

부분적 레이더 정보에 따른 면적평균강우의 관측오차

Sampling Error of Areal Average Rainfall due to Radar Partial Coverage

유철상* / 하은호** / 김병수*** / 김경준**** / 최정호*****

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

Abstract

This study estimated the error involved in the areal average rainfall derived from incomplete radar information due to radar partial coverage of a basin or sub-basin. This study considers the Han-River Basin as an application example for the rainfall observation using the Ganghwa rain radar. Among the total of 20 mid-sized sub-basins of the Han-River Basin evaluated in this study, only five sub-basins are fully covered by the radar and three are totally uncovered. Remaining 12 sub-basins are partially covered by the radar to result in incomplete radar information available. When only partial radar information is available, the sampling error decreases proportional to the size of the radar coverage, which also varies depending on the number of clusters. Conditioned that the total area coverage remains the same, the sampling error decreases as the number of clusters increases. This study estimated the sampling error of the areal average rainfall of partially-covered mid-sized sub-basins of the Han-River Basin, and the results show that the sampling error could be at least several % to maximum tens % depending on the relative coverage area.

keywords : Radar Rainfall, Partial Coverage, Areal Average Rainfall, Sampling Error

요 지

본 연구에서는 차폐 등을 이유로 레이더 강우가 대상 유역 또는 소유역을 완전하게 포괄하지 못하는 경우에 대해 가용한 레이더 강우를 이용하여 면적평균강우를 산정하는 경우에 포함될 수 있는 오차의 규모를 추정하였다. 본 연구는 한강 유역의 강우관측에 강화 레이더를 이용하는 경우를 적용 예로 살펴보았다. 한강 유역을 수자원단위지도의 중권역에 해당하는 총 20개의 소유역으로 나누어 검토할 경우, 총 소유역 중 강화 레이더로 완전히 관측되는 경우는 총 5개에 불과하며, 전혀 관측되지 않는 소유역도 3개가 있다. 나머지 12개의 소유역은 부분적인 레이더 정보만이 가

* 고려대학교 건축·사회환경공학과 교수

Professor, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, 136-701, Korea
(e-mail: envchul@korea.ac.kr)

** 연세대학교 정보통계학과 교수

Professor, Department of Information and Statistics, College of Liberal Arts and Sciences, Yonsei University, Wonju, Kangwon-Do 222-701, Korea
(e-mail: statha@dragon.yonsei.ac.kr)

*** 도화종합기술공사 수자원 1부 사원

Water Resources dept, Dohwa Consulting Engineers Co., LTD. Seoul, 135-080, Korea
(e-mail: keslo99@dohwa.co.kr)

**** 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사수료

Graduate Research Assistant, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, 136-701, Korea
(e-mail: guitar77@korea.ac.kr)

***** 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사수료

Graduate Research Assistant, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, 136-701, Korea
(e-mail: justinchoi@korea.ac.kr)

용한 경우가 된다. 부분적인 레이더 정보만이 존재하는 경우의 관측오차는 기본적으로 관측되는 부분의 면적에 반비례하여 작아지지만, 동일한 면적일 경우에는 관측되는 면적이 몇 개로 쪼개져 있느냐에 따라 오차의 규모가 달라지게 된다. 동일한 관측면적일 경우에는 많이 쪼개져 있을수록 관측오차가 작아지게 된다. 본 연구의 대상유역인 한강유역의 경우에도 강화 레이더 강우자료를 이용하여 면적평균강우를 추정한다면 그 오차는 최소 수 %에서 최대 수십 %까지 범위인 것으로 파악되었다.

핵심용어 : 레이더 강우, 부분적 관측, 면적평균강우, 관측오차

1. 서론

강우의 시-공간적 변동성은 다른 어떤 수문 또는 기상인자들의 경우보다 크다. 아울러 강우는 강우-무강우의 불연속성을 나타내는 간헐성(intermittency)의 특성도 함께 가지고 있어 그 관측뿐만 아니라 정량화 자체가 매우 까다로운 것으로 알려져 있다(유철상 등, 2006).

따라서 어떤 지역의 강우 특성을 파악하기 위해서는 매우 조밀한 관측망이 갖추어져야 한다. 그러나 지상관측망의 경우 매우 조밀한 관측망을 유지하기 힘들고, 아울러 접근성의 문제로 인해 지역적으로 관측망의 밀도 차이가 크게 나타나는 문제도 있다(건설교통부, 2002; 한국수자원공사, 2004). 특히 강우의 변동성이 더욱 커지는 산악지역에서 관측망의 밀도가 오히려 작아지는 문제를 발견할 수 있다. 따라서 이러한 문제점을 극복하는데 레이더는 큰 장점을 가진다.

그러나 현재 기상 또는 수문레이더가 제공하는 강우자료는 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). 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 강우와

의 차이를 보정하는 문제(유철상 등, 2007; North et al., 1994; Ha et al., 2002; Yoo, 2002; Yoo et al., 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. 그러나 경우에 따라서는 레이더의 차폐문제가 레이더 강우 활용의 문제점으로 부각되기도 한다. 즉, 산지나 고층건물, 또는 기타 이유로 해서 특정 범위에 대한 레이더 강우의 정보가 제공되지 못하는 상황이 있을 수 있다.

레이더의 위치 선정과 관련하여 일반적으로 적용되는 규칙은 존재하지 않는다. 그러나 레이더의 관측 효율을 극대화 할 수 있는 장소를 선정하게 된다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 첫째, 레이더를 통해 가능한 원거리의 정보를 얻을 수 있어야 하며, 둘째로는 가능한 최저 고도각에서 레이더의 안테나가 작동되어야 한다. 결국 레이더 설치의 최적 위치란 이 두 가지 조건을 최대한 만족시킬 수 있는 위치를 의미한다. 추가로 수평 시계 확보, 상존에코(permanent echo), 낙뢰 발생 빈도, 인프라 설비의 확충 등을 다양하게 고려하여 레이더의 위치를 결정하게 된다(건설교통부, 1997). 그러나 이렇게 선정된 레이더의 위치이기는 하지만, 어쩔 수 없는 지형적 영향 등으로 인해 레이더 관측이 제한되는 빔 차폐 효과가 발생할 수 있다. 이러한 빔 차폐 효과를 제거하기 위한 방안으로 레이더 고도각을 증가시킬 수도 있으나 이 방법은 빔의 높이를 증가시키기 때문에 오히려 오차가 커지는 문제를 야기할 수 있다. 기본적으로 차폐의 영역은 레이더 주변의 지형으로부터 결정되고 부분적으로 차폐되는 영역은 차폐에 대한 보정을 실시하여야 한다(Joss and Waldvogel, 1990; Andrieu et al., 1997; Gabella and Perona, 1998; Seed et al., 2002; Bech et al., 2003).

본 연구의 목적은 차폐 등을 이유로 레이더가 대상 유역 또는 소유역을 완전하게 포괄하지 못하는 경우에 대한 레이더 정보의 유용성 또는 불확실성을 평가하는데 있다. 즉, 대상 유역의 일부에 대해 가용한 레이더 강우를 이용하여 면적평균강우를 산정하는 경우에 포함

될 수 있는 오차의 규모를 추정해 보는 것이 본 연구의 목적이다. 기본적으로 어떤 유역 또는 소유역에 레이더 강우가 조금이라도 가용한 경우에는 유역 내 존재하는 몇몇 강우계의 점 관측치에 의존하여 면적평균강우를 산정하는 경우에 비해 그 오차의 규모가 현저히 작을 것으로 판단된다. 그러나 그 오차의 규모가 어떤 특성을 보이게 될 지는 아직 검토된 바 없는 문제이다.

본 연구에서는 이와 같은 관측오차의 규모를 면적평균강우의 표준편차에 대한 상대적 규모로 표현하고자 한다. 이렇게 함으로써 강우사상별로 달라질 수 있는 강우의 특성차이가 배제될 수 있고, 아울러 레이더 강우가 가질 수 있는 편위 또는 공간상관구조의 차이에서 발생하는 영향도 배제할 수 있기 때문이다. 가용한 레이더 정보는 유역 내 무작위로 위치한 것이 아니라 대략 큰 균집을 이루고 있는 상황이므로 이러한 특성도 반영될 수 있도록 하였다.

본 연구는 한강 유역의 강우관측에 강화 레이더를 이용하는 경우를 적용 예로 살펴보았다. 강화 레이더는 근본적으로 임진강 유역의 홍수예警보를 위해 설치되었으나, 현실적인 여러 문제들로 인해 그 이용이 제한되어 왔던 것이 사실이다. 그러나 강화 레이더의 관측영역이 한강유역을 포함하고 있으므로 그 역할 확대가 가능할 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 강화 레이더를 한강 유역에 적용할 경우 특히 차폐문제로 인해 소유역별로 완전하지 못한 레이더 강우가 제공되는 경우 발생할 수 있는 관측오차문제를 검토하였다.

2. 레이더 강우를 이용한 면적평균강우의 관측오차

규모가 $L_1 \times L_2$ 인 지역 내 임의의 한 지점 $r = (x, y)$ 에서 시간이 t 일 때의 순간적인 강우장도(instantaneous rain-rate)를 나타내는 무작위 강우장을 $\psi(r, t)$ 라고 하자. 이 때 이 지역의 면적평균강우는 다음과 같이 정의된다.

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

Eq. (1)에서 적분구간은 각각 $-L_1/2 < x < L_1/2$, $-L_2/2 < y < L_2/2$ 로서 직사각형 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, 면적평균강우 Ψ 의 분산은 진동수 f 파장수 ν_x 및

ν_y 의 영역에서 다음 식과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

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

여기서, σ^2 은 $\psi(r, t)$ 의 분산을 의미하고, $S_T(\nu_x, \nu_y)$ 는 Eq. (3)과 같이 정의된다.

$$S_T(\nu_x, \nu_y) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\nu_x, \nu_y, f) df \quad (3)$$

또한, $D^2(\nu_x, \nu_y) = G^2(L_1 \nu_x) G^2(L_2 \nu_y)$ 이며, 이때 $G(x) = \sin(\pi x) / \pi x$ 이다. 특히 $D^2(\nu_x, \nu_y)$ 은 uni-modal 의 2차원 곡선이 된다.

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

$$\Psi_R^j = \frac{1}{ab} \int_{y_j - b/2}^{y_j + b/2} \int_{x_j - a/2}^{x_j + a/2} \psi(x, y, t) dx dy \quad (4)$$

여기서, $r_j = (x_j, y_j)$ 은 격자의 중심점으로서 레이더 관측의 중심점을 나타낸다. 임의의 레이더 격자위치를 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. 즉, $D' < D$ 이다.

$r_j = (x_j, y_j) \in D'$ 을 만족할 때, 어떤 특정한 지점에 격자가 위치할 확률은 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$P(r_j) = \frac{1}{(L_1 - a)(L_2 - b)} \quad (5)$$

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

$$\Psi_R = \frac{1}{N} \frac{1}{ab} \sum_{n=1}^N \int_{y_j - b/2}^{y_j + b/2} \int_{x_j - a/2}^{x_j + a/2} \psi(x, y, t) dx dy \quad (6)$$

참고로, 위와 같은 정의는 적분영역 D 에 대한 면적평균강우를 나타낸다. 각 레이더 관측값이, 즉 격자가, 영역 D 상에 무작위로 위치하고 있으므로, Thiessen

방법을 이용하여 추정된 면적평균강우는 Eq. (6)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_1^2 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_1^2 = E[\langle \epsilon_j^2 \rangle] \quad (7)$$

$$= \sigma^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(\nu_x, \nu_y) S_T(\nu_x, \nu_y) d\nu_x d\nu_y$$

여기서 σ^2 는 $\psi(x, y, t)$ 의 분산을 나타낸다. 또한, 관측의 특성을 나타내는 필터 $H(\nu_x, \nu_y)$ 는 Eq. (8)과 같이 유도된다.

그러나 위 Eq. (7)을 바로 적용하는 것은 쉬운 일이 아니다. 이는 현실적으로 시공간적으로 연속인 강우장의 분산 σ^2 을 추정하기 어렵기 때문이다. 이러한 문제는 Eq. (2)에서와 같이 주어진 영역에 주어진 시간동안 내린 강우의 체적을 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. (7)을 Eq. (2)로 나누어 주면 분모, 분자에서 추정하기 어려운 시공간적으로 연속인 강우장의 분산 σ^2 이 약분되고 계산 가능한 부분만 남게 된다. 이와 같이 관

측오차의 분산에 대한 기대값을 면적평균강우의 분산으로 나눈 값을 무차원 오차 분산(dimensionless error variance)이라고 정의한다. 즉,

$$V_1^2 = \frac{E_1^2}{\sigma_\Psi^2} \quad (9)$$

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. (6)과 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.

$$E_N^2 = E[\langle \epsilon^2 \rangle] \quad (10)$$

$$= \sigma^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(\nu_x, \nu_y) S_T(\nu_x, \nu_y) d\nu_x d\nu_y$$

여기서, 필터 $H(\nu_x, \nu_y)$ 는 다음 Eq. (11)과 같이 유도된다.

Eq. (11)에서 $N=1$ 인 경우에 Eq. (11)은 Eq. (8)과 같게 된다. 마지막으로, 이 경우의 무차원 오차 분산은 다음과 같이 정의된다.

$$V_N^2 = \frac{E_N^2}{\sigma_\Psi^2} \quad (12)$$

3. 적용 유역, 자료 및 강우장의 정량화

3.1 한강 유역 및 소유역 분할

한강 유역은 북위 $36^\circ 30' \sim 38^\circ 55'$, 동경 $126^\circ 24' \sim 129^\circ 02'$ 에 걸쳐 한반도의 중앙부에 위치하고 있다.

$$H(\nu_x, \nu_y) = G^2(L_1\nu_x) G^2(L_2\nu_y) + G^2(a\nu_x) G^2(b\nu_y) \quad (8)$$

$$- 2G(a\nu_x) G(b\nu_y) G(L_1\nu_x) G(L_2\nu_y) G[(L_1 - a)\nu_x] G[(L_2 - b)\nu_y]$$

$$H(\nu_x, \nu_y) = G^2(L_1\nu_x) G^2(L_2\nu_y) + \frac{1}{N} G^2(a\nu_x) G^2(b\nu_y) \quad (11)$$

$$- 2G(a\nu_x) G(b\nu_y) G(L_1\nu_x) G(L_2\nu_y) G((L_1 - a)\nu_x) G((L_2 - b)\nu_y)$$

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

본 유역은 전국국토면적 99,237 km²의 26%에 해당되며 남한강이 12,929 km²(유로연장 375 km)이다. 북한강은 DMZ(DeMilitarized Zone) 이북 3,114 km²를 포함하여 10,698 km²(유로연장 317.5 km)이며, 한강 본류는 팔당댐에서 하구까지 2,592 km²의 면적을 차지하고 있다. 한강유역 지형을 구분해 보면 남한강과 북한강이 합류하는 팔당댐에서 한강과 섬강의 합류점까지 약 160.7 km 구간은 표고가 200~700 m 정도로서 약 0.1~0.2 m/km의 하천구배를 보이고 있다. 본 유역의 상류부는 고산지대로 V자형을 이루는 협곡으로 되어 있으며 제천, 충주, 여주, 이천 지역은 넓은 준평원 지대를 이루고 있다. 이 지역의 평균하폭은 약 600 m, 하천구배는 0.8~4.3 m/km로서 상류로 올라 갈수록 급격히 증가된다.

한강 유역의 위치 및 홍수 유출 해석을 위한 소유역 구분은 Fig. 1과 같다. Fig. 1의 한강 유역은 국가 차원의 수자원 개발 계획 및 관리를 보다 효율적으로 추진하기 위하여 구축한 유역 단위의 표준 지도라고 할 수 있는 수자원단위지도도를 참고하여 나타낸 그림이다(국가수자원관리정보시스템 홈페이지, www.wamis.go.kr). 21개의 대권역 중 하나인 한강 유역은 수자원단위지도 상에서 20개의 중권역 또는 198개의 표준유역으로 이루어져 있는데, 본 연구에서는 20개의 중권역을 고려하였다. 한강 유역 중 가장 큰 중권역은 20개의 표준유역으로 구성된 충주댐 유역으로서 2483.8 km²의 면적이고, 가장 작은 중권역은 1개의 표준유역으로 이루어진 팔당댐 유역이며 면적은 43.9 km²이다.

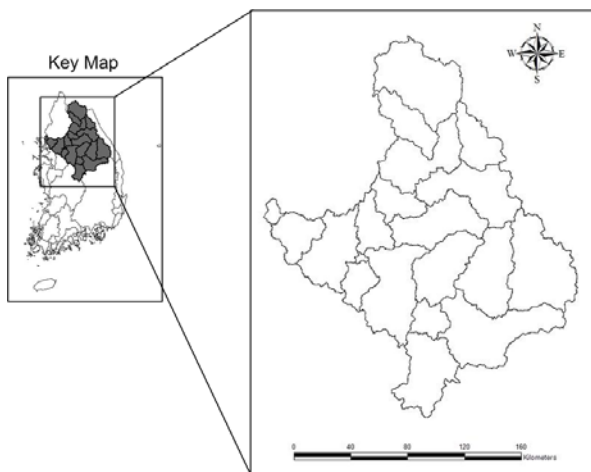


Fig. 1. Han-River Basin and Its Sub-basin Division

3.2 강우장의 특성화

다양한 레이더의 포괄정도를 고려하여 관측오차를 추정하기 위해서는 관측의 특성뿐만 아니라 강우장에 대한 정보가 필수적이다. 강우장에 대한 정보는 궁극적

으로 강우장의 시-공간적 이차원 통계특성으로 정량화되며, 본 연구에서는 강우장의 시-공간적 스펙트럼이 이용된다. 강우장의 시-공간적 스펙트럼은 잘 짜여진 관측의 경우, 예를 들어 밀도 있는 격자형태의 강우관측이 주어진다면 이를 분석하여 추정할 수 있다. 그러나 현실적으로 이런 자료는 가용하지 않다. 본 연구의 대상유역에도 이런 자료는 가용하지 않다. 따라서, 간접적인 방법으로 강우장의 스펙트럼을 추정하여야 한다. 이런 목적으로 다차원 강우모형이 자주 이용된다(Waymire et al., 1984; North and Nakamoto, 1989; Valdes et al., 1990; Yoo et al., 1996).

본 연구에서는 가용한 다양한 다차원 강우모형 중 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) 등 다양하게 살펴볼 수 있다.

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

$$\tau_0 \frac{\partial \psi}{\partial t} - \lambda_0^2 \nabla^2 \psi + \psi = F \quad (13)$$

Eq. (13)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.

$$S(\nu_x, \nu_y, f) = \frac{\alpha}{4\pi^2 \tau_0^2 f^2 + (1 + 4\pi^2 \lambda_0^2 \nu^2)^2} \quad (14)$$

Eq. (14)에서, α 는 정규화 계수(normalization factor)로서 다음 조건을 만족시키는 값으로 결정한다.

$$\int \int \int S(\nu, f) d^2 \nu df = 1.0 \quad (15)$$

본 연구에서 결정해야 할 매개변수를 정리하면 Table 1과 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 추정 한 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(김경준과 유철상, 2007).

Table 1. 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

4. 적용결과

4.1 레이더 자료의 특성에 따른 관측오차 변화

본 연구에서는 먼저 레이더 자료의 구조에 따른 관측오차의 변화를 검토하였다. 이 장에서 고려한 레이더의 특성은 전체 coverage 면적, 가용한 격자의 크기 및 수이다. 먼저, 레이더의 관측면적으로 $10 \times 10 \text{ km}^2$, $20 \times 20 \text{ km}^2$, $40 \times 40 \text{ km}^2$, $80 \times 80 \text{ km}^2$ 를 고려하였다. 레이더 관측면적 내 격자의 크기는 최소 $1 \times 1 \text{ km}^2$ 에서부터 관측면적의 크기까지로 다양하게 고려하였다. 그 결과는 Tables 2~5와 같다.

먼저 Tables 2~5에 나타난 결과에서 공통적으로 살펴볼 수 있는 것은 동일한 지배영역에 대해 관측횟수가 증가하게 되면 무차원 오차분산 즉, 관측오차가 작아진다는 것이다. 아울러 관측횟수(N)와 레이더 격자의 크기($a \times b$)를 고정시킨 경우에는 지배영역이 커질수록 관측오차가 커지는 경향을 보인다. 예를 들어 관측횟수 $N=1$ 이고, 레이더 격자의 크기가 $1 \times 1 \text{ km}^2$ 인 경우, 지배영역이 $10 \times 10 \text{ km}^2$ 일 경우의 관측오차는 5.29%이지만, $20 \times 20 \text{ km}^2$ 의 지배영역에서는 10.3%, $40 \times 40 \text{ km}^2$ 에서는 24.5%, 마지막으로 $80 \times 80 \text{ km}^2$ 에서는 232%로 커진다. 물론 이러한 결과의 원인은 지배영역이 커질수록 면적평균강우의 분산 σ_w^2 가 작아지며 아울러 고려되는 지배영역의 크기에 따라 레이더 격자 사이의 평균거

리와 강우장의 공간상관 거리가 상대적으로 변하기 때문이다. 따라서 지배영역의 크기가 아주 큰 경우 고려되는 레이더 격자의 개수가 매우 작으면 관측오차는 수백 %까지 증가하게 된다.

Figs. 2~3은 Tables 2~5의 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 먼저, Fig. 2는 지배영역의 크기별로 관측횟수에 따른 관측오차의 변화를 나타낸 그림이다. 대체로 같은 지배영역에서 관측횟수가 증가하면 관측오차는 감소한다. 그러나 관측횟수가 적을 경우에는 레이더 격자의 크기가 클수록 관측오차가 작게 나타나지만 관측횟수가 증가하게 되면 관측오차의 감소폭이 작아질 뿐만 아니라 일정하게 수렴하는 경향을 나타낸다. 이렇게 관측오차의 감소폭이 둔화되거나 수렴하는 경향은 선택되는 레이더 격자들이 서로 중복되기 때문이다. 즉, 주어진 지배영역에서 레이더 격자의 크기가 커지거나 관측횟수가 증가할수록 중복되는 격자의 수가 급격히 늘어나게 된다. 좀 더 자세히 살펴보면 Fig. 2에서와 같이 $[N \times (a \times b)] > [L_1 \times L_2]$ 을 만족하는 지점부터는 레이더 격자의 중복이 시작되어 관측오차의 감소폭이 급격히 둔화되는 것으로 나타났다. 즉, 관측횟수와 레이더 격자 면적과의 곱이 지배영역의 크기보다 큰 경우에 중복이 발생하며 관측오차의 값이 수렴하는 현상이 나타나게 된다. 이후로는 관측횟수가 증가해도 관측오차의 규모는 크게 변하지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 3은 레이더 격자의 크기 변화에 따른 관측오차의 변화를 나타낸 것으로, y 축을 대수축으로 나타내어 관측오차의 변동성을 보다 쉽게 파악할 수 있도록 하였다. 대체적으로 레이더 격자의 크기가 커질수록 관측오차가 작아지지만 Fig. 2에서처럼 고려되는 격자의 중복이 시작되면 오히려 관측오차가 증가하게 되며, 정점을 지나 다시 감소하는 경향을 나타냈다. 레이더 격자의 크기가 $1 \times 1 \text{ km}^2$ 이고 $N=1$ 일 경우 지배영역이 커질수록 관측오차가 커지는 경향은 Fig. 2와 동일하다.

관측된 격자가 서로 중복되는 문제는 본 연구에서 격자가 대상 면적 내 무작위로 분포되어 있다고 가정했기 때문이다. 이러한 가정은 이 문제를 이론적으로 해석하는데 도움이 되지만 고려되는 격자의 수가 아주 많은 경우에서 비현실적이 된다. 실제로는 이미 선택된 격자가 추가로 선택되지 않기 때문이다. 따라서 관측오차는 정제되거나 커지지 않고 대체로 지수적으로 감소하게 된다.

4.2 본 연구 대상유역에 대한 적용

강화 레이더는 안테나의 해발고도와 고도각이 각각 125 m, 0.5° 이며 반경은 200 km 이다. Fig 4에 나타낸

Table 2. Square Root of Dimensionless Error Variance V at $L_1 \times L_2 = 10 \times 10 \text{ km}^2$

N a(=b)	$N = 1$	$N = 2$	$N = 4$	$N = 8$	$N = 10$	$N = 40$	$N = 100$
1	0.052870	0.037471	0.026618	0.018993	0.017064	0.009083	0.006386
2	0.047784	0.034129	0.024607	0.018052	0.016430	0.010108	0.008283
3	0.042238	0.030595	0.022629	0.017322	0.016052	0.011422	0.010248
4	0.036388	0.026901	0.020579	0.016534	0.015600	0.012381	0.011631
5	0.030346	0.023001	0.018252	0.015335	0.014683	0.012522	0.012044
6	0.024201	0.018828	0.015456	0.013456	0.013020	0.011612	0.011309
7	0.018027	0.014371	0.012137	0.010848	0.010572	0.009695	0.009510
8	0.011894	0.009688	0.008370	0.007625	0.007467	0.006973	0.006870
9	0.005865	0.004866	0.004279	0.003954	0.003885	0.003673	0.003629

Table 3. Square Root of Dimensionless Error Variance V at $L_1 \times L_2 = 20 \times 20 \text{ km}^2$

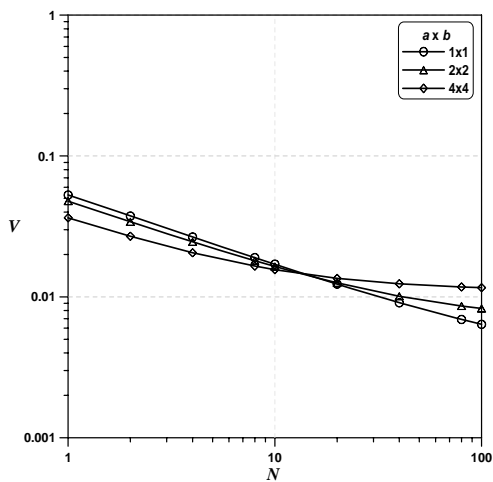
N a(=b)	$N = 1$	$N = 2$	$N = 10$	$N = 40$	$N = 80$	$N = 100$	$N = 400$
1	0.103230	0.073044	0.032845	0.016753	0.012151	0.011002	0.006421
2	0.099289	0.070410	0.032203	0.017376	0.013395	0.012447	0.009023
3	0.094832	0.067514	0.031783	0.018572	0.015299	0.014556	0.012056
4	0.089996	0.064449	0.031578	0.020134	0.017513	0.016941	0.015093
5	0.084869	0.061267	0.031533	0.021840	0.019768	0.019326	0.017938
6	0.079518	0.057996	0.031558	0.023493	0.021862	0.021521	0.020464
7	0.073993	0.054643	0.031536	0.024924	0.023642	0.023378	0.022565
8	0.068335	0.051198	0.031345	0.025985	0.024981	0.024775	0.024147
9	0.062578	0.047640	0.030860	0.026559	0.025772	0.025612	0.025125
10	0.056755	0.043942	0.029978	0.026555	0.025940	0.025816	0.025438
19	0.005248	0.004592	0.003989	0.003866	0.003845	0.003841	0.003828

Table 4. Square Root of Dimensionless Error Variance V at $L_1 \times L_2 = 40 \times 40 \text{ km}^2$

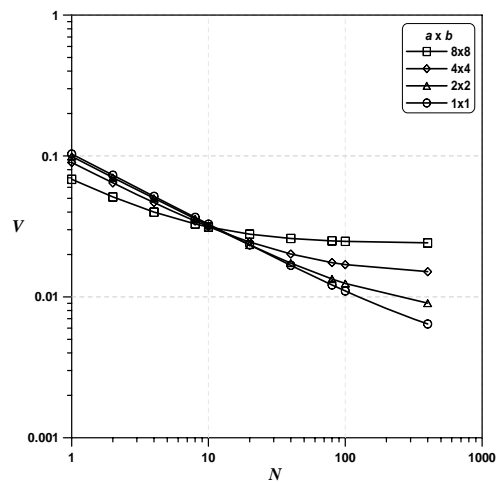
N a(=b)	$N = 1$	$N = 2$	$N = 10$	$N = 40$	$N = 100$	$N = 400$	$N = 1,600$
1	0.244635	0.173010	0.077469	0.038916	0.024840	0.012974	0.007493
2	0.241000	0.170524	0.076655	0.039058	0.025602	0.014847	0.010568
3	0.236572	0.167536	0.075827	0.039560	0.026983	0.017596	0.014317
4	0.231560	0.164198	0.075060	0.040437	0.028903	0.020869	0.018317
5	0.226095	0.160607	0.074399	0.041671	0.031253	0.024432	0.022404
6	0.220273	0.156832	0.073872	0.043225	0.033921	0.028139	0.026497
7	0.214167	0.152925	0.073492	0.045043	0.036802	0.031894	0.030543
8	0.207829	0.148925	0.073260	0.047063	0.039806	0.035627	0.034503
9	0.201308	0.144863	0.073167	0.049219	0.042853	0.039284	0.038340
10	0.194638	0.140760	0.073193	0.051446	0.045875	0.042819	0.042021
20	0.124829	0.098708	0.071218	0.064777	0.063411	0.062716	0.062541
30	0.057765	0.050398	0.043618	0.042225	0.041941	0.041799	0.041763
39	0.005198	0.004784	0.004425	0.004354	0.004340	0.004333	0.004331

Table 5. Square Root of Dimensionless Error Variance V at $L_1 \times L_2 = 80 \times 80 \text{ km}^2$

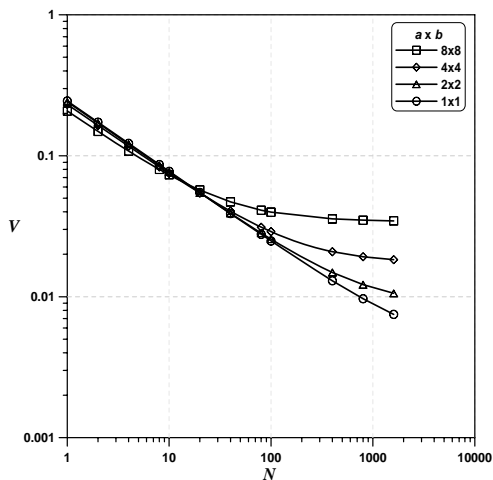
N $a(=b)$	$N = 1$	$N = 10$	$N = 100$	$N = 400$	$N = 1,600$	$N = 3,600$	$N = 6,400$
1	2.324946	0.735278	0.232727	0.116718	0.059062	0.040143	0.030896
2	2.306138	0.729547	0.231592	0.117266	0.061486	0.043978	0.035886
3	2.280941	0.721959	0.230391	0.118611	0.065693	0.050094	0.043328
4	2.251103	0.713095	0.229369	0.120908	0.071561	0.057984	0.052407
5	2.217739	0.703328	0.228694	0.124244	0.078871	0.067186	0.062583
6	2.181647	0.692932	0.228501	0.128650	0.087380	0.077358	0.073528
7	2.143427	0.682122	0.228895	0.134107	0.096864	0.088259	0.085042
8	2.103542	0.671070	0.229955	0.140564	0.107135	0.099722	0.096994
9	2.062369	0.659917	0.231739	0.147943	0.118039	0.111626	0.109292
10	2.020212	0.648784	0.234280	0.156154	0.129455	0.123880	0.121869
20	1.584548	0.555300	0.296841	0.264124	0.255290	0.253620	0.253033
30	1.182020	0.510150	0.382832	0.370252	0.367039	0.366441	0.366232
40	0.838430	0.473999	0.420531	0.415765	0.414565	0.414342	0.414264
50	0.553146	0.388758	0.368305	0.366549	0.366109	0.366027	0.365999
60	0.320216	0.259871	0.253046	0.252469	0.252324	0.252298	0.252288
70	0.135450	0.120953	0.119406	0.119277	0.119244	0.119238	0.119236
79	0.011130	0.010555	0.010496	0.010491	0.010490	0.010490	0.010490



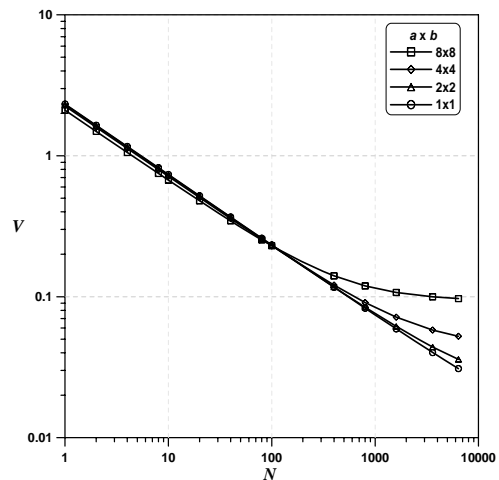
(a) $L_1 \times L_2 = 10 \times 10 \text{ km}^2$



(b) $L_1 \times L_2 = 20 \times 20 \text{ km}^2$



(c) $L_1 \times L_2 = 40 \times 40 \text{ km}^2$



(d) $L_1 \times L_2 = 80 \times 80 \text{ km}^2$

Fig. 2. Square Root of Dimensionless Error Variance V with Respect to N

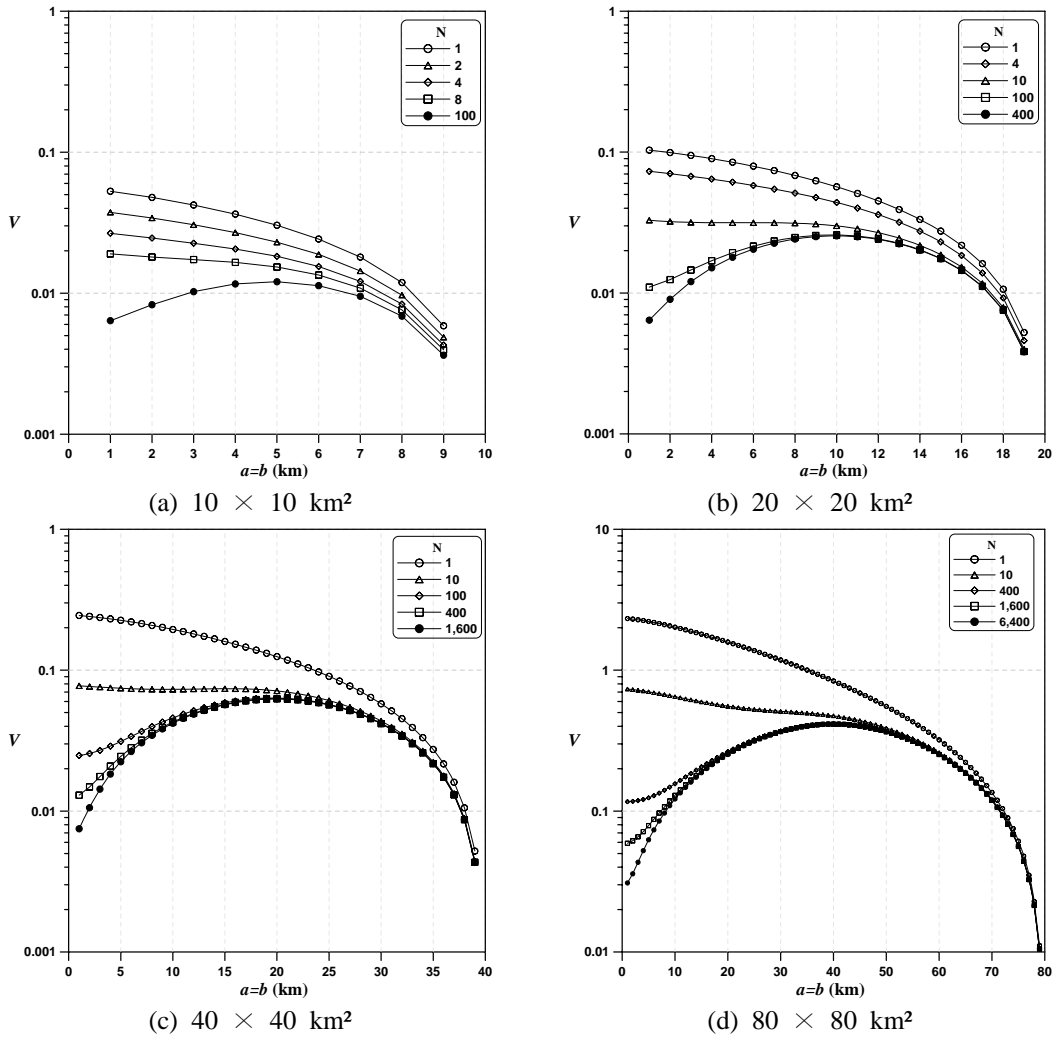


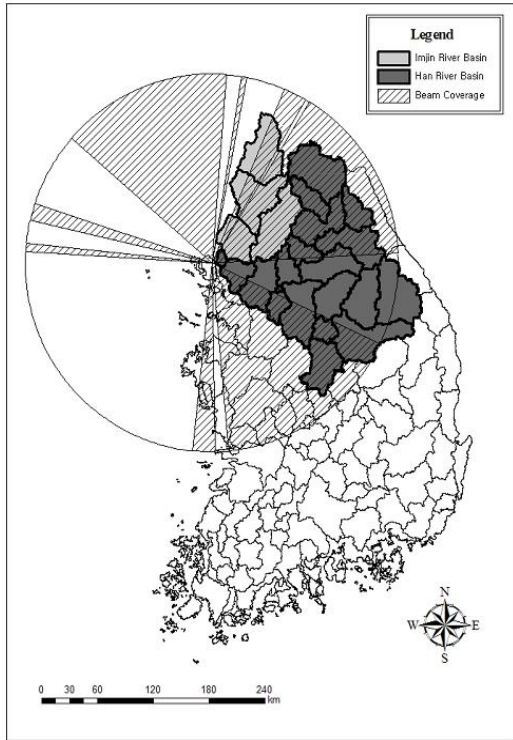
Fig. 3. Square Root of Dimensionless Error Variance V with Respect to the Beam Size

것처럼 고도각이 1.0° 이상이 되면 임진강 유역은 전혀 차폐되지 않고, 0.5° 인 경우에는 일부 차폐된다. 한강 유역의 경우는 강화 레이더의 관측범위 안에 90% 이상이 포함된다. 그러나 차폐를 고려하면 관측되는 영역은 현저히 줄어든다. 본 연구에서는 고도각 0.5° 에 대한 경우로 한정하고자 한다. 또한 임진강 유역의 경우도 고도각 0.5° 에 대하여 일부 차폐되므로 이에 대한 평가도 함께 수행하였다. Fig. 5는 고도각 0.5° 에 대한 한강 및 임진강 유역의 레이더 관측영역과 홍수예경보시스템의 소유역 번호를 함께 도시한 것이다. Fig. 5에서 살펴볼 수 있는 것처럼 차폐지역을 고려하면 한강 및 임진강 유역의 전체면적 $34,415 \text{ km}^2$ 중 강화 레이더로 관측되는 부분의 면적비는 약 62.43%가 된다. 강화 레이더는 본래 목적이 임진강 유역의 강우관측에 있으므로 입지 선정 시 타 유역을 고려하지는 않았으며, 따라서 대부분의 차폐 지역은 강화 레이더의 남서쪽인 서해 대부분 지역과 남동쪽인 한강 유역 일부가 포함되게 된 것이다.

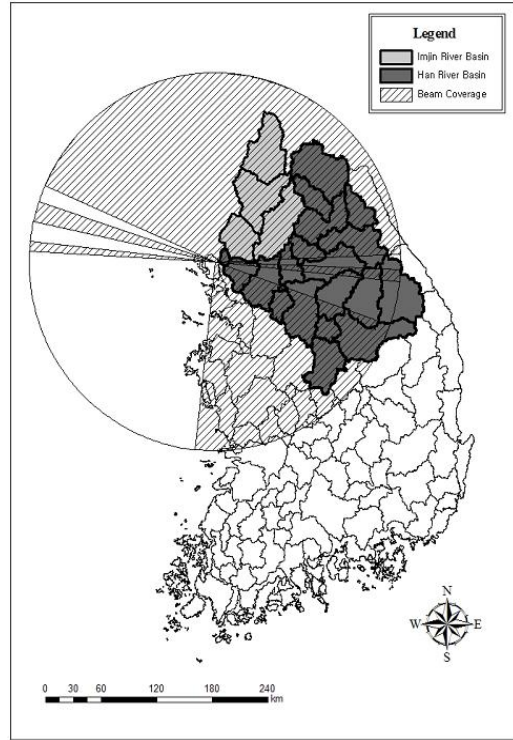
소유역별로 구분하여 살펴본 차폐 지역의 면적과 차

폐 비율 등은 Table 6에 정리한 것과 같다. 각 소유역별 관측오차 값은 앞서 구한 Tables 2~5에서 독치하여 구하였으며 각 소유역에서 차폐로 인해 분할되는 면적의 개수와 함께 Table 7에 나타내었다. 이때 Table 7에 제시한 값은 아주 정확한 값은 아니며 대략적인 값으로, 이는 다양한 크기를 나타내는 관측부분을 정확히 고려하는 것이 현실적으로 불가능하기 때문이다. 또한, 차폐로 인해 레이더의 영향권에 속하지 않는 소유역은 주변의 소유역을 묶어 면적평균을 통해 관측오차를 유추할 수도 있지만 본 연구에서는 이렇게 고려하지 않고 단순히 무한대의 관측오차를 가진다고 추정하였다. 무한대로 추정된 소유역은 0, 1, 16의 3개 유역이 해당된다. 차폐가 전혀 발생하지 않는 소유역의 경우에는 관측오차가 없는 것으로 나타났다. 반면 소유역의 일부가 차폐되는 경우에는 관측되는 부분에 대한 면적의 개수(군집 개수) 및 크기를 산정하여 이를 공간적 관측횟수 및 관측격자의 크기로 가정하였다.

예를 들어 5번 소유역의 경우 면적은 38.6^2 km^2 이며



(a) Radar angle 0.5°



(b) Radar angle 1.0°

Fig. 4. Coverage of Ganghwa Radar Area the Han and Imjin River Basin

Table 6. Beam-blocking Coverage of Ganghwa Radar (Radar Angle 0.5°)

Type	Coverage of Ganghwa Radar				Han and Imjin River Basin			
	Beam Blocking		Beam Coverage		Beam Blocking		Beam Coverage (effective basin)	
	Area (km ²)	Blocking Ratio (%)	Area (km ²)	Coverage Ratio (%)	Area (km ²)	Blocking Ratio (%)	Area (km ²)	Coverage Ratio (%)
Value	54757.0	43.58	70915.7	56.42	8708.6	25.31	21485.7	62.43

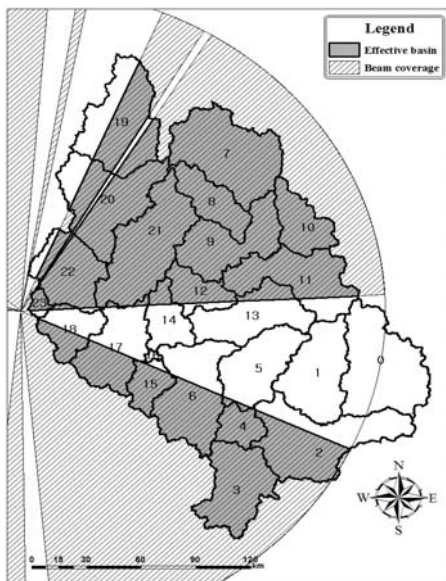


Fig. 5. Sub-basin Number Used for the Flood Warning System of the Han and Imjin River Basin

이 중 96.7%가 차폐 되어 실제로 관측되는 면적은 전체 면적의 3.3%인 약 6.9² km²에 불과하다. 또한 5번 유역에는 관측부분이 크게 두 개의 군집으로 이루어져 있으므로 관측횟수 N 을 2로 가정할 수 있다. 따라서 5번 소유역의 경우는 전체 대상영역 40×40 km²에 대해 5.0² km²의 면적을 가지는 격자 2개에 관측자료가 가용한 경우에 가장 근접한다. 따라서 Table 4에 의하면 이때의 관측오차는 16.06% 정도가 된다. 이와 유사하게 관측 대상영역의 크기를 20×20 km²라고 가정하고 5.0² km² 격자 2개에 관측자료가 존재한다면 이때의 관측오차는 6.12%가 된다(Table 3). 즉, 면적이 38.6² km²인 5번 소유역의 대부분인 96.74%가 차폐되는 경우 가용한 자료를 이용하여 추정된 면적평균강우의 관측오차는 6.12%보다 크고 16.09%에 근접한 값이 될 것이다.

Table 7. Square Root of Dimensionless Error Variance V of the Han and Imjin River Basin

Sub-basin No.	Area (km ²)		Beam blocking ratio (%)	No. of clusters*	Range of V (%)			
	Basin	Beam blocking			$L_1 \times L_2 = 10 \times 10 \text{ km}^2$	$L_1 \times L_2 = 20 \times 20 \text{ km}^2$	$L_1 \times L_2 = 40 \times 40 \text{ km}^2$	$L_1 \times L_2 = 80 \times 80 \text{ km}^2$
0	49.5 ²	49.5 ²	100.00	0	-	-	∞	∞
1	42.1 ²	42.1 ²	100.00	0	-	-	∞	∞
2	49.8 ²	34.5 ²	47.94	1 ⁺	-	-	> 6.41	<< 36.29
3	40.2 ²	0.0 ²	0.00	1	-	-	0.00	0.00
4	22.9 ²	1.1 ²	0.26	1 ⁺	-	> 0.52	<< 0.52	-
5	38.6 ²	38.0 ²	96.74	2 ⁺	-	>> 6.12	< 16.06	-
6	45.5 ²	29.1 ²	40.98	1 ⁺	-	-	> 05.15	<< 29.96
7	48.8 ²	0.0 ²	0.00	1	-	-	0.00	0.00
8	30.7 ²	0.0 ²	0.00	1	-	0.00	0.00	-
9	39.8 ²	0.0 ²	0.00	1	-	0.00	0.00	-
10	30.5 ²	0.0 ²	0.00	1	-	0.00	0.00	-
11	43.0 ²	18.0 ²	17.53	1 ⁺	-	-	> 2.16	<< 8.94
12	26.9 ²	11.5 ²	18.35	1 ⁺	-	> 1.06	<< 2.16	-
13	39.6 ²	36.2 ²	83.66	1 ⁺	-	>> 6.83	< 15.30	-
14	27.6 ²	24.5 ²	79.18	1 ⁺	-	> 6.26	<< 13.89	-
15	23.7 ²	7.1 ²	8.93	1 ⁺	-	> 0.52	<< 1.05	-
16	6.6 ²	6.6 ²	100.00	0	∞	∞	-	-
17	39.2 ²	27.4 ²	48.82	4 ⁺	-	>> 4.17	< 9.59	-
18	28.7 ²	20.7 ²	51.94	2 ⁺	-	> 4.39	<< 9.87	-
19	46.9 ²	30.0 ²	40.90	2 ⁺	-	-	> 8.97	<< 60.24
20	46.8 ²	20.8 ²	19.80	2 ⁺	-	-	> 7.55	< 45.03
21	48.4 ²	2.6 ²	0.28	1 ⁺	-	-	> 0.52	<< 1.11
22	37.6 ²	14.5 ²	14.78	2 ⁺	-	>> 3.19	< 7.06	-
23	12.1 ²	5.7 ²	22.22	2 ⁺	> 1.88	<< 3.61	-	-

* 0 : where the beam blocking occurs over the whole sub-basin
 1 : where the beam covers the whole sub-basin
 n : where n clusters of beam cover the partial area of the sub-basin
 n⁺ : where n major clusters along with minor ones of beam cover the partial area of the sub-basin

5. 결 론

본 연구에서는 차폐 등을 이유로 레이더 강우가 대상 유역 또는 소유역을 완전하게 포괄하지 못하는 경우에 대해 가용한 레이더 강우를 이용하여 면적평균강우를 산정하는 경우에 포함될 수 있는 오차의 규모를 추정해 보았다. 본 연구에서는 이와 같은 관측오차의 규모를 면적평균강우의 표준편차에 대한 상대적 규모로 표현하였다. 이렇게 함으로서 강우사상별로 달라질 수 있는 강우의 특성차이가 배제될 수 있고, 아울러 레이더 강우가 가질 수 있는 편위 또는 공간상관구조의 차이에서 발생하는 영향도 배제할 수 있기 때문이다. 아울러 가용한 레이더 정보는 유역 내 무작위로 위치한 것이 아니라 대략 큰 군집을 이루고 있는 상황이므로 이러한 특성도 반영될 수 있도록 하였다.

본 연구는 한강 유역의 강우관측에 강화 레이더를 이용하는 경우를 적용 예로 살펴보았다. 강화 레이더는 근본적으로 임진강 유역의 홍수에경보를 위해 설치되었

으나, 관측영역이 한강 유역을 포함하고 있으므로 그 역할 확대가 가능할 것으로 판단된다. 그러나 강화 레이더는 한강 유역을 완전히 포괄하지 못하며, 아울러 일부 소유역의 경우는 차폐문제로 인해 부분적인 레이더 정보만이 가용한 상황이다. 본 연구에서는 한강 유역을 수자원단위지도의 중권역에 해당하는 총 20개의 소유역으로 나누어 검토하였다. 이들 소유역 중 강화 레이더로 완전히 관측되는 경우는 총 5개에 불과하며, 전혀 관측되지 않는 소유역도 3개가 있다. 나머지 12개의 소유역은 부분적인 레이더 정보만이 가용한 경우가 된다.

부분적인 레이더 정보만이 존재하는 경우의 관측오차는 기본적으로 관측되는 부분의 면적에 반비례하여 작아지지만, 동일한 면적일 경우에는 관측되는 면적이 몇 개로 쪼개져 있느냐에 따라 오차의 규모가 달라지게 된다. 동일한 관측면적일 경우에는 많이 쪼개져 있을수록 관측오차가 작아지게 된다. 본 연구의 대상유역인 한강 유역의 경우에도 강화 레이더 강우자료를 이용하

여 면적평균강우를 추정한다면 그 오차는 최소 수 %에서 최대 수십 %까지 다양한 것으로 파악되었다.

마지막으로 본 연구의 결과는 레이더 강우 자체에는 오차가 없다는 가정 하에 추정된 것임을 밝힌다. 즉, 본 연구에서 면적평균 추정시의 오차는 레이더가 대상 유역 또는 소유역 전체를 관측하지 못하므로써만 발생하는 오차이다. 본 연구에서의 경우처럼 레이더 정보만으로 면적평균강우의 추정에 충분한 정도가 확보되지 않을 경우에는 지상의 우량계를 적극적으로 활용해야 함은 당연하다. 궁극적으로는 두 개의 다른 관측방법을 병행함으로써 보다 안정적인 아울러 정도 있는 관측이 가능함을 이미 여러 연구에서 살펴본 바 있다.

감사의 글

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(내배수 홍수분담 최적화 기술개발) 연구비 및 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-311-D00221).

참고 문헌

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

건설교통부 (2002). **수문관측효율성 제고방안 연구용역(2단계) 보고서**

국가수자원관리정보시스템 홈페이지. <http://www.wamis.go.kr>

김경준, 유철상 (2007). “강우공간상관구조의 변동 특성.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제12호, pp. 943-956.

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

유철상, 김경준 (2007). “강우 레이더와 지상 우량계의 통합관측효과.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 11호, pp. 841-849

유철상, 김병수, 김경준, 최정호 (2007). “우량계 강우를 이용한 레이더 강우의 Ground-Truth 방법 검토.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제9호, pp. 743-754.

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

유철상, 하은호, 김경준 (2006). “강우의 공간상관구

조에 대한 무강우자료의 영향.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제2호, pp. 127-138.

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.

한국수자원공사 (2004). **전국하천 수자원·환경기초조사 종합계획**, p. 345.

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.

Andrieu, H., Creutin, J.D. and Faure, D. (1997). “Use of weather radar for hydrology of a mountainous area. Part I: radar measurement interpretation.” *Journal of Hydrology*, Vol. 913, pp. 1-25.

Azimi-Zonooz, A., Krajewski, W. F. and Bowles, D.S. (1989). “Spatial rainfall estimation by linear and non-linear co-kriging of radar-rainfall and raingage data.” *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Vol. 3, pp. 51-67.

Bech, J., Bernat, C., Lorente, J., and Bebbington, D. (2003). “The sensitivity of single polarization weather radar beam blockage correction to variability in the vertical refractivity gradient.” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 20, No. 6, pp. 845-855.

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., 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.

- Damant, C., Austin, G.L., Bellon, A., and Broughton, R.S. (1983). "Errors in the Thiessen technique for estimating areal rain amounts using weather radar data." *Journal of Hydrology*, Vol. 62, pp. 81-94.
- Gabella, M. and Perona, G. (1998). "Simulation of the orographic influence on weather radar using a geometric-optics approach." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 15, No. 6, pp. 1485-1494.
- 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.
- Joss, J. and Waldvogel, A. (1990). "Precipitation measurements and hydrology." In *Radar in Meteorology*, Battan Memorial and 40th Anniversary Radar Meteorology Conference, Ed. D. Atlas, American Meteorological Society, pp. 577-606.
- 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.
- Seed, A., Siriwardena, L., Sun, X., Jordan, P., and Elliot, J. (2002). *On the Calibration of Australian Weather Radars*. Report 02/7, ISBN 1-876006-88-9, Cooperative Research Center for Catchment Hydrology, p. 40.
- 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. 2187-2193.
- 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 multidimensional precipitation parameters by areal estimates of oceanic rainfall." *Journal of Geophysical Research*, 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 raingauges 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 raingauge 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:08-01/접수:2008.01.04/심사완료:2008.03.27)