

레이더 강우의 편의 보정을 위한 지역적으로 편중된 우량계망의 평가: 강화 강우레이더의 사례 연구

Evaluation of Spatially Disproportionate Rain Gauge Network for the Correction of Mean-Field Bias of Radar Rainfall: A Case Study of Ganghwa Rain Radar

유철상* / 윤정수** / 김병수*** / 하은호****

Yoo, Chulsang / Yoon, Jungsoo / Kim, Byoungsoo / Ha, Eunho

Abstract

Estimation of the mean-field bias of radar rainfall is to determine the difference between the areal means of radar and rain gauge rainfall, where the rain gauge rainfall is assumed to be the truth. To exactly determine this bias, the variance of the difference between two observations must be small enough, thus, enough number of observations is indispensable. So, the problem becomes to determine the number of rain gauges to satisfy the level of variance of the difference between two observations. Especially, this study focuses on the case when the rain gauges are disproportionate spatially. This is the problem for the Ganghwa rain radar for the observation of rainfall within the Imjin river basin and the same problem also occurs when a radar is located in between land and ocean. This study considered the Imjin river basin, and compared two cases when rain gauges are available only within the downstream part, about one third of the whole basin, and over the whole basin. Based on the results derived, the rain gauge density within the downstream part of the Imjin river basin was proposed to secure the same accuracy obtained when the rain gauges are available over the whole Imjin river basin.

keywords : Radar rainfall, bias estimation, rain gauge density, Imjin river basin

요 지

레이더 강우의 편의 추정은 근본적으로 레이더 강우의 평균과 참값으로 가정되는 우량계 강우의 평균과의 차이를 결정하는 문제이다. 두 관측치의 차이를 정확히 결정하기 위해서는 두 관측치의 차이에 대한 분산이 매우 작아야 하며, 따라서 비교되는 관측치의 수가 충분히 확보되어야 한다. 즉, 이 문제는 두 관측치의 차이에 대한 분산의 규모를 주어진 조건에 맞추기 위해 필요한 우량계의 수를 결정하는 것이 된다. 본 연구에는 특히 일부 지역에만 우량계의 설치가 가능한 경우를 대상으로 하고자 한다. 이는 임진강 유역에 대해 강우레이더를 운영하는 경우에 해당하는 문제이며, 또한 바다와 접한 지역에서 레이더를 설치 운영할 경우에도 발생하는 문제이다. 본 연구에서는 임진강 유역

* 교신저자, 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수

Corresponding Author, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea.

(e-mail: envchul@korea.ac.kr)

** 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea.

*** 도화종합기술공사 수자원 1부 사원

#735-18 Yeoksam-dong, Gangnam-Gu, Seoul, 135-080, Korea.

**** 연세대학교 정보통계학과 교수

Department of Information Statistics, College of Liberal Arts and Sciences, Yonsei University, Wonju, Kangwon 222-701, Korea.

을 대상으로 하였으며, 전체 유역의 약 1/3정도인 하류유역에서만 우량계 자료가 가용한 경우와 전체 유역에 대해 우량계 강우가 가용한 경우의 차이를 비교하였다. 이러한 분석결과를 토대로 임진강 유역 전체 지역에 고르게 우량계가 분포할 경우의 관측정도를 얻기 위한 하류유역의 우량계 밀도를 제시하였다.

핵심용어 : 레이더 강우, 편의추정, 우량계 밀도, 임진강 유역

1. 서론

임진강 유역은 남북한의 경계가 유역의 중앙부를 관통하고 있다는 점에서 다른 유역들과 구별된다(Fig. 1). 북한강유역과 같이 유역의 일부만이 북한에 포함되는 경우가 있으나 임진강 유역과 같지는 않다. 임진강 유역의 경우 전체 유역면적의 62.9%가 북한에 위치해 있고 나머지 37.1%가 남한에 위치해 있다. 1950년 한국전쟁 이후 임진강 유역은 체계적인 수문관측이 이루어질 수 없는 상황이었으며, 아울러 남북한의 수문자료 교환도 아주 미미한 수준에 머물러 있다(건설교통부, 1997; 2006a).

이러한 상황 하에서 1990년대 말 임진강 하류의 작은 도시들이 큰 홍수피해를 입은 바 있다(건설교통부, 1997; 2005; 내무부, 1997). 이에 정부에서는 홍수 조절을 위한 다각적인 대책을 마련하였다(건설교통부, 1997). 그중 구조적인 대책으로는 한탄강댐, 군남홍수조절지, 제방의 보강 등을 들 수 있으며, 비구조적인 대책으로 홍수예경보시스템의 도입을 살펴볼 수 있다(건설교통부, 2001; 2006b). 특히, 홍수예경보시스템의 입력자료인 강우의 관측을 위해 우리나라에서는 처음으로 강우레이더를 도입하였다(건설교통부, 2006a). 그러나 현재 임진강 유역의 홍수예경보시스템에 레이더 강우가 적극적으로 활용되고 있지는 못한 상황이며, 이는 레이더 강우가 가지는 여러 가지 한계 때문이다.

기본적으로 기상 또는 강우레이더가 제공하는 강우 자료는 강우-유출 해석에 직접 적용할 수 있는 수준이 되지 못한다(유철상과 김경준, 2007; 유철상 등, 2007). 레이더는 일종의 원격탐사 장비로서 먼 거리에 위치한 대기 중의 물방울을 감지한다. 대기 중 물방울의 크기 및 밀도가 레이더 반사파(또는 에코)의 강도를 결정한다. 그러나 그 관계는 선형이 아니므로 일관된 관계를 설정하기 어렵다(Chiu *et al.*, 1990; Short and North, 1990; Kummerow, 1998; Lafont and Guillemet, 2004). 아울러 대기 중의 물방울이 모두 지상의 강우로 전환되지 않는다는 사실도 레이더 강우를 실제 강우와 차이 나게 만드는 원인이 된다. 레이더가 회전함으로써 한 지역만을 연속적으로 관측하지 못하여 발생하는 오차도 있다(North *et al.*, 1991; Yoo, 2000; 2001).

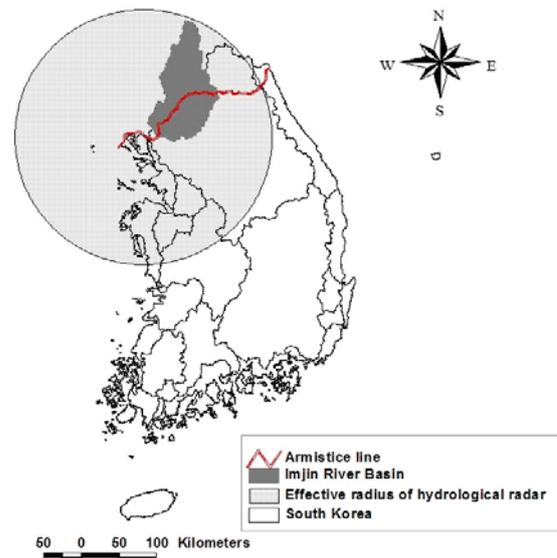


Fig. 1. Location of the Imjin River Basin

이상과 같은 레이더의 대표적 문제점은 다양한 연구들을 통해 해결되어 가고 있다. 예를 들어, 레이더 에코와 레이더 강우를 연결하는 문제(Short and North, 1990; Ha and North, 1995; Creutin *et al.*, 1997; Anagnostou *et al.*, 1998; Steiner *et al.*, 1999), 레이더 강우와 실제 강우와의 차이를 보정하는 문제(유철상 등, 2007; North *et al.*, 1994; Ha *et al.*, 2002; Yoo *et al.*, 2002; Yoo, 2002), 레이더 강우와 우량계 강우를 합성하는 문제(정성화, 2005; 최규현 등, 2006; Azimi-Zonooz *et al.*, 1989; Seo, 1998a; Seo, 1998b) 등을 살펴볼 수 있다.

이상과 같은 레이더 강우의 품질 향상 방안은 모두 지상에 충분한 수의 우량계가 대상 유역 안에 대체로 균등하게 분포되어있어야 한다는 전제조건을 가진다. 그렇지 못할 경우, 보정 또는 자료합성의 효율은 급격히 떨어질 수밖에 없다. 가장 기본적인 문제인 면적평균강우의 편의(mean field bias) 제거 자체도 많은 불확실성을 나타낼 수밖에 없다. 임진강 유역의 경우에는 유역의 약 2/3를 차지하는 북한 지역에 우량계를 설치 운영하는 것이 현실적으로 어렵다는 또다른 문제점이 있다. 즉, 유역의 일부 지역에서만 참값으로 가정할 수 있는 우량계 강우가 가용하다. 따라서 일반적인 경우에

서처럼 유역 전체에 걸쳐 균등하게 분포되어 있는 우량계 강우를 이용한 면적평균강우의 편위 보정 방법은 임진강 유역에는 적용할 수 없다.

본 연구에서는 임진강 유역에서와 같이 지역적으로 편중되어 있는 우량계 강우를 이용하여 대상 유역 전체에 대한 편위를 보정하는 경우를 살펴보고자 한다. 즉, 유역의 약 1/3 정도에 해당하는 지역에서만 가용한 우량계 강우를 이용하여 임진강 유역 전체에 대한 면적평균강우의 편위를 추정할 경우의 문제를 살펴보고자 한다. 이러한 문제를 통해 궁극적으로 남한측에 가용한 우량계의 수를 고려하면 얼마만 한 편위보정의 오차가 발생하는지를(또는 정확성을 확보할 수 있는지를) 파악할 수 있다. 아울러, 주어진 오차한계를 만족하는 우량계 수를 임진강 유역 전체 및 남한측에 대해 각각 추정해 보고, 이를 통해 효율적인 지상보정망의 설계에 대해 살펴볼 수 있다. 이러한 연구는 또한 해양에서와 같이 지상 강우의 관측이 어려운 경우 어떤 방식으로 면적평균강우의 편위를 보정해야 하는지, 또는 이러한 목적의 지상보정망을 어떻게 구성해야 하는지와 같은 문제의 해결에도 직접적으로 관련된다.

2. 우량계 강우를 이용한 레이더 강우의 편위 추정

2.1 레이더 강우의 편위 추정 문제

규모가 $L_1 \times L_2$ 인 지역 내 임의의 한 지점 $r = (x, y)$ 에서 시간이 t 일 때의 순간적인 강우강도(instantaneous rainrate)를 나타내는 무작위 강우장을 $\Psi(r, t)$ 라고 하자. 또한 주어진 대상 지역 $R = [-L_1/2, L_1/2] \times [-L_2/2, L_2/2]$ 에 N 개의 우량계가 있어 그 위치를 각각 $r_{g_1} = (x_{g_1}, y_{g_1})$, $r_{g_2} = (x_{g_2}, y_{g_2})$, ..., $r_{g_N} = (x_{g_N}, y_{g_N})$ 라고 하자. 이때 강우계는 대상 지역 내 균질하게(uniformly) 분포되어 있다고 가정한다. 따라서 임의의 한 지점에 강우계가 위치할 확률은 다음과 같이 계산된다.

$$P(r_{g_n}) = \frac{1}{L_1 L_2}, \text{ when } r_{g_n} \in R, n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

레이더 강우자료는 일반적으로 격자 형태이며 각 격자의 크기를 $a \times b$ 로 가정하기로 한다. 따라서 임의의 n 번째 우량계를 포함하는 레이더 격자 내 강우의 평균은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Psi_{R_n} = \frac{1}{ab} \int_{y_{g_n} - l_y}^{y_{g_n} + b - l_y} \int_{x_{g_n} - l_x}^{x_{g_n} + a - l_x} \psi(x, y, t) dx dy \quad (2)$$

위 식에서 ab 는 격자 $R' = [x_g - l_x, x_g + a - l_x] \times [y_g - l_y, y_g + b - l_y]$ 의 면적을 나타낸다. 또한 $l = (l_x, l_y)$ 는 우량계에서 레이더 격자 R' 의 한 모서리(end point)까지의 거리를 나타낸다. 레이더 격자 내 우량계의 위치는 격자별로 크게 다르며 아울러 어떠한 규칙성도 발견하기 어렵다. 따라서 각 우량계는 레이더 격자 내에서 공간적으로 균질하게 분포하는 것으로 가정할 수 있다. 즉, 레이더 격자 $[0, a] \times [0, b]$ 내 임의의 지점에 우량계가 위치할 확률은 다음과 같이 표시된다.

$$P(l) = \frac{1}{ab} \quad (3)$$

우량계가 위치한 임의의 n 번째 레이더 격자에 대해서 다음과 같이 두 가지의 면적평균강우를 정의할 수 있다. 먼저, 레이더 강우의 경우는 Eq. (2)에서 정의한 것과 같다. 두 번째는 우량계 강우를 이용하는 경우로서 우량계 강우가 레이더 격자내의 평균 강우를 대표한다고 가정하는 경우이다. 즉,

$$\Psi_{G_n} = \int_{y_{g_n} - l_y}^{y_{g_n} + b - l_y} \int_{x_{g_n} - l_x}^{x_{g_n} + a - l_x} \delta(r_{g_n}) \psi(x, y, t) dx dy \quad (4)$$

위 식에서 $\delta(r_{g_n})$ 은 Dirac delta 함수로서 다음 조건을 만족한다. 즉, $\int \delta(x) dx = 1$, $\int \delta(x - x_0) f(x) dx = f(x_0)$.

유역 내 우량계가 균질하게 분포되어 있다고 하면 유역평균 레이더 강우가 갖는 편위는 다음과 같이 두 관측치의 차이 즉, 오차에 대한 기댓값으로 정의할 수 있다.

$$\text{Bias} = E[\epsilon_j] = E[\Psi_{G_j} - \Psi_{R_j}] \quad (5)$$

또한 이 편위에 대한 불확실성은 다음과 같이 오차 분산의 기댓값(expected value of the variance of the error)으로 정의할 수 있다. 즉,

$$E[\langle \epsilon_j^2 \rangle] = E[\langle (\Psi_{G_j} - \Psi_{R_j})^2 \rangle] \quad (6)$$

위 Eq. (6)에 Eq. (2)와 (4)를 대입하여 정리하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다(North and Nakamoto, 1989; North et al., 1994; Ha et al., 2002; Yoo et al., 2002). 즉,

$$E_j^2 = E[\langle \epsilon_j^2 \rangle] = \sigma^2 \int \int H(\nu_x, \nu_y) S_T(\nu_x, \nu_y) d\nu_x d\nu_y \quad (7)$$

위 식에서 σ^2 는 강우장 $\psi(x, y, t)$ 의 분산을 나타낸다. 위 식은 크게 강우장의 공간적인 스펙트럼 S_T 와 관측의 특성을 나타내는 필터 H 의 두 부분으로 구성되어 있다. 먼저, 강우장의 공간적인 스펙트럼은 강우장의 시-공간적인 스펙트럼을 주파수 영역에 대하여 적분함으로써 결정할 수 있다.

$$S_T(\nu_x, \nu_y) = \int S(\nu_x, \nu_y, f) df \quad (8)$$

또한 관측의 특성을 반영하는 필터 $H(\nu_x, \nu_y)$ 는 다음과 같이 유도된다. 즉,

$$H(\nu_x, \nu_y) = \frac{1}{N} (1 - G^2(a\nu_x) G^2(b\nu_y)) + (1 - \frac{1}{N}) (1 - G^2(a\nu_x) G^2(b\nu_y)) G^2(L_1\nu_x) G^2(L_2\nu_y) \quad (9)$$

여기서, $G(x) = \sin(\pi x)/\pi x$ 이다.

다음으로 N 개의 우량계가 대상 지역 내 무작위하게 위치하고 있다고 가정해 보자. 이 때 이 지역의 면적평균 강우는 다음과 같이 정의된다.

$$\Psi = \frac{1}{L_1 L_2} \int_D \psi(r, t) d^2r \quad (10)$$

Eq. (10)에서 적분구간은 각각 $-L_1/2 < x < L_1/2$, $-L_2/2 < y < L_2/2$ 로서 정사각형 형태의 적분영역 D 를 갖는다. 즉, $D = (-L_1/2, L_1/2) \times (-L_2/2, L_2/2)$. North and Nakamoto(1989), Yoo(2001) 등에 따르면, 면적평균 강우 Ψ 의 분산은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_\Psi^2 = \sigma^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} D^2(\nu_x, \nu_y) S_T(\nu_x, \nu_y) d\nu_x d\nu_y \quad (11)$$

여기서, σ^2 은 $\psi(r, t)$ 의 분산을 의미하고, $S_T(\nu_x, \nu_y)$ 는 Eq. (8)과 같이 정의되고 $D^2(\nu_x, \nu_y) = G^2(a\nu_x) G^2(b\nu_y)$ 이다. $G(x)$ 및 $D^2(\nu_x, \nu_y)$ 의 형태는 Fig. 2 및 Fig. 3과 같다. 특히 $D^2(\nu_x, \nu_y)$ 은 uni-modal의 2차원 곡선이 된다.

크기가 $a \times b$ 인 임의의 j 번째 격자(cell)에 대한 레이더 관측값의 면적평균은 다음과 같이 정의된다.

$$\Psi_R^j = \frac{1}{ab} \int_{y_j-b/2}^{y_j+b/2} \int_{x_j-a/2}^{x_j+a/2} \psi(x, y, t) dx dy \quad (12)$$

여기서, $r_j = (x_j, y_j)$ 은 격자의 중심점으로서 레이더

관측의 중심점을 나타낸다. 임의의 레이더 격자 위치를 고려하기 위해 레이더 관측의 중심점이 다음과 같은 지배영역 $D = (-L_1/2 + a/2, L_1/2 - a/2) \times (-L_2/2 + b/2, L_2/2 - b/2)$ 에 균일하게(uniformly) 분포되어 있다고 가정하자. 이 영역 D 는 앞서 정의된 적분영역 D 와 약간 차이가 있다(Fig. 4). 따라서 $D < D'$ 이다.

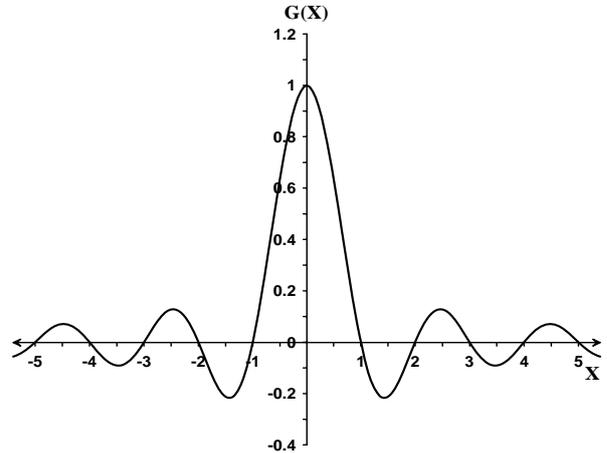


Fig. 2. Graph of Function $G(x)$

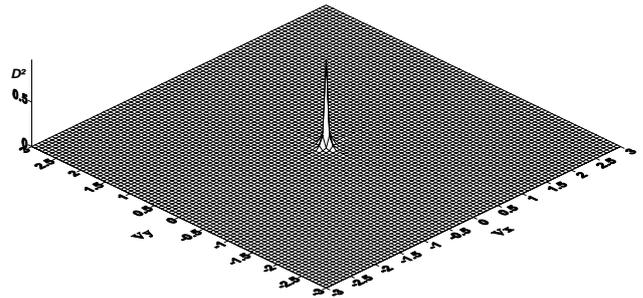


Fig. 3. Graph of Function $D^2(\nu_x, \nu_y)$ when $a=b=10$ km

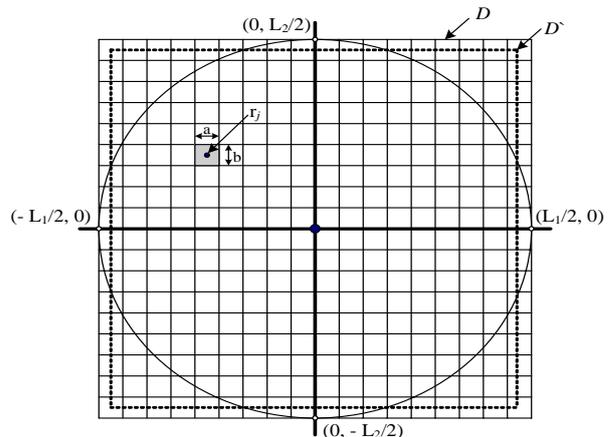


Fig. 4. Integral Domain D and Domain for Radar Cell Center D'

$r_j = (x_j, y_j) \in D'$ 을 만족할 때, 어떤 특정한 지점에

강우계가 위치할 확률은 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$P(r_j) = \frac{1}{(L_1 - a)(L_2 - b)} \quad (13)$$

아울러 N 개의 레이더 관측값이 가용할 경우 이들의 산술평균은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi_R = \frac{1}{N} \frac{1}{ab} \sum_{n=1}^N \int_{y_j - b/2}^{y_j + b/2} \int_{x_j - a/2}^{x_j + a/2} \psi(x, y, t) dx dy \quad (14)$$

참고로, 위와 같은 정의는 적분영역 D 에 대한 면적 평균강우를 나타낸다. 각 레이더 관측값이, 즉 격자가, 영역 D 위에 무작위로 위치하고 있으므로, Thiessen 방법을 이용하여 추정된 면적평균강우는 Eq. (14)으로 표현된 산술평균과 이론적으로 같은 값을 갖게 된다(유철상과 정광식, 2001; Damant *et al.*, 1983).

간단한 예로서 적분영역 D 안에 가용한 레이더 관측치(또는 격자)의 수가 1개인 경우(즉, $N=1$)를 고려해 보자. 이 문제는 가용한 레이더 관측치 1개를 가지고 적분영역 $D=L_1 \times L_2$ 의 면적평균강우를 추정하는 것과 같다. 본 연구에서는 레이더 관측치가 대상 지역(적분영역)을 완전히 포괄하지 못함에 따라 발생하는 오차, 즉 관측치와 미지의 참값과의 차이를 관측오차(sampling error)로 표현하기로 한다. 이 관측오차는 $\epsilon_j = \Psi - \Psi_R^j$ 이 되며, 또한 관측오차의 분산 $\langle \epsilon_j^2 \rangle$ 에 대한 기대값(expectation of error variance) E_j^2 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_j^2 = E[\langle \epsilon_j^2 \rangle] = \sigma^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(\nu_x, \nu_y) S_T(\nu_x, \nu_y) d\nu_x d\nu_y \quad (15)$$

여기서 σ^2 는 $\psi(x, y, t)$ 의 분산을 나타낸다. 또한, 관측의 특성을 나타내는 필터 $H(\nu_x, \nu_y)$ 는 Eq. (16)과 같이 유도된다.

$$H(\nu_x, \nu_y) = G^2(L_1\nu_x) G^2(L_2\nu_y) - 2G(av_x) G(bv_y) G(L_1\nu_x) G(L_2\nu_y) + G[(L_1 - a)\nu_x] G[(L_2 - b)\nu_y] + G^2(av_x) G^2(bv_y) \quad (16)$$

필터 $H(\nu_x, \nu_y)$ 의 모양은 Fig. 5와 같다.

그러나 위 Eq. (15)를 바로 적용하는 것은 쉬운 일이 아니다. 이는 현실적으로 시공간적으로 연속인 강우장의 분산 σ^2 을 추정하기 어렵기 때문이다. 이러한 문제

는 Eq. (11)에서와 같이 주어진 영역에 주어진 시간동안 내린 강우의 면적평균을 사용하여 쉽게 해결할 수 있다. 현실적으로 단위시간(예를 들어) 동안의 강우자료를 이용하여 면적평균강우를 정도 있게 확보하는 것은 가능하므로 이 자료의 분산추정 또한 가능하게 된다. 따라서 Eq. (15)를 Eq. (11)로 나누어 주면 분모, 분자에서 추정하기 어려운 시공간적으로 연속인 강우장의 분산 σ^2 이 약분되고 계산 가능한 부분만 남게 된다. 이와 같이 관측오차의 분산에 대한 기대값을 면적평균강우의 분산으로 나눈 값을 무차원 오차 분산(dimensionless error variance)이라고 정의한다. 즉,

$$V_j^2 = \frac{E_j^2}{\sigma_\Psi^2} \quad (17)$$

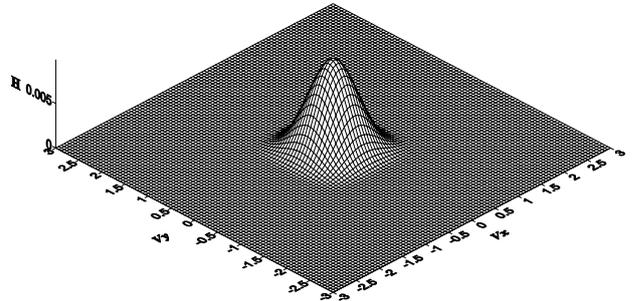


Fig. 5. Graph of Design Filter $H(\nu_x, \nu_y)$ ($L_1 = L_2 = 100$ km, $N=100$)

만일 관측의 횟수가 N 번으로 증가한다면, 즉, 적분영역 $D=L_1 \times L_2$ 안에 레이더 관측치가 N 개 가용하다면, 이들 값을 이용한 면적평균강우의 추정치는 Eq. (14)와 같이 되며 관측오차는 $\epsilon = \Psi - \Psi_R^N$ 이 된다. 이 경우의 관측오차에 대한 분산의 기대치 E_N^2 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_N^2 = E[\langle \epsilon^2 \rangle] = \sigma^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(\nu_x, \nu_y) S_T(\nu_x, \nu_y) d\nu_x d\nu_y \quad (18)$$

여기서, 필터 $H(\nu_x, \nu_y)$ 는 다음과 같이 유도된다.

$$H(\nu_x, \nu_y) = G^2(L_1\nu_x) G^2(L_2\nu_y) - 2G(av_x) G(bv_y) G(L_1\nu_x) G(L_2\nu_y) + G[(L_1 - a)\nu_x] G[(L_2 - b)\nu_y] + \frac{1}{N} G^2(av_x) G^2(bv_y) + (1 - \frac{1}{N}) G^2(av_x) G^2(bv_y) + G^2[(L_1 - a)\nu_x] G^2[(L_2 - b)\nu_y] \quad (19)$$

Eq. (20)에서 $N=1$ 인 경우에 Eq. (20)은 Eq. (16)과 같게 된다. 마지막으로, 이 경우의 무차원 오차 분산은 다음과 같이 정의된다.

$$V_N^2 = \frac{E_N^2}{\sigma_\psi^2} \quad (20)$$

2.2 지역적으로 편중된 우량계 자료를 이용한 레이다 강우의 편의 보정 문제

레이더 강우의 편의 추정은 근본적으로 레이다 강우의 평균과 참값으로 가정되는 우량계 강우의 평균과의 차이를 결정하는 문제이다. 그러나 이 차이를 정확히 결정하기 위해서는 두 관측치의 차이에 대한 분산이 매우 작아야 한다. 이러한 목적을 위해서는 비교되는 관측치의 수가 어느 정도 이상이 되어야 한다. 즉, 본 연구에서의 문제는 주어진 수준의 불확실성, 즉 두 관측치의 차이에 대한 분산의 수준을 맞추기 위해 필요한 관측치의 수를 결정하는 것이 된다. 예를 들어 레이다 강우의 평균보정에 필요한 우량계의 수가 얼마나 되는지를 결정하는 문제이다.

그러나 본 연구에서의 적용 대상 유역인 임진강 유역의 경우는 일반적인 레이다 강우의 편추정문제와는 또 다른 특성을 갖는다. 즉, 임진강 유역의 특수상황에 따라 우량계는 임진강 유역의 하류인 남한 지역에서만 가능하다. 따라서 지역적으로 편중된 우량계 강우자료를 이용한 레이다 강우의 편의보정 문제가 된다.

본 연구에서의 문제를 정리하면 다음과 같다. 첫째, 유역 내 일부 편중된 지역에만 우량계가 가용할 경우 전체 유역에 해당하는 레이다 강우의 편의 보정을 위해 필요한 우량계의 수는 전체유역을 대상으로 하는 경우와 어떠한 관계를 갖는가? 예를 들어, 임진강 유역의 경우 전체 유역에 대해 10% 정도의 무차원 오차분산을 갖기 위해 필요한 임진강 하류 남한지역의 우량계 밀도는 얼마인가? 필요한 우량계 수를 줄일 수 있는 방안은 있는가? 예를 들어 우량계와 비교되는 레이다 격자의

크기를 조절하는 방안 등이 고려될 수 있다.

3. 임진강 유역에 대한 적용

3.1 강우 관측망 현황 및 강우장의 특성화

임진강유역 내에서는 총 44개의 강우관측소가 기 운영되고 있다. 남한의 경우, 관할 기관별로 건설교통부 18개소, 기상청 3개소, AWS 15개소의 관측소가 운영되고 있으며, 북한의 경우 현재 유역 내에 2개소의 WMO 관할 강우관측소, 6개소의 북한 관할관측소가 운영되고 있다. 임진강유역 인근에 존재하는 강우관측소는 남한의 경우 건설교통부 산하 관측소 9개소, 기상청 산하 1개소, 북한의 경우는 WMO 산하 3개소이다(Fig. 6, Table 1). 참고로 기상청과 국토해양부의 기상관측 목적이 상이하며 따라서 요구되는 기상관측밀도도 다르다. 기상청은 기상감시 목적을 위해 전 기상관측 요소를 관측하는 10 km 간격의 다목적 기준 기상관측망을 구축하는 것이 목표이며, 국토해양부의 경우는 재해감시, 수문관리, 근해양 활동 등의 목적을 위하여 해당 구역에 2.5 km 간격의 부분 기상요소를 관측하는 목적별 기상관측망을 구축하는 것이 목표로 되어 있다(기상청, 2007).

유역 내에 존재하는 강우관측소만을 고려한다면, 남한의 경우 AWS 강우관측소를 포함시킬 경우 약 80 km²/개소이고 AWS 강우관측소를 제외시키면 약 140 km²/개소이며, 북한의 경우는 약 639 km²/개소로 그 차이가 매우 심하다(Table 1). 따라서 세계기상기구(WMO)에서 추천한 우량계 관측밀도에서 남한지역은 WMO의 산지기준인 250 km²/개소를 크게 상회하고 있으나 북한지역의 경우는 평지 하한계 기준인 575 km²/개소도 만족시키지 못하는 불균형을 보이고 있다. 또한 남한지역의 경우는 강우관측소가 유역 내에 고르게 분포되어 있지만 북한지역의 경우 유역의 서부에 편중되어 있으며 동부에서는 평강 관측소와 후평 관측소만 존재할 뿐이다(Fig. 6).

Table 1. Rain Gauge Network of the Lmjn River Basin

Region	No. of rain gauges	Area (km ²)	Rain gauge density (km ² / unit gauge)	Remarks
Downstream (South Korea)	36	3,030	84	Including AWS
	21		144	Excluding AWS
Upstream (North Korea)	8	5,109	639	
Total	44	8,139	185	Including AWS
	29		281	Excluding AWS

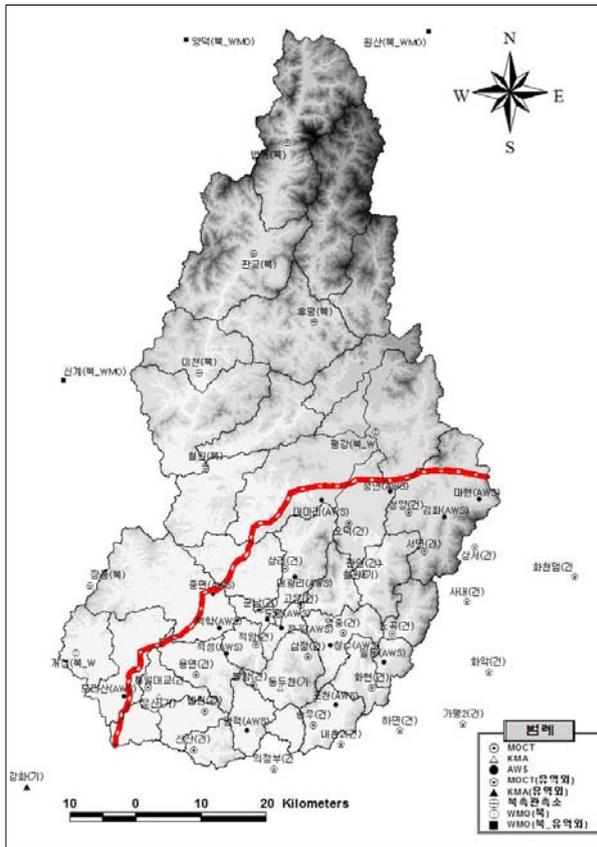


Fig. 6. Rain Gauge Network of the Lmjn River Basin

본 연구에서는 강우장의 특성화, 즉 강우장의 스펙트럼을 유도하기 위해 강우모형을 이용하였다. 다양한 강우모형이 사용되지만 본 연구에서는 그 형태가 간단한 Noise Forced Diffusive 강우모형(North and Nakamoto, 1989; 이하 NFD 강우모형이라 부름)을 이용하였다. 이 모형은 보다 복잡한 모형인 Noise Forced Advective-Diffusive 강우모형(Valdes *et al.*, 1990), YVN 강우모형(Yoo *et al.*, 1996), WGR 강우모형(Waymire *et al.*, 1984) 보다 물리적인 설명력은 떨어지지만 큰 무리없이 간단히 적용하기에 좋은 모형이다. 이 모형의 적용사례는 유철상(1997), Yoo and Ha (2001), Yoo *et al.*(2002), 유철상 등(2008) 등 다양하게 살펴볼 수 있다.

NFD 강우모형은 간단한 확산방정식에 기초한 모형으로 다양한 외력(external forcing), 즉 강우전선의 도달이나 강우세포(rain cell)의 생성·소멸을 추계학적으로 모의하고 이를 대상지역에 확산시키는 형태를 가지고 있다. 이 모형은 다음과 같은 지배방정식을 따른다.

$$\tau_0 \frac{\partial \Psi}{\partial t} - \lambda_0^2 \nabla^2 \Psi + \Psi = F \quad (21)$$

Eq. (21)에서 Ψ 는 강우강도를, F 는 외력을, τ_0 및 λ_0 는 강우장의 특성을 나타내는 매개변수로 각각 상관시간(correlation time) 및 상관거리(correlation length)를 의미한다. 이 두 매개변수는 관측된 강우자료를 이용하여 추정할 수 있다. 추정된 매개변수를 이용하여 NFD 강우모형의 스펙트럼을 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$S(\nu_x, \nu_y, f) = \frac{\alpha}{4\pi^2 \tau_0^2 f^2 + (1 + 4\pi^2 \lambda_0^2 \nu^2)^2} \quad (22)$$

Eq. (22)에서, α 는 정규화 계수(normalization factor)로서 다음 조건을 만족시키는 값으로 결정한다.

$$\int \int \int S(\nu, f) d^2\nu df = 1.0 \quad (23)$$

본 연구에서 결정해야 할 매개변수를 정리하면 Table 2와 같다. 이 중 레이더의 관측영역 및 해상도에 해당하는 L_1, L_2, a, b 는 앞서 설명한 것과 같다. 그러나 강우장의 특성에 해당하는 스펙트럼은 NFD 강우모형의 매개변수인 상관시간 τ_0 및 상관거리 λ_0 를 추정된 후 결정할 수 있다. 이들 매개변수의 추정을 위해서는 관측된 강우자료를 이용하여 시간축에서의 상관특성 및 공간축에서의 상관특성을 파악해야 한다. 특히 본 연구에서는 공간축에서 강우장의 등방성(isotropy)을 가정하였다. 본 연구에서는 한강유역에서 가용한 우량계 자료를 이용하여 이 값을 각각 30 km 및 3 hours로 결정하였다(유철상과 김경준, 2007).

Table 2. Summary of Parameters to be Estimated

Parameters	Definition
τ_0	time scale
λ_0	length scale
L_1, L_2	domain size
a, b	cell size

3.2 임진강 유역 및 강우 관측망의 단순화

본 연구에서는 임진강 유역의 남한측에서만 우량계 강우가 가용한 경우를 살펴보고자 한다. 즉, 임진강 유역 전체에 공간적으로 균질하게 우량계가 존재하는 경우와 임진강 유역의 남한측에서만 우량계가 존재하는 경우를 비교해보고, 이를 통해 현실적인 결과를 유도해보고자 한다. 즉, 임진강 유역의 전체에 일정한 정도의 우량계 밀도가 확보된 경우를 가정하고, 이러한 수준의 레이더 강우보정 결과를 얻기 위해 필요한 남한측 임진

강 유역의 강우계 밀도를 추정해 보고자 한다.

이러한 결과는 임진강 유역의 형태 그대로는 계산하기는 어렵다. 본 연구에서는 이론적 배경에서 살펴본 것과 같이 사각형 형태의 유역과 공간적으로 균일한 우량계 분포를 가정하기로 한다. 임진강 유역의 강우 관측망을 단순화하기 위하여 유역의 형태를 가장 잘 나타낼 수 있는 직사각형으로 가정하였다(Fig. 7). Fig. 7에서 가정된 직사각형은 모두 동일한 형상계수(shape factor)를 가지고 있으며, 임진강 유역 전체를 포괄하는 직사각형의 중횡비를 다른 직사각형에 일괄적으로 적용하였다. 즉, 임진강 유역 전체를 덮는 형상계수는 대략 0.59로서 Domain 1과 Domain 2 모두 이와 동일한 형상계수를 가진다. 여기서, Domain 1의 지배영역 크기는 70 km×118 km로써 임진강 유역의 면적 8149 km²를 대표하는 직사각형으로 가정하였다. Domain 2는 임진강 유역의 남한측 면적 3024 km²를 대표하는 42 km×72 km로 가정하여 나타내었다.

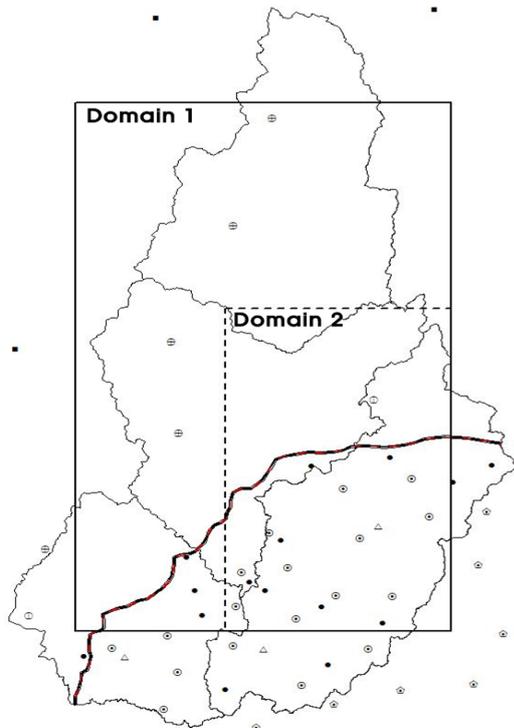


Fig. 7. Simplification of the Lmjn River Basin

3.3 임진강 유역 레이더 강우의 편의 보정을 위한 남한측의 우량계 밀도 결정

먼저, 다양한 크기의 유역면적 및 레이더 격자 크기에 대한 무차원 오차분산의 거동을 파악하였다. Fig. 8은 대상지역의 크기에 따른 오차분산의 영향을 나타낸 것으로 관측격자의 크기로 1 km x 1 km를 적용한 경우이다. 그림에서 살펴볼 수 있듯이 우량계 밀도가 일

정할 경우에는 대상지역의 면적이 클수록 무차원 오차분산이 작게 나타나는데, 이는 가용한 우량계의 수가 대상지역의 면적에 비례하므로 당연한 결과가 된다. 또한 우량계 밀도가 클수록 무차원 오차분산은 작아지게 된다. Fig. 9는 관측격자의 크기에 따른 무차원 오차분산의 영향을 살펴본 것이다. 대상면적의 크기는 80 km x 80 km를 고려하였다. 동일한 우량계 밀도에 대해 우량계와 비교되는 레이더의 격자가 클수록 무차원 오차분산은 커짐을 알 수 있다. 이는 비교되는 두 자료사이에 불확실성이 커지기 때문이다.

다음으로 임진강 전체 유역(Domain 1) 및 남한측 유역(Domain 2)에 대해 우량계 밀도에 따른 무차원 오차분산의 변화를 계산하였다(Fig. 10). Fig. 10에 나타난 결과는 가용한 우량계 설치지역의 규모를 고려할 경우의 무차원 오차분산의 거동으로 보정의 대상이 되는 강우장의 크기는 임진강 유역 전체로 동일하다. 관측격자의 크기는 현재 운영 중인 강화도 레이더와 같이 1 km×1 km로 한 경우이다. 그림에서 살펴볼 수 있는 것과 같이 무차원 오차분산은 우량계 밀도가 커짐에 따라 작아지게 되고, 또한 동일한 우량계 밀도에 대해서는 대상 지역의 면적이 클수록 작아지게 된다. 만일 동일한 무차원 오차분산의 수준을 고려한다고 하면, 대상 지역의 면적이 작을수록 높은 우량계 밀도를 요구하게 된다.

예를 들어, 무차원 오차분산을 2% 정도로 맞춘다고 하면, 임진강 유역 전체를 고려할 경우 약 1/350 km²의 우량계 밀도를 요구하게 되나, 남한 측에서만 우량계 설치가 가능할 경우 약 1/120 km² 정도의 우량계 밀도를 요구하게 되는 결과가 된다. 유역면적을 고려해 보면, 임진강 유역 전체에 대해 우량계의 설치가 가능할 경우 약 23개 정도의 우량계가 필요하다는 결론이 되며, 반대로 남한측에만 우량계의 설치가 가능할 경우에도 유사한 우량계 수인 25개 정도가 필요하다는 결론이 된다. 무차원 오차분산 4%에 대해서 살펴보면, 임진강 유역 전체에 대해서는 약 1/1400 km² 정도를 남한측만 가용할 경우에는 1/500 km² 정도의 우량계 밀도를 요구하게 되고, 이는 각각 6개 및 6개의 우량계가 필요하다는 결론이 된다. 즉, 편의 보정의 대상면적이 동일할 경우 필요한 우량계의 수는 우량계가 설치 가능한 면적에 관계없이 유사하게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 임진강 유역에서와 같이 지역적으로 편중되어 있는 우량계 강우를 이용하여 대상 유역 전체에 대한 편의를 보정하는 경우에 대해 살펴보았다. 즉,

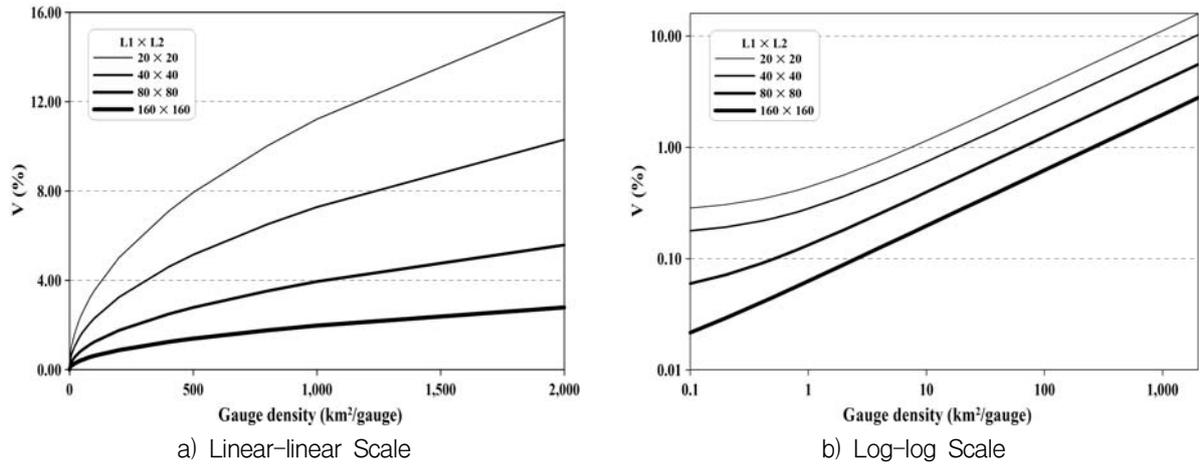


Fig. 8. Dimensionless Error Variance Depending on the Domain Size

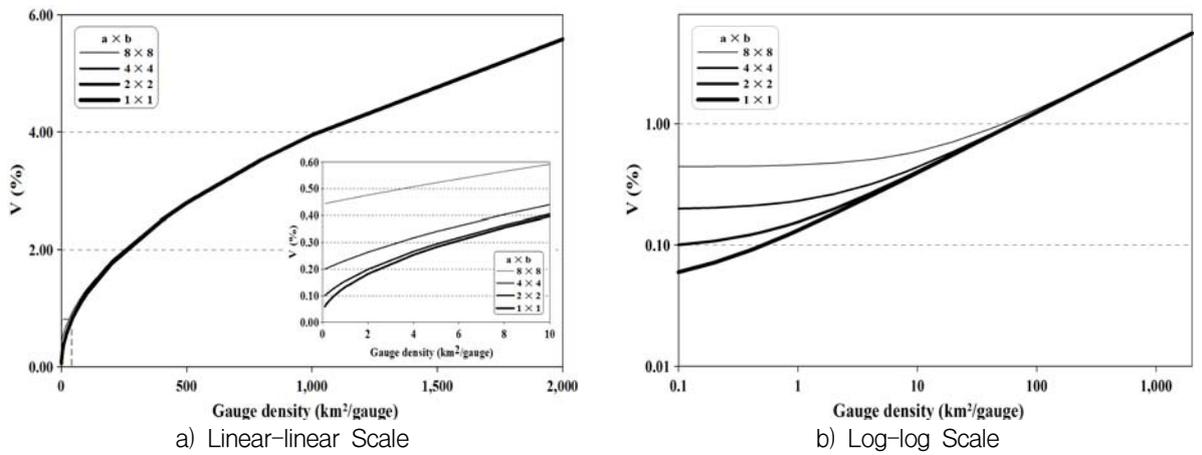


Fig. 9. Dimensionless Error Variance Depending on the Size of Radar Bin

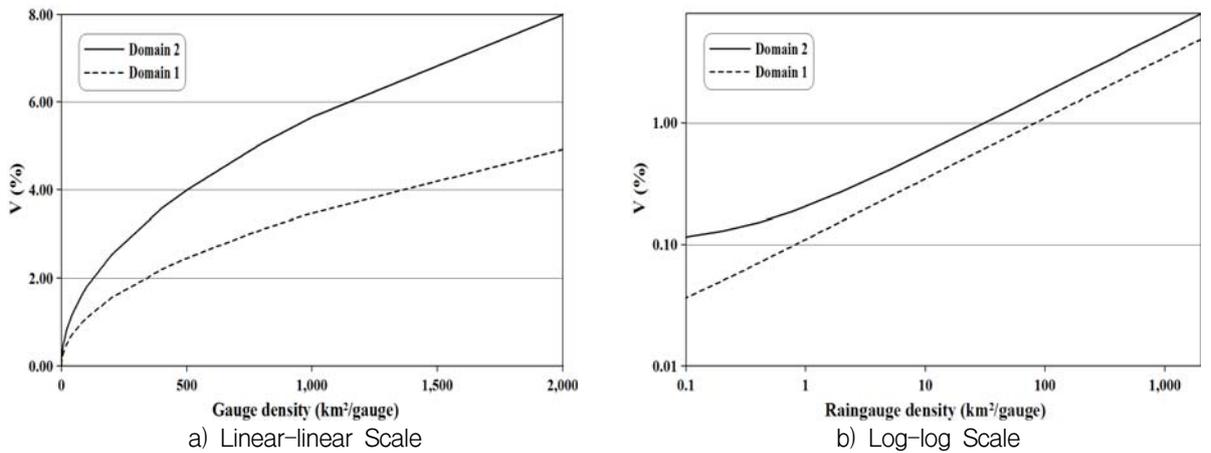


Fig. 10. Dimensionless Error Variance Depending on the Rain Gauge Density of the Lmjn River Basin

남한측에 가용한 우량계를 이용하여 임진강 유역 전체에 대해 면적평균강우의 편의를 보정하는 경우 그 오차가 어느 정도인지를 살펴보았으며, 아울러 동일한 규모의 오차 정도를 확보한다는 전제하에 임진강 유역 전체에 필요한 우량계 수를 파악하였다. 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 관측오차의 분산을 면적평균강우의 분산으로 나눈 무차원 오차분산은 우량계 밀도가 커짐에 따라 작아지게 되고, 또한 동일한 우량계 밀도에 대해서는 대상 지역의 면적이 클수록 작아지게 된다. 만일 동일한 무차원 오차분산의 수준을 고려한다고 하면, 대상 지역의 면적이 작을수록 높은 우량계 밀도를 요구하게

된다.

둘째, 무차원 오차분산을 2% 정도로 맞춘다고 하면, 임진강 유역 전체를 고려할 경우 약 1/350 km²의 우량계 밀도를 요구하게 되나, 남한 측에서만 우량계 설치 가능할 경우 약 1/120 km² 정도의 우량계 밀도를 요구하게 되는 결과가 된다. 유역면적을 고려해 보면, 임진강 유역 전체에 대해 우량계의 설치가 가능할 경우 약 23 개 정도의 우량계가 필요하고, 반대로 남한측에만 우량계의 설치가 가능할 경우에도 유사한 우량계 수인 25개 정도가 필요하게 된다.

셋째, 현재 임진강 유역의 남한측 유역에 가용한 우량계 수는 AWS 포함하여 36개이며 우량계 밀도는 1/84 km²로 무차원 오차분산의 규모는 1.65% 정도가 된다. 동일한 규모의 오차를 임진강 전체 유역에 적용할 경우 필요한 우량계 수는 동일한 36개로 파악된다.

이상과 같은 본 연구의 결과는 해양에서와 같이 우량계를 설치할 수 없는 경우에 대한 편의 보정에도 효율적으로 적용될 수 있다, 즉, 가능한 지역에 대해 우량계를 설치하고 이를 이용하여 편의보정을 수행할 경우에 대해 평가할 수 있으며, 또한 가능한 오차범위를 미리 설정하고 이를 만족시키는 가능한 지역에 우량계 망을 구축할 수도 있다. 이는, 향후, 바다와 인접한 도시 지역의 홍수예경보를 위해 레이더 강우를 활용할 경우 해결해야 하는 첫 번째 문제이기도 하다.

본 연구의 결과는 레이더 강우가 가질 수 있는 다양한 문제점을 충분히 고려한 결과는 아니다. 즉, 레이더 강우는 공간적으로 등방향성을 가지고 아울러 시-공간적 공분산 구조가 동일하다는 전제하의 결과이다. 기본적으로 레이더 강우의 특성이 우량계 설치 가능지역이나 그렇지 못한 지역이 동일하다는 전제하에서의 결과이므로, 국부적으로 강우특성이 심하게 변할 수 있는 경우에는 더 큰 오차를 유발할 수 있기도 하다. 그러한 경우는 물론 본 연구의 범위를 벗어나는 것이 되며, 아울러 본 연구에서 다루는 연구의 범위를 넘는 내용이 된다. 이상과 같이 본 연구의 결과는 여러 가지 가정을 전제한 후 유도한 것이므로, 보다 현실적인 결과로 발전시키기 위해서는 실제자료의 분석을 통한 보다 종합적인 검증이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신 F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

건설교통부 (1997). **임진강유역 종합수문관측망 타당성조사 및 기본계획수립**, p. 316.

건설교통부 (2001). **수자원장기종합기본계획**, p. 697.

건설교통부 (2005). **강우레이더에 의한 돌발홍수예보 시스템 개발 1차년도**, p. 989.

건설교통부 (2006a). **한강홍수예보: 임진강, 안성천 포함**, p. 293.

건설교통부 (2006b). **수자원장기종합기본계획**, p. 892.

기상청 (2007). **국가기상관측망 최적화를 위한 조정·운영에 관한 연구**, p. 151.

내무부 (1997). **재해연보 1996**, p. 939.

유철상 (1997). “관측오차문제에 대한 다차원 강우모형의 적용.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 441-447.

유철상, 김경준 (2007). “강우 레이더와 지상 우량계의 통합관측효과.” **한국수자원학회논문집**, 제40권, 제11호, pp. 841-849.

유철상, 정광식 (2001). “면적 평균 강우량의 추정 및 추정오차.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제4호, pp. 317-326.

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.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제5호, pp. 545-558.

정성화 (2005). **레이더 강우강도의 개성과 면적 강우량의 실시간 추정**, 석사학위 논문, 경북대학교, p. 49

최규현, 한건연, 김광섭, 이창희 (2006). “레이더 정량강우와 연계한 홍수유출 및 범람해석 시스템 확립: II. Cokriging을 이용한 2차원 정량강우 산정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제4호, pp. 335-346.

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.

Azimi-Zonooz, A., Krajewski, W.F., and Bowles, D.S.(1989). “Nonlinear estimation of rainfall using radar and raingage data.” *Journal of Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 3, pp. 51-67.

Chiu, L.S., North, G.R., McConnel, A. and Short,

- D.A. (1990). "Rain estimation from satellite: effects of finite field of view." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, pp. 2177-2186.
- Creutin, J.D., Andrieu, H., 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.
- Damant, C., Austin, G.L., Bellon, A. and Broughton, R.S. (1983). "Errors in the Thissen technique for estimating areal rain amounts using weather radar data." *Journal of Hydrology*, Vol. 62, pp. 81-94
- Ha, E., and North, G.R.(1995), "Model studies of the beam-filling error for rain-rate retrieval with microwave radiometers." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 12, pp. 268-281
- 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
- Kummerow, C. (1998). "Beam filling errors in passive microwave rainfall retrievals." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 37, pp. 356-370.
- Lafont, D. and Guillemet, B. (2004). "Subpixel fractional cloud cover and inhomogeneity effects on microwave beam-filling error." *Atmospheric Research*, Vol. 72, pp. 149-168.
- 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 rainrate." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 11, No. 4, pp. 1035-1041.
- 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.
- Short, D.A., and North, G.R.(1990). "The Beam filling error in ESMR-5 observations of GATE rainfall." *Journal of Geophysics*, Vol. 95, pp. 2187-2194.
- Steiner, M., Smith, J.A., Burges, S.J., Alonso, C.V., and Darden, R.W. (1999). "Effect of bias adjustment and rain gauge data quality control on radar rainfall estimation." *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 8, pp. 2487-2503.
- Valdes, J.B., Nakamoto, S., Shen, S.S.P., and North, G.R. (1990). "Estimation of multi-dimensional precipitation parameters by areal estimates of oceanic rainfall." *Journal of Geophysics*, Vol. 95, No. D3, pp. 2101-2111.
- 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.
- Yoo, C. (2000). "On the sampling errors from rain gauges and microwave attenuation measurements." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 14, 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, pp. 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. and Ha, E. (2001). "Multi-dimensional precipitation models and their application to the Ground-Truth problem: Multiple rain gauge case." *Water Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 51-58.
- Yoo, C., Ha, E., and Shin, S.C. (2002). "Model vs design sensitivity to the ground-truth problem of rainfall observation." *Advances in Water Resources*, Vol. 25, No. 6, pp. 651-661.
- Yoo, C., Valdes, J.B., and North, G.R. (1996). "Stochastic modeling of multi-dimensional precipitation fields considering spectral structures." *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 7, pp. 2175-2187.

(논문번호:08-93/접수:2008.08.25/심사완료:2009.05.25)