

강우 레이더와 지상 우량계의 통합관측효과

Effect of Combined Rainfall Observation with Radar and Rain Gauge

유철상* / 김경준**

Yoo, Chulsang / Kim, Kyoungjun

Abstract

This study evaluated the effect of combined rainfall observation of using rain gauge and rain radar. The effect of combined observations is to be evaluated by considering the decrease of measurement error due to combined use of design orthogonal observation methods. As an example, this study evaluated the rain gauge network of the Keum river basin, and showed how the density of rain gauges could be decreased by combining the radar observation. This study applied the researches on sampling error by North and Nakamoto(1989), Yoo et al. (1996) and Yoo (1997), also the simple NFD model for representing the rainfall field. The model parameters were decided using the rainfall characteristics (correlation time and length) estimated using the data collected in the Keum River Basin by 28 rain gauges and the operation rule of radar was assumed arbitrarily. This study considered the rain gauge density criteria provided by WMO(1994) and the rain gauge density installed in the Keum river basin to decrease the rain gauge density under the condition of introducing the radar.

keywords : radar, rain gauge, combined observation, Keum River Basin

요 지

본 연구에서는 우량계와 강우 레이더를 함께 이용하는 경우의 통합관측 효과를 검토하였다. 통합관측효과는 서로 비교하는 관측방법의 결합에 따른 관측오차의 감소를 고려함으로써 평가된다. 구체적인 적용 예로서 금강유역에 대하여 강우 레이더가 추가로 설치되는 경우 우량 관측망 밀도를 어느 정도까지 조정할 수 있는지에 대한 평가를 수행하였다. 이를 위해 North and Nakamoto(1989), Yoo et al. (1996), 유철상(1997)의 관측오차 관련 연구를 응용하였으며, 강우장의 모형화를 위해서는 그 구조가 간단한 NFD 모형을 이용하였다. 모형의 매개변수는 금강유역의 28개 우량 관측소 시자료를 이용하여 추정된 강우장의 특성치(상관거리 및 상관시간)를 이용하여 결정하였고, 레이더의 운영 특성은 임의로 가정하였다. 본 연구에서는 WMO(1994)의 추천 우량관측 밀도와 금강유역에 설치된 우량 관측 밀도를 고려하여 레이더의 도입으로 인한 우량 관측 밀도의 조정 방안을 제시하였다.

핵심용어 : 레이더, 우량계, 통합관측, 금강 유역

* 고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학과 교수

Prof., Dept. of Architectural, Civil & Environmental Eng., Korea Univ., Seoul 136-713, Korea
(e-mail: envchul@korea.ac.kr)

** 고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학과 박사수료

Graduate Research Assistant, Dept. of Architectural, Civil & Environmental Eng., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea
(e-mail: guitar77@korea.ac.kr)

1. 서 론

현재 우리나라에서는 임진강 유역의 특수상황을 고려하여 강우 레이더가 설치되어 운영 중에 있으며, 홍수예경보의 정도향상을 목적으로 전국적인 강우 레이더 관측망을 구축 중에 있다(이명섭, 2000; 염경택 등, 2000; 기상연구소, 2001). 그러나 강우 레이더 자체는 강우-유출해석에 직접 이용될 수 있는 정도의 강우자료를 생산해 주지는 못한다. 즉, 단순히 강우 레이더의 도입으로 강우관측의 정확성 또는 강우-유출 해석에 있어서의 효용성을 만족시키지는 못한다. 따라서 레이더 자료의 보다 직접적인 이용을 위해서는 레이더 강우의 지상보정, 레이더 강우와 우량계 강우의 합성과 같은 여러 가지 관련 문제를 먼저 해결해야 한다. 강우 레이더의 도입으로 인한 지상 강우관측망의 재구성 문제도 경제성 제고라는 측면에서 중요한 부분이다.

이러한 문제들을 좀 더 자세히 살펴보면 먼저, 레이더 강우의 지상보정 문제는 소위 ground-truth라고 불리는 문제로서 레이더 강우의 평균 및 공간상관특성을 보정하는 문제이다(Yoo, 2002; Yoo et al., 2000; Ha et al., 2002). 이러한 목적으로 지상 우량 관측망을 다시 설계하기도 하며, 보정을 위한 적절한 알고리즘을 개발하기도 한다(North et al., 1994). 이는 기본적으로 원격 탐사된 강우자료가 그 평균뿐만 아니라 강우장의 시·공간적인 변동성을 정확히 재현하지 못하는 문제점을 극복하기 위한 것이다. 이와 같은 문제의 해결 없이 사용하는 레이더 강우자료는 시각적 효과 이상의 가치를 발휘하기 어렵게 된다.

지상 보정된 레이더 강우와 지상의 점 강우자료를 어떻게 합성하느냐의 문제는 레이더 강우의 효용성을 향상시킬 수 있는 또 다른 문제에 속한다. 두 개의 독립적인 방법으로 측정된 자료를 적절히 합성 또는 결합하여 사용하지 못한다면 어느 하나의 관측에 의존하는 결과를 가져올 수밖에 없다. 기껏해야 레이더 강우를 우량계 자료로 보정하는 수준에 머무르게 될 것인데, 이는 강우장의 시·공간적 변동특성을 완벽히 보정할 수 있는 경우에만 유효하다. 따라서 현재 상태에서(즉, 강우장의 시·공간적 변동성을 완벽히 보정하지 못하는 상태) 두 관측 자료의 합성은 매우 중요한 의미를 갖는다. 현재 많이 시도되고 있는 방법은 Co-Kriging을 이용하는 것이다(Azimi-Zonooz et al., 1989; Seo, 1996; Seo, 1998a; Seo, 1998b; Seo et al., 1990a, Seo et al., 1990b). 그러나 홍수예보시스템과 같이 신속한 합성결과를 요구하는 경우에 있어서는 보다 효율적인 방법의 개발이 필요한 실정이다. 강우장이 정규분포나 대수정

규분포와 같이 쉽게 다루어 질 수 있는 확률밀도함수로 표현되지 못하는 경우 발생할 수 있는 경우에 대한 적용도 극복되어야 할 문제의 하나이다.

만일 레이더 강우가 적절히 보정되어 사용된다면 지상의 우량계 밀도를 현저히 떨어뜨릴 수 있는 것이 사실이다. 이러한 근거는 두 개의 독립적인 관측방법에 의해 관측된 자료를 이용하는 경우의 관측오차 문제로 이해될 수 있다(North et al., 1991; Yoo, 2000; Yoo, 2001). 즉, 강우 레이더가 도입되는 경우 현재와 같은 높은 우량계 밀도를 유지할 필요가 없으며, 아울러 적절한 기준이 주어지는 경우 그 수준에 맞추어 우량계 밀도의 조정이 가능하다. 이는 특히 우량 관측망 유지의 경제성과 직결되는 문제이다.

본 연구에서는 이러한 여러 가지 문제 중 특히 세 번째의 문제에 초점을 맞추어 연구를 진행하고자 한다. 이는 근본적으로 관측망의 평가 및 설계와도 관련이 있으며, 아울러 강우 레이더를 도입하는 경우에 대한 지상 관측망 재평가의 의미를 갖는다. 구체적인 적용 예로서 금강유역에 강우 레이더가 설치되는 경우 우량 관측망 밀도를 어느 정도까지 조정할 수 있는지에 대한 평가를 수행하였다.

2. 강우 레이더를 포함한 우량 관측망의 설계

2.1 관측오차의 개념을 이용한 우량 관측망 밀도 조정

레이더 강우정보를 고려한 우량 관측망의 밀도는 관측오차이론을 이용하여 계산할 수 있다. 즉, 레이더로부터 추가로 들어오는 강우정보가 우량계로부터의 강우정보에 더해지므로 오차가 작아지게 되고, 따라서 적절한 우량계밀도에 해당하는 오차를 기준으로 한다면 강우 레이더를 추가함으로써 우량계 밀도를 낮출 수 있는 것이다.

유철상(1997)은 인공위성을 이용하여 얻어지는 강우자료와 지상 관측망을 이용하여 얻어지는 강우자료의 관측오차의 추정방법을 다차원 강우모형인 NFD 강우모형(North and Nakomoto, 1989), WGR 강우모형(Waymire et al., 1984), YVN 강우모형(Yoo et al., 1996) 등에 적용한 바 있다. 본 연구에서는 유철상(1997)의 연구를 응용하여 지상 관측망만을 이용할 경우 발생하는 관측오차와 지상 관측망과 레이더를 이용할 경우 발생하는 관측오차를 계산하고, 아울러 관측오차를 강우 레이더의 도입 전 수준으로 유지하는 조건하에서 강우 레이더의 도입 후 필요한 지상 우량 관측소의 밀도를 추정하고자 한다.

2.2 관측오차 계산의 이론적 배경

North and Nakamoto(1989)는 인공위성이나 우량 관측망을 이용하여 강우를 관측할 경우에 생기는 오차를 강우의 시-공간적 분산도와 우량 관측망이나 인공위성의 운영계획에 따른 특성을 고려하여(Fig. 1) 다음과 같이 나타낼 수 있다고 밝힌 바 있다.

$$\epsilon^2 = \int \int \int |H(\nu, f)|^2 S(\nu, f) df d^2\nu \quad (1)$$

여기서 ν 는 파장수(wavenumber), f 는 진동수(frequency), ϵ 는 관측오차, S 는 강우의 스펙트럼, 그리고 H 는 우량 관측망이나 인공위성의 운영계획과 관련한 design filter이다. 여기서 design filter는 인공위성을 이용하는 경우, 인공위성이 매 Δt 시간마다 $L \times L$ 의 대상 지역을 총 T 시간동안 관측한다고 가정할 때 다음과 같이 표현된다.

$$H(f, \nu_x, \nu_y) = G(\pi\nu_x L) G(\pi\nu_y L) G(\pi f T) \left[1 - \frac{1}{G(\pi f \Delta t)} \right] \quad (2)$$

여기서 $G(x)$ 는 Bartlett filter 이다.

$$G(x) = \frac{\sin(x)}{x} \quad (3)$$

위 식에서 x 가 0으로 수렴할 때 $G(x)^2$ 은 1에 수렴하게 된다. 따라서 관측면적이 0이 되면($L=0$) 위의 Eq. (1)은 점 관측에 대한 오차를 추정하는 식이 된다.

여기서 주목할 만한 또 하나의 사실은 파장수 영역에서 Bartlett filter는 파장수가 $1/L$ 일 때 첫 번째 0값

을 갖게 되며, $L \rightarrow \infty$ 일 때 강우의 스펙트럼은 0에 수렴하게 되어 위의 적분계산을 수행할 때 3차원 스펙트럼 대신 1차원 스펙트럼인 $S(f, 0, 0)$ 의 사용을 가능하게 한다는 점이다(North and Nakamoto, 1989). 이 점을 이용하면 관측오차는 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$\epsilon^2 \approx \frac{\sigma^2}{L^2} \frac{1}{N\Delta t} \int \sum_{n \neq 0} \delta(f - \frac{n}{\Delta t}) S(f, 0, 0) df \quad (4)$$

여기서 σ^2 은 강우의 분산(공간적)이며, N 은 총 관측횟수로서 $N\Delta t = T$ 의 관계로부터 결정한다.

한편 지상 우량 관측망을 이용하는 경우의 design filter는 관측지역에 우량계를 매 Δl 마다 일정하게 설치했다고 볼 경우 다음과 같이 표현된다.

$$H(f, \nu_x, \nu_y) = G(\pi\nu_x L) G(\pi\nu_y L) G(\pi f T) \left[1 - \frac{1}{G(\pi\nu_x \Delta l) G(\pi\nu_y \Delta l)} \right] \quad (5)$$

만일 우량계가 충분히 설치되어 있다고 가정하면 ($L/\Delta l \gg 1.0$), 관측오차는 다음과 같이 간단하게 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon^2 &\approx \frac{\sigma^2}{L^2} \frac{1}{T} \int \sum_{n_x, n_y \neq 0} S(0, \frac{n_x}{\Delta l}, \frac{n_y}{\Delta l}) df \\ &\approx \frac{\sigma^2}{L^2} \frac{4}{T} \int \sum_{n_x, n_y = 1}^{\infty} S(0, \frac{n_x}{\Delta l}, \frac{n_y}{\Delta l}) df \end{aligned} \quad (6)$$

2.3 레이더 또는 우량 관측망을 이용하는 경우의 관측오차

본 절에서는 앞에서 언급한 강우모형을 관측오차문제에 적용하여, 레이더를 이용할 경우와 지상 우량 관

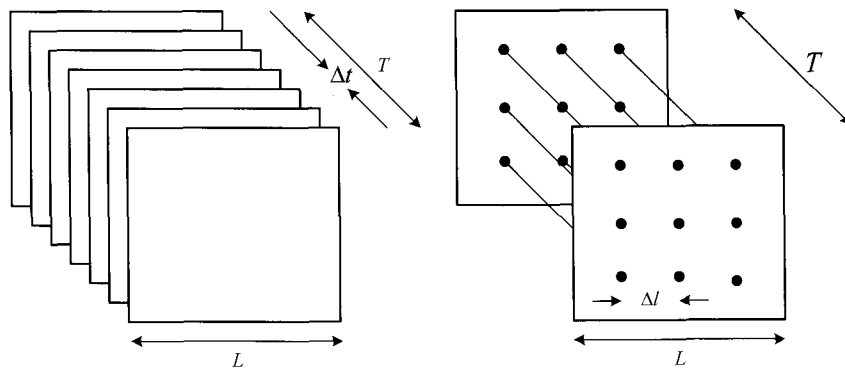


Fig. 1. Schematic diagram of rain observation using satellite (left) and rain gauge network (North and Nakamoto, 1989)

측망을 이용할 경우에 각각 어떻게 나타나는지를 살펴 보고자 한다. 레이더를 이용하는 경우의 관측오차는 Eq. (6)과 NFD 모형의 스펙트럼을 이용하면 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\epsilon_r^2 \approx \sigma_A^2 \frac{1}{\pi^2} \frac{\Delta t}{T} \frac{\Delta t}{\tau_0} \quad (7)$$

여기서 σ_A^2 는 강우강도의 면적평균값에 대한 분산, T 는 총 관측시간, Δt 는 관측간격이다. 예를 들어 $\Delta t = \tau_0 = 12\text{hrs}$ 이고 총 관측횟수가 60회($N=60$, $T=30\text{일}$)인 경우, 관측오차는 $\epsilon_r \approx 0.041\sigma_A$ 이 된다. 즉, 관측오차는 면적평균 강우의 표준편차의 약 4.1%가 된다.

우량 관측망을 이용하는 경우의 관측오차도 Eq. (4)와 강우모형의 스펙트럼을 이용하여 계산할 수 있다. NFD 강우모형의 경우 관측오차는 다음과 같이 표현된다(North and Nakamoto, 1989).

$$\epsilon_g^2 \approx \sigma_A^2 \frac{8\tau_0}{T} \sum_{n_x, n_y=1}^{\infty} \frac{1}{[1 + 4\pi^2(\lambda_0/\Delta t)^2(n_x^2 + n_y^2)]^2} \quad (8)$$

만일 두 개의 방법, 즉 지상 우량 관측망과 인공위성을 동시에 사용하게 된다면, 이 두 관측방법 사이의 직교성(design orthogonality)이 만족되므로, 총 관측오차는 각각의 경우의 관측오차를 다음과 같이 조화평균하여 구할 수 있다(Graves et al., 1993).

$$\epsilon_{rg}^2 \approx \frac{\epsilon_r^2 \epsilon_g^2}{\epsilon_r^2 + \epsilon_g^2} \quad (9)$$

여기서 ϵ_r^2 와 ϵ_g^2 는 각각 레이더를 이용하는 경우와 지상의 우량계를 이용하는 경우에 대한 관측오차이다.

3. Noise-Forced Diffusive 강우모형 (NFD강우모형) 및 매개변수 추정

3.1 NFD강우모형

NFD강우모형은 North and Nakamoto(1989)에 의해 제안된 모형이다. 간단한 확산방정식에 기초한 모형으로서 외력(external forcing) F , 즉 강우전선의 도달이나 강우의 생성·소멸을 추계학적으로 모의하고 이를 대상 지역에 확산시키는 형태를 가지고 있다. 이 모형에서 강우강도 $\Psi(r,t)$ 는 다음과 같은 지배방정식을 따른다.

$$\tau_0 \frac{\partial \Psi}{\partial t} - \lambda_0^2 \nabla^2 \Psi + \Psi = F \quad (10)$$

여기서 τ_0 와 λ_0 는 각각 시간축척(time scale)과 길이축척(length scale)을 나타내며 주어진 강우장에 대한 고유 특성치이다. 상관시간(correlation time) 또는 상관거리(correlation length)로 불리기도 한다. 이 모형의 시간적-공간적 스펙트럼은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$S(\nu, f) = \frac{\gamma}{4\pi^2 \tau_0^2 f^2 + (1 + 4\pi^2 \lambda_0^2 \nu^2)^2} \quad (11)$$

여기서 γ 는 정규화계수(normalization factor)로서 다음 식을 만족시키는 값을 취한다.

$$\int \int \int S(\nu, f) d^2 \nu df = 1.0 \quad (12)$$

이 강우모형은 작은 수의 매개변수를 가지고 있으며 간단한 확산방정식에 근거하고 있어 상대적으로 다른 목적에 쉽게 적용할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 이 모형은 관측 강우의 물리적 현상을 충분히 설명해 주고 있지 못하며, 아울러 강우의 확률밀도함수도 정규분포가 되어 관측된 강우의 통계적 특성과는 차이가 있다는 단점이 있기도 하다. 이런 이유로 WGR 강우모형(Waymire et al., 1984)이나 YVN 강우모형(Yoo et al., 1996) 등과 같은 다른 강우모형이 적용되어 평가되기도 하였다. 그러나 본 연구에서와 같은 적용 예에 있어서는 적용되는 모형에 따른 차이는 크지 않을 것으로 확인된 바 있다(Yoo et al., 2000).

3.2 매개변수의 추정

Eqs. (7)~(9)를 이용하여 관측오차를 계산할 경우에는 다섯 개의 매개변수 λ_0 , τ_0 , Δt , T , Δl 가 추정되어야 한다. 여기서 λ_0 는 강우장의 상관거리, τ_0 는 상관시간, Δt 는 레이더의 관측을 통해 획득되는 자료의 시간 간격, T 는 전체 관측시간, Δl 은 우량계 사이의 간격을 나타낸다. 여기서 Δt 는 설치될 레이더의 볼륨관측주기인 10분(1/6시간), T 는 홍수예보에 있어서 계산시간간격인 1시간, 그리고 Δl 은 우량계 사이의 평균간격으로 결정될 수 있다. 또한 강우장의 시공간적 특성이라 할 수 있는 상관거리 및 상관시간은 금강유역의 28개 지점 시자료를 이용하여 결정하였다(Fig. 2). 그 결과 상관거

리(λ_0)는 30 km, 상관시간(τ_0)은 약 3시간 정도로 나타난다(Fig. 3). 참고로 상관거리는 Fig. 3의 추세선 아래 면적으로 결정된 것이며, 특히 거리 또는 시간에 대한 상관특성이 지수함수형태의 추세선으로 설명될 수 있는 경우 $1/e$ 에 해당하는 시간 또는 거리가 된다. 추정된 매개변수를 종합하면 Table 1과 같다.

4. 강우 레이더를 고려하는 경우의 지상 우량 관측망 밀도 추정

전 절에서 추정된 매개변수를 이용하여 Eqs. (7)~(9)에 적용하면 지상 우량 관측망만을 이용했을 경우, 레이더만 이용하였을 경우, 레이더와 지상 관측망을 동시에 이용했을 경우의 관측오차를 추정할 수 있다. 레이더와 지상관측소를 이용하여 면적평균강우량을 산정할

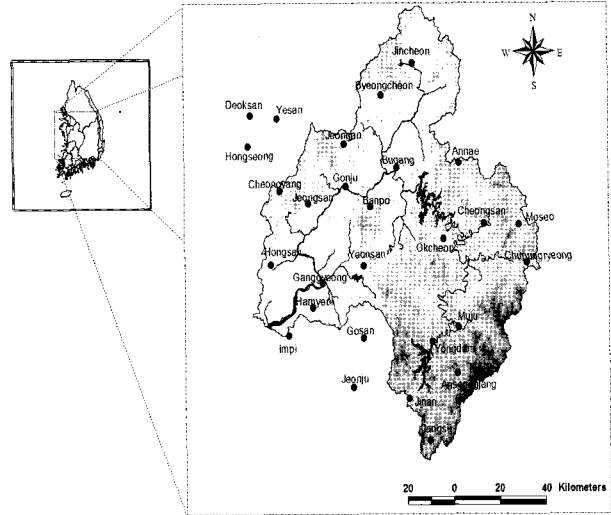


Fig. 2. Locations of rain gauges

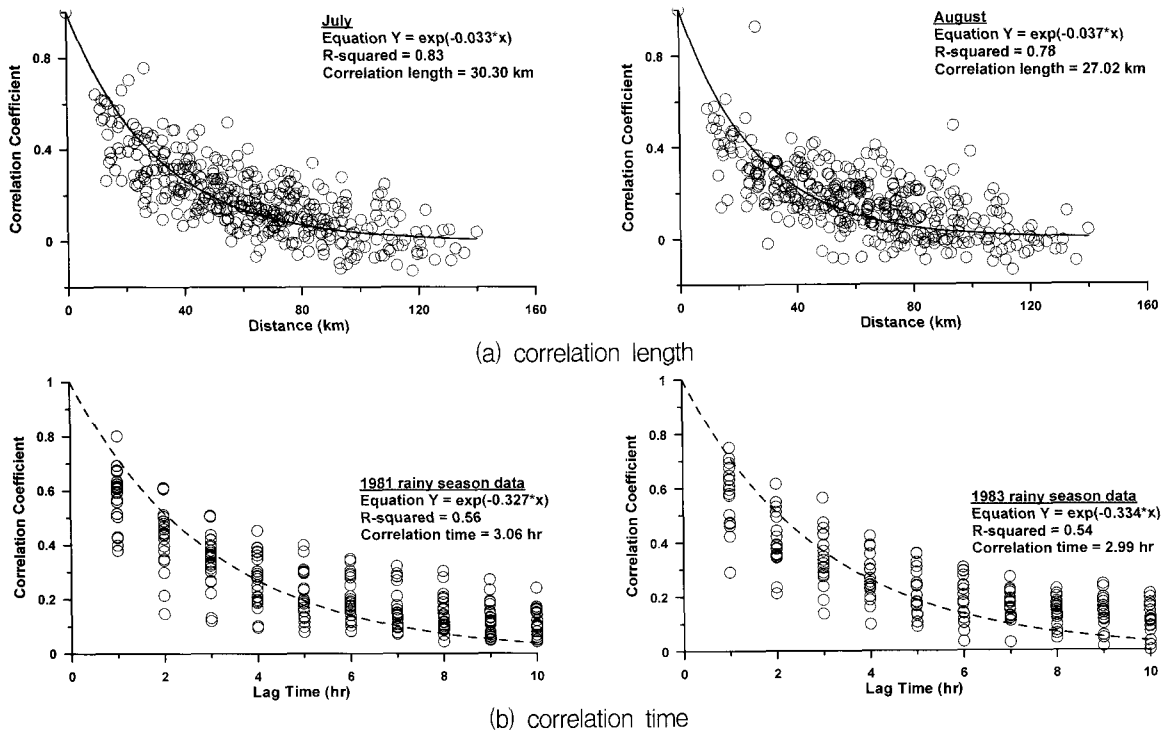


Fig. 3. Estimation of correlation length(a) and time(b) using the correlograms of rainfall derived by analyzing the 28 rain gauge measurements.

Table 1. Parameters estimated

parameters	explanation	estimates	remarks
λ_0	correlation length	30 km	28 rain gauges
τ_0	correlatin time	3 hours	28 rain gauges
Δt	sampling interval of radar	10 minutes	assumption
T	total sampling duration	1 hour	forecasting interval of flood warning system
Δl	mean distance between rain gauges	-	depending on the gauge density

경우의 추정오차는 Fig. 4 및 Table 2와 같이 계산된다. 여기서 추정오차는 면적평균강우량의 표준편차에 대한 백분율이다.

Fig. 4 및 Table 2를 통해서 금강유역에 대하여 지상 관측망의 수가 증가할수록 관측오차가 어떤 거동을 보이는 지 파악할 수 있다. 즉, 레이더의 경우는 레이더의 운영방식이 고려되어 있으므로 관측오차는 변하지 않는다. 그러나 우량계의 경우는 그 수의 증가에 따라 오차의 규모가 지수적으로 감소한다. 우량계와 레이더를 함께 운영하는 경우는 관측오차가 작은 쪽을 주로 따라가게 된다. 이 두 경우 사이에서는 두 경우가 적절히 조합되게 된다. 즉 우량계수가 10개 미만일 경우 오차규모는 레이더만을 이용하는 경우와 유사하고, 반대로 70개 이상일 경우에는 지상 우량 관측망의 오차규모와 유사하게 된다.

한 유역에 대하여 어느 정도의 관측오차가 적절한지에 대한 기준은 명확하지 않다. 따라서 본 연구에서는 현재의 우량 관측망에 대하여 추정된 관측오차를 기준으로 하여 강우레이더 도입의 효과를 파악하고자 한다. 본 연구에서는 Table 3의 다섯 가지 경우에 대하여 분석을 실시하였다.

Table 3는 다섯 가지 경우에 대하여 확보해야 하는 관측오차에 따라 필요한 지상우량계의 개수 및 밀도를 정리한 것이다. 먼저 우량계가 30개와 32개인 경우는

홍수예보시 실시간 자료수집이 가능한 건설교통부의 T/M 관측소(■)와 AWS 관측소(●)의 개수이다. Fig. 4에서 확대된 부분을 보면, ■의 경우에 대하여 지상 우량계만을 이용할 경우의 관측오차는 면적평균강우량의 표준편차의 2.95%이고 통합관측시 동일한 관측오차를 확보하는 경우 필요한 지상 우량계의 수는 현재의 절반 이하의 수준인 8개로 나타난다. 마찬가지로 ●의 경우를 고려하면 통합 관측시 현재 수준과 동일한 관측오차를 확보하는 경우 필요한 우량계의 수가 14개로 파악되어 18개의 우량계 축소가 가능하게 된다. 만일 WMO의 산지지역에 대한 최소 밀도 기준인 250 km²/개소를 기준으로 적용하면(■) 우량계만을 이용하는 경우 총 40개의 우량계가 필요하나, 강우 레이더를 도입하게 되면 그 수가 28개로 크게 줄게 된다. WMO의 산지지역에 대한 상한계 기준인 100 km²/개소를 기준으로 적용한다면(●) 필요한 우량계의 수는 99개로 계산되고 강우 레이더의 도입에 따라 필요한 우량계의 수는 95개로 나타난다. 이 경우에는 레이더 도입의 효과가 미미한데, 이는 기본적으로 현재의 우량계망 자체가 매우 낮은 오차수준을 나타내기 때문이다. 만일 건설교통부의 T/M 관측소와 AWS 관측소를 동시에 이용한다면(■) 강우레이더의 도입으로 약 7개의 우량계 축소가 가능한 것으로 파악된다.

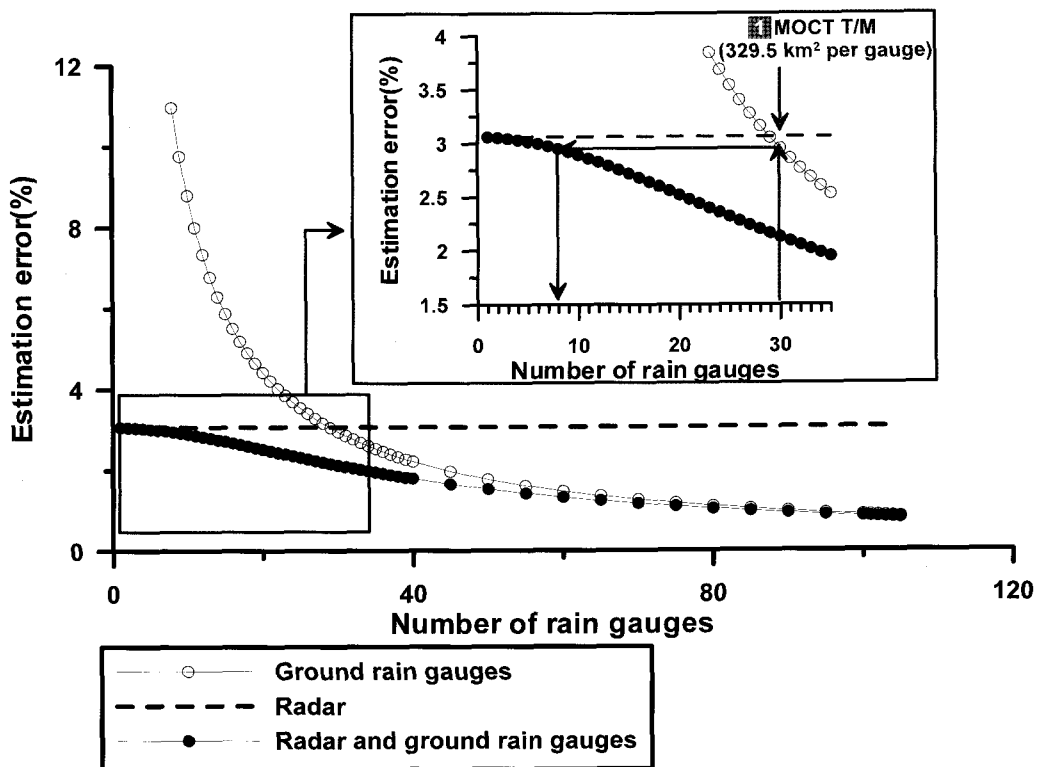


Fig. 4. Sampling errors of areal average rainfall when using both the radar and rain gauges

Table 2. Sampling errors of areal average rainfall from rain gauges and radar (%)

# gauges	density (km ²)	rain gauge only	radar only	both rain gauge and radar	remarks
1	9886.0	81.259	3.063	3.061	
5	1977.2	17.425	3.063	3.017	
8	1235.8	10.968	3.063	2.956	1 C
10	988.6	8.795	3.063	2.893	
14	706.1	6.299	3.063	2.755	2 C
15	659.1	5.882	3.063	2.717	
20	494.3	4.418	3.063	2.517	
25	395.4	3.538	3.063	2.316	
28	353.1	3.160	3.063	2.169	3 C
30	329.5	2.950	3.063	2.125	4 G
32	308.9	2.766	3.063	2.053	5 G
35	282.5	2.530	3.063	1.951	
40	247.2	2.285	3.063	1.795	6 G
45	219.7	1.969	3.063	1.656	
50	197.7	1.772	3.063	1.534	
55	179.7	1.612	3.063	1.426	7 C
62	159.5	1.430	3.063	1.296	8 G
95	109.8	0.934	3.063	0.883	9 C
99	99.9	0.866	3.063	0.860	10 G
100	98.7	0.887	3.063	0.852	

* G represents the rain gauge only, and C both rain gauge and radar

Table 3. Rain gauge density considered in this study

symbol	#gauges	density(km ²)	description	remark
1	30	329.5	density of MOCT T/M gauges in the Keum river basin	
2	32	308.9	density of AWS gauges in the Keum river basin	
3	40	247.2	WMO lower limit density (mountainous)	
4	62	159.5	density of AWS and MOCT gauges in the Keum river basin	
5	100	98.7	WMO upper limit density (mountainous)	

5. 결 론

본 연구에서는 강우 레이더를 함께 이용하는 경우의 통합관측 효과, 즉 지상 관측망의 밀도 축소 정도 방안 (또는 관측밀도의 결정 방안)을 제시하였다. 구체적인 적용 예로서 금강유역에 강우레이더가 추가로 설치되는 경우 지상 우량 관측망 밀도를 어느 정도까지 떨어트릴 수 있는지에 대한 평가를 수행하였다. 이를 위해 North and Nakamoto(1989), Yoo et al.(1996), 유철상(1997)의 관측오차 관련연구를 응용하였으며, 강우장의 모형을 위해서는 그 구조가 간단한 NFD 모형을 이용하였다. 모형의 매개변수는 금강유역에 설치된 28개 우량 관측소를 이용하여 추정된 강우장의 특성치(상관거리 및 상

관시간)를 이용하여 결정하였고, 레이더의 운영 특성은 임의로 가정하였다.

기본적으로 관측오차는 우량계의 증가에 따라 지속적으로 감소한다. 이 반면에 강우 레이더의 경우는 운영방법이 고정되어 있기 때문에 일정한 관측오차를 주게 된다. 우량계와 강우 레이더를 함께 운영하는 경우의 관측오차는 각각의 경우의 관측오차의 조화평균으로 결정되므로 관측오차가 작은 쪽을 주로 따라가게 된다.

본 연구의 적용 유역인 금강 유역의 경우 우량계의 수가 10개 미만일 경우의 오차규모는 레이더만을 이용하는 경우와 유사하게 나타나고, 반대로 70개 이상일 경우는 지상 우량 관측망의 그것과 유사해진다. 즉, 우량계 밀도가 아주 높아지면 레이더의 효용은 사라지고,

반대로 우량계 밀도가 낮을 경우에는 레이더의 효용이 극대화된다.

이러한 관계를 이용하여 목표로 하는 금강 유역의 면적평균강우의 관측오차에 대한 관측망의 밀도를 추정할 수 있다. 본 연구에서는 WMO의 산지 기준 및 금강 유역에 설치되어 있는 AWS, 건설교통부 우량 관측망에 대한 관측오차를 기준으로 하여 각각의 경우 통합관측시 필요한 지상 우량계 밀도를 추정하였다. 예를 들어, WMO의 산지기준 중 하한계 기준인 250 km²/개소를 기준으로 적용하면 우량계만을 이용하는 경우 총 40개의 우량계가 필요하나 강우 레이더를 도입하게 되면 그 수가 28개로 크게 줄게 된다. 그러나 WMO의 산지지역에 대한 상한계 기준인 100 km²/개소를 기준으로 적용한다면 필요한 우량계의 수는 99개로 계산되고 강우 레이더의 도입에 따라 필요한 우량계의 수는 95개로 나타난다. 따라서 이 경우에는 레이더를 설치하지 않아도 지상 관측망만으로도 비슷한 규모의 관측오차를 확보할 수 있다.

마지막으로, 본 연구에서의 결과는 대상유역의 강우장을 특성화하는데 사용한 NFD 모형에 어느 정도 의존적임을 밝혀준다. 이 모형을 채용함으로써 대상 유역의 강우특성은 모형의 매개변수 및 스펙트럼 구조에 의존하게 되고, 따라서 다른 모형을 채택하거나 또는 관측된 강우장의 스펙트럼을 이용하는 경우 본 연구의 최종결과도 어느 정도 달라질 수 있는 여지가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2003-000-10046-0)지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

기상연구소 (2001). **자연재해방재기술개발사업-약기 상 감사·예측 및 재해대응 기술 개발**, 연구보고서, 과학기술부, p. 178.

염경택, 이충기, 정구열, 정세웅, 김주환, 박우양, 정의용 (2000). "강화수문레이더를 이용한 임진강 유역 홍수예경보시스템 운영현황." **한국기상학회 가을 학술발표회 논문집**, pp. 91-94.

유철상 (1997). "관측오차에 대한 다차원 강우모형의 적용." **한국수자원학회논문집**, 제30권, 제5호, pp. 441-447.

이명섭 (2000). "수문레이더를 이용한 임진강유역 홍수예경보시스템 구축." **한국수자원학회지**, 제33권, 제1호, pp. 58-62.

Azimi-Zonooz, A., Krajewski, W.F., Bowles, D.S., and Seo, D.J. (1989). "Spatial rainfall estimation by linear and nonlinear co-kriging of radar rainfall and rain gage data." *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Vol. 3, pp. 51-67.

Graves, C.E., Valdes, J.B., Shen, S.S.P., and North, G.R. (1993). "Evaluation of sampling errors of precipitation from spaceborne and ground sensors." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 32, pp. 374-384.

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, No. 1, pp. 65-73.

North, G.R. and Nakamoto, S. (1989). "Formalism for comparing rain estimation designs." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 6, No. 6, pp. 985-992.

North, G.R., Shen, S.S.P., and Upson, R.B. (1991). "Combining rain gages with satellite measurements for optimal estimates of area-time averaged rain rates." *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 10, pp. 2785-2790.

North, G.R., Valdes, J.B., Ha, E., and Shen, S.S.P. (1994). "The ground-truth problem for satellite estimates of rainfall." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 11, No. 4, pp. 1035-1041.

Seo, D.J. (1996). "Nonlinear estimation of spatial distribution of rainfall—An indicator co-kriging approach." *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Vol. 10, No. 2, pp. 127-150.

Seo, D.J. (1998a). "Real-time estimation of rainfall fields using rain gage data under fractional coverage conditions." *Journal of Hydrology*, Vol. 208, pp. 25-36.

Seo, D.J. (1998b). "Real-time estimation of rainfall fields using radar rainfall and rain gage data." *Journal of Hydrology*, Vol. 208, pp. 37-52.

Seo, D.J., Krajewski, W.F., and Bowles, D.S. (1990a). "Stochastic interpolation of rainfall data from rain gages and radar using co-kriging: 1. Design of experiments." *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 3, 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, No. 5, pp. 915-924.
- Waymire, E., Gupta, V.K. and Rodriguez-Iturbe, I. (1984). "Spectral theory of rainfall intensity at the meso- β scale." *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 10, pp. 1453-1465.
- WMO (1994). *Guide To Hydrological Practices-Fifth edition*, WMO-No.168.
- Yoo, C. (2000). "On the sampling errors from raingauges and microwave attenuation measurements." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 14, No. 1, pp. 69-77.
- Yoo, C. (2001). "Sampling of soil moisture fields and related errors: Implications to the optimal sampling design." *Advances in Water Resources*, Vol. 24, No. 5, 521-530.
- Yoo, C. (2002). "A ground validation problem of the remotely sensed soil moisture data." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 16, No. 3, pp. 175-187.
- Yoo, C., Valdes, J.B., and North, G.R. (1996). "Stochastic modeling of multi-dimensional precipitation fields considering spectral structure." *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 7, pp. 2175-2187.
- Yoo, C., Ha, E., and Shin, S.C. (2000). "Model vs design sensitivity to the ground-truth problem of rainfall observation." *Advances in Water Resources*, Vol. 25, No. 6, pp. 651-661.

(논문번호:07-05/접수:2007.01.18/심사완료:2007.09.27)