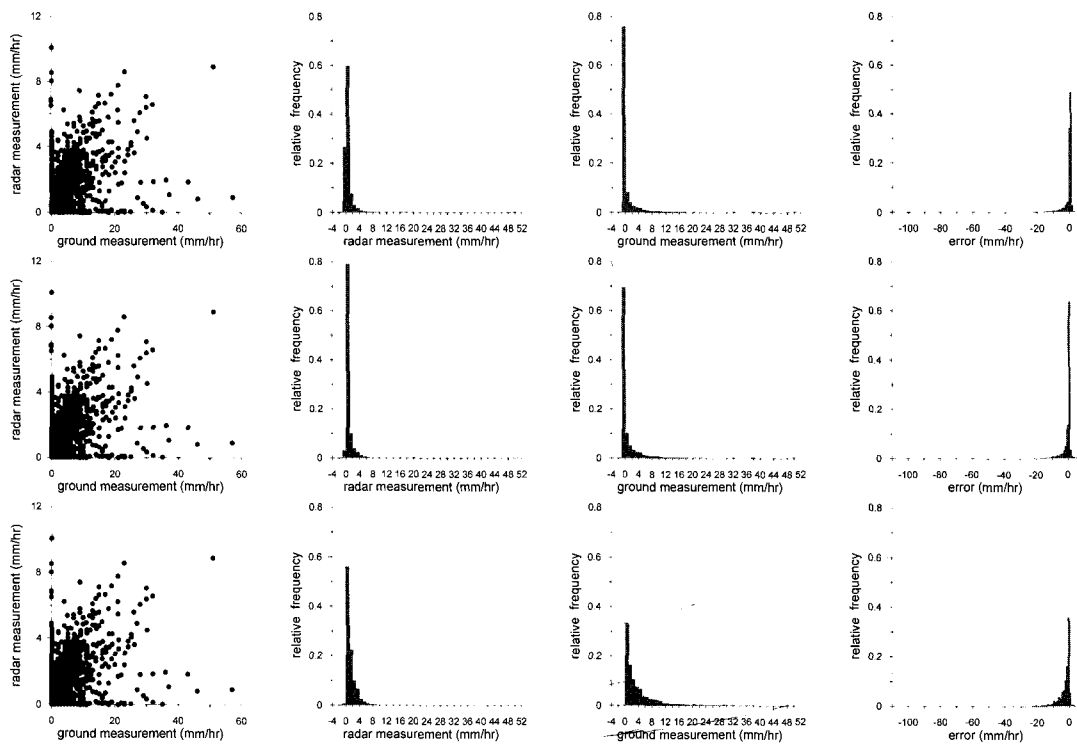


Fig. 6. Scatter plot between radar and ground measurements and histogram of radar and ground measurements, and errors (spatial resolution: 10 km, Jangma)

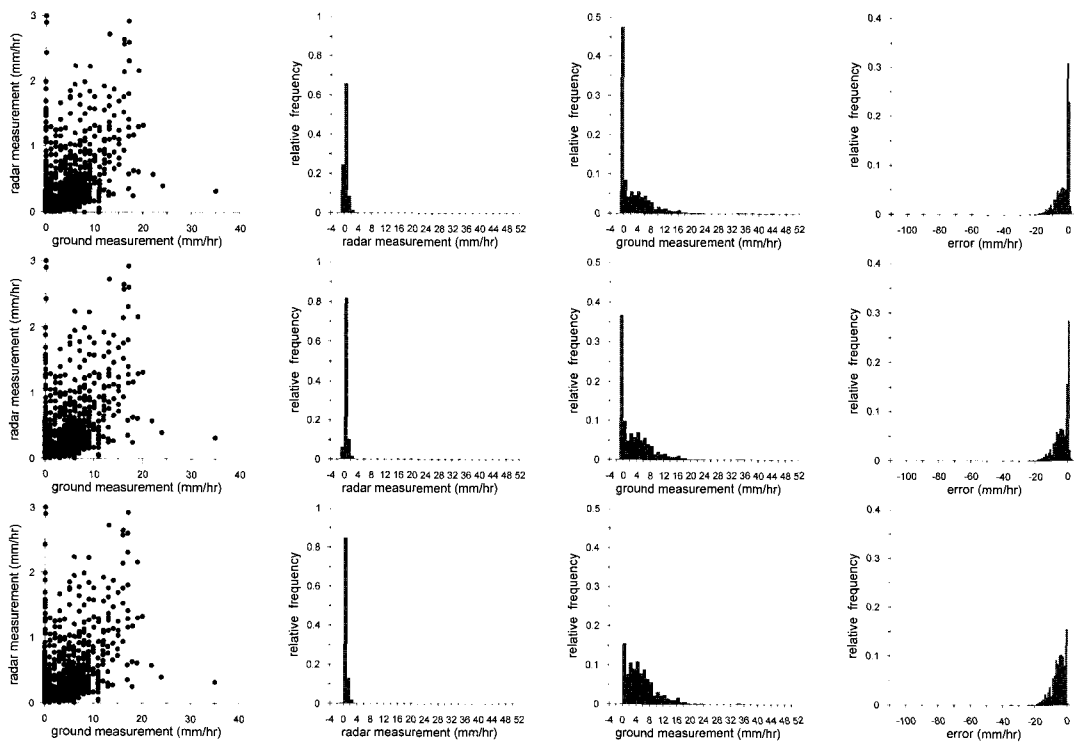


Fig. 7. Scatter plot between radar and ground measurements and histogram of radar and ground measurements, and errors (spatial resolution: 10 km, Convective storm)

Table 4. Statistics of radar measurements $\langle \psi_{ri} \rangle$, ground measurements $\langle \psi_{gi} \rangle$, errors $\langle \xi_{di} \rangle$ and MSE

Type of rainfall	G-T Design	Design 1				Design 2				Design 3			
	STATIC RESOL.	$\langle \psi_{r1} \rangle$	$\langle \psi_{g1} \rangle$	$\langle \xi_{d1} \rangle$	MSE	$\langle \psi_{r2} \rangle$	$\langle \psi_{g2} \rangle$	$\langle \xi_{d2} \rangle$	MSE	$\langle \psi_{r3} \rangle$	$\langle \psi_{g3} \rangle$	$\langle \xi_{d3} \rangle$	MSE
Typhoon (Maemi)	1 km	1.085	2.302	-1.217	12.118	1.214	2.528	-1.313	12.637	1.514	3.665	-2.151	17.282
	5 km	1.098	2.290	-1.193	11.500	1.161	2.399	-1.238	11.891	1.497	3.602	-2.105	16.284
	10 km	1.102	2.308	-1.206	11.886	1.129	2.351	-1.222	11.890	1.490	3.618	-2.128	16.381
	15 km	1.098	2.301	-1.203	11.709	1.119	2.337	-1.217	11.711	1.484	3.609	-2.125	16.056
	20 km	1.100	2.345	-1.245	11.979	1.114	2.368	-1.254	11.979	1.457	3.628	-2.171	16.513
	25 km	1.057	2.318	-1.260	11.674	1.067	2.333	-1.267	11.675	1.399	3.574	-2.176	16.225
	30 km	1.062	2.439	-1.377	10.115	1.069	2.450	-1.381	10.117	1.361	3.563	-2.202	14.909
	35 km	1.058	2.294	-1.236	8.862	1.061	2.299	-1.238	8.862	1.363	3.466	-2.103	13.779
	40 km	1.033	2.458	-1.425	9.282	1.036	2.466	-1.429	9.286	1.289	3.479	-2.190	13.873
50 km	0.946	2.156	-1.210	12.690	0.946	2.156	-1.210	12.690	1.184	2.955	-1.771	17.304	
Jangma	1 km	0.443	1.150	-0.707	10.432	0.852	2.030	-1.178	15.086	1.384	5.024	-3.640	41.673
	5 km	0.441	1.145	-0.704	10.318	0.671	1.662	-0.992	14.425	1.305	4.809	-3.504	32.407
	10 km	0.433	1.131	-0.698	10.224	0.573	1.446	-0.874	14.199	1.251	4.724	-3.473	30.546
	15 km	0.431	1.136	-0.705	10.303	0.523	1.349	-0.826	12.258	1.195	4.699	-3.504	30.740
	20 km	0.427	1.143	-0.716	10.913	0.492	1.299	-0.807	13.277	1.166	4.669	-3.503	31.000
	25 km	0.434	1.126	-0.692	11.331	0.492	1.265	-0.772	12.527	1.181	4.550	-3.370	29.371
	30 km	0.416	1.126	-0.711	11.379	0.460	1.234	-0.774	11.678	1.058	4.326	-3.268	35.195
	35 km	0.425	1.056	-0.632	8.615	0.460	1.135	-0.674	8.843	1.046	4.176	-3.130	27.704
	40 km	0.423	1.140	-0.718	9.432	0.451	1.215	-0.763	9.792	0.984	4.097	-3.113	29.558
50 km	0.490	1.123	-0.632	7.110	0.504	1.153	-0.649	7.310	1.067	3.501	-2.434	21.487	
Convective storm	1 km	0.318	3.113	-2.794	11.184	0.483	4.627	-4.144	43.188	0.535	6.205	-5.669	64.375
	5 km	0.319	3.123	-2.804	11.414	0.435	4.190	-3.755	39.037	0.525	6.114	-5.590	63.647
	10 km	0.320	3.145	-2.824	13.290	0.398	3.856	-3.458	33.109	0.517	6.082	-5.565	63.406
	15 km	0.321	3.142	-2.821	13.381	0.377	3.667	-3.290	26.001	0.518	6.072	-5.554	63.068
	20 km	0.322	3.122	-2.800	13.101	0.365	3.532	-3.167	23.570	0.509	5.998	-5.488	60.129
	25 km	0.319	3.140	-2.821	15.919	0.351	3.442	-3.091	22.013	0.497	5.981	-5.484	61.186
	30 km	0.313	3.199	-2.886	27.783	0.335	3.423	-3.088	30.474	0.502	5.764	-5.262	55.766
	35 km	0.327	3.161	-2.834	28.650	0.350	3.376	-3.027	31.687	0.489	5.991	-5.503	61.019
	40 km	0.308	3.134	-2.826	25.751	0.324	3.292	-2.968	26.827	0.497	5.435	-4.938	46.686
50 km	0.319	3.158	-2.840	20.767	0.325	3.225	-2.899	21.210	0.497	5.251	-4.755	34.518	

4. 결 론

본 연구에서는 레이더 강우의 ground-truth를 위해 가능한 3가지 비교방법, 즉 3가지 ground-truth 설계를 이론적으로 검토하였다. 이론적인 결과는 먼저, WGR 강우모형으로 모의된 3차원 강우장에 적용하여 검토하였으며, 아울러 실측자료인 관악산 레이더 자료 및 레이더 관측영역 내 건설교통부 관할 지상관측소 강우 자료에 적용하여 평가하였다. 본 연구에서는 또한 호우사상의 특성에 따라 아울러 레이더의 해상도에 따라 발생 가능한 차이도 검토하였다.

먼저, WGR모형으로 모의된 강우장을 이용한 검토에서는 이론적인 결과와 잘 대응되는 결과를 도출할 수 있었다. 이 경우에는 특히 두 관측방법에 따른 편차가 없는 경우에 해당하므로 ground-truth 설계편의의 존재가 잘 부각되어 나타남을 확인할 수 있었다. 그러나 실측자료를 이용하는 경우에 있어서는 관측방법에 따른

보정편의 및 ground-truth 설계편의가 동시에 존재하는 경우에 해당하므로 강우특성에 따라서는 명백하게 구분되지 않는 결과가 도출되기도 하였다. 예를 들어 태풍 (태풍 매미의 경우)의 경우에는 호우사상의 공간적 규모가 매우 크므로 강우의 공간적 간헐성이 부각되지 않고 따라서 각 설계별 차이가 크게 나타나지 않는 것으로 나타난다. 그러나 장마나 대류성 강우의 경우에 있어서는 설계별로 큰 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 해상도의 변화에 따른 통계적 특성 변화는 모든 호우사상에서 뚜렷한 경향성을 발견할 수 없었다.

결론적으로 보면 본 연구에서 고려한 모든 ground truth 설계의 경우에 있어 design 1과 2는 설계편의를 유발하지 않으나, design 3에서는 설계편의가 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 design 3에서 발생하는 설계편의가 보정편의를 계산하는 데 큰 장애로 작용하며, 따라서 레이더 강우의 ground-truth 목적에 적절하지 못하다는 것을 의미한다.

감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-311-D00221).

참고 문헌

- 건설교통부 (2002). 전국 강우레이더 설치 및 홍수에 경보시스템 개선 기본계획 수립, p. 713.
- 건설교통부 (2003). 전국 강우레이더 설치 및 홍수에 경보시스템 개선 기본계획 수립 2차년도, p. 823.
- 건설교통부 (2004). 전국 강우레이더 설치 및 홍수에 경보시스템 개선 기본계획 수립 3차년도, p. 927.
- 김양수 (2002). "2002년 홍수 피해원인과 대책." 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제35권, 제6호, pp. 11-19.
- 김진국, 안상진 (2006). "기상레이더 강우량 산정법을 이용한 유출해석." 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제26권, 제1B호, pp. 7-14.
- 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, 제1호, pp. 25-36.
- 박상덕 (2002). "태풍 루사로 인한 홍수특성과 대책." 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제35권, 제6호, pp. 36-47.
- 석미경, 남경엽, 김영화, 오성남 (2005). "WPMM을 이용한 레이더 반사도로로부터 정량적 레이더 강우강도의 추정." 한국기상학회지, 한국기상학회, 제41권, 제1호, pp. 123-138.
- 신현석, 정상만 (2000). "엘리노/라니냐 영향 지수 기법의 개발 및 한반도 수자원에의 영향분석." 한국수자원학회논문집, 제33권, 제S1호, pp. 327-332.
- 심재관, 장기호, 남경엽, 조천호 (2005). "병합 기법을 이용한 정량적 강수 예측." 기상기술, 한국기상학회, 제1권, 제2호, pp. 111-120.
- 안상진, 연규방, 이재경, 이주현 (2002). "2002년 중부지역 홍수피해 현황 및 분석." 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제35권, 제6호, pp. 20-35.
- 엄원근 (1995). 레이더 기상학, 영재사, 서울, 268 pp.
- 엄원근, 홍윤, 조천환 (1988). DWSR-88C 기상레이더와 자료의 활용, 중앙기상대, pp. 15-16.
- 염경택, 이충기, 정구열, 정세웅, 김주환, 박우양, 정의용 (2000). "강화수문레이더를 이용한 임진강 유역 홍수예경보시스템 운영현황." 한국기상학회 가을 학술발표회 논문집, 한국기상학회, pp. 91-94.
- 오대석, 안재현, 문영일, 김종석 (2005). "도시화가 도시 지역 강수변화에 미치는 영향 연구." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제38권, 제10호, pp. 885-894.
- 유철상, 하은호, 김경준 (2006). "강우의 공간상관구조에 대한 무강우자료의 영향." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제39권, 제2호, pp. 127-138.
- 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.
- Barnston, A.G., and Thomas, J.L. (1983). "Rainfall measurement accuracy in FACE: A comparison of gage and radar rainfalls." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 22, pp. 2038-2052.
- 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.
- Calheiros, R.V., and Zawadzki, I. (1987). "Reflectivity-rain rate relationships for radar hydrology in Brazil." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 26, pp. 118-132.
- Creutin, J.D., Andrieu, H., and Faure, D. (1997). "Use of a weather radar for the hydrology of a mountainous area. Part II: radar measurement validation." *Journal of Hydrology*, Vol. 193, pp. 26-44.
- Ha, E., and North, G.R. (1994). "Use of multiple gauges and microwave attenuation of precipitation for satellite verification." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 11, pp. 629-636.
- Ha, E., and North, G.R. (1999). "Error analysis for some ground validation designs for satellite observations of precipitation." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 16, pp. 1949-1957.
- Ha, E., and Yoo, C. (2006). "A mixed bivariate log-normal distribution for cross-correlation coefficients of rainfall." *Hydrological Processes*, In press.
- Ha, E., North, G.R., Yoo, C., and Ha, K. (2002).

- "Evaluation of some ground truth designs for satellite estimates of rain rate." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 19, pp. 65-73.
- Li, P.W., and Lai, S.T.E. (2004). "Short-range quantitative precipitation forecasting in Hong Kong." *Journal of Hydrology*, Vol. 288, pp. 189-209.
- Marshall, J.S., and Palmer, W.McK. (1948). "The distribution of raindrops with size." *Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 5, pp. 165-166.
- North, G.R., and Nakamoto, S. (1989). "Formalism for comparing rain estimation designs." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 6, pp. 985-992.
- Parzen, E. (1962). *Stochastic Processes*, Holden-Day, San Francisco, 324 pp.
- 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.
- Seed, A., Siriwardena, L., Sun, X., Jordan, P., and Elliott, J. (2002). *On the calibration of Australian weather radars*. Report 02/7, ISBN 1-876006-88-9, Cooperative Research Center for Catchment Hydrology, 40 pp.
- Shimizu, K. (1993). "A bivariate mixed lognormal distribution with an analysis of rainfall data." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 32, pp. 161-171.
- Waymire, E., Gupta, V.K., and Rodriguez-Iturbe, I. (1984). "A spectral theory of rainfall intensity at the meso- β scale." *Water Resources Research*. Vol. 20, No. 10, pp. 1453-1465.
- Wilson, J.W. (1963). "Relationship between gage-measured precipitation rates and radar echo intensities." *Proceedings 10th Weather Radar Conference*, Boston, pp. 241-246.
- Wilson, J.W. (1970). "Integration of radar and raingage data for improved rainfall measurement." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 9, pp. 489-497.
- Wilson, J.W., and Brandes, E.A. (1979). "Radar measurement of rainfall: A summary." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 60, pp. 1048-1058.
- Woodley, W.L., Olsen, A.R., Herndon, A., and Wiggert, V. (1975). "Comparison of gage and radar methods of convective rain measurement." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 14, pp. 909-928.
- Yoo, C., Ha, E., Kim, S., and North, G.R. (2006). "Evaluation of several Ground-Truth designs for satellite estimates of rainfall in a temperate region." (manuscript submitted.)

(논문번호:06-111/접수:2006.12.01/심사완료:2007.08.24)