

우량계 강우 자료에 따른 레이더 강우의 지상보정 결과 검토

Evaluation of Ground-Truth Results of Radar Rainfall Depending on Rain-Gauge Data

김병수*, 김경준**, 유철상***

Byoungsoo Kim, Kyoungjun Kim, Chulsang Yoo

요 지

본 연구에서는 레이더 강우의 지상보정(ground-truth)을 위해 사용가능한 기상청(KMA), AWS 및 건설교통부(MOCT) 강우자료를 다양한 지상보정 설계에 적용하여 비교·평가하였다. 본 연구에서는 동일 기간의 KMA, MOCT, AWS의 우량계 자료와 관악산 레이더 강우자료를 이용하였으며, 각각 두 관측방법사이의 차이(오차)를 편의(bias)의 유무 및 크기의 관점에서 평가하였다. 추가로 호우 사상의 특성에 따른 차이도 함께 검토하였다. 그 적용 결과 지상우량계 자료별 편의의 차이는 확연하게 부각되지는 않았으나, 통계 특성치에서는 어느 정도의 차이가 존재함을 확인하였다. 전체적으로 보면 MOCT 우량계 자료를 이용하는 경우가 다른 강우자료를 이용하는 경우에 비해 편의의 규모가 제일 작은 것으로 확인되었다. 호우 사상별로는 강우의 공간적 간헐성이 가장 큰 장마 기간의 경우가 태풍이나 대류성 강우에 비해 설계편의가 작게 나타나는 것으로 확인되었다.

핵심용어: 레이더 강우, Ground-Truth, 설계편의, 보정편의

1. 서 론

레이더는 넓은 지역에 걸쳐 실시간으로 강수현상을 감시하고 지상우량계로는 파악이 불가능한 우량계 틈새로 통과하는 국지적인 호우나 강우 이동 및 강우 상황 등의 파악도 가능한 장점이 있다(건설교통부, 2003 ; 2004a ; Ha and North, 1994 ; Ha et al., 2002). 그러나 레이더 관측은 정확도의 확보 측면에서 많은 문제점을 가지고 있다. 이는 레이더가 지상으로부터 일정한 높이의 대기 중에서 전자기파의 반사 및 감쇄 특성을 이용하여 강우강도를 간접적으로 추정하기 때문이다. 따라서 레이더 강우의 지상보정과 관련된 연구(Ha and North, 1999 ; Ha et al., 2002 ; Yoo et al., 2006) 및 레이더 강우와 지상우량계와의 합성을 통해 지상우량계 수준의 레이더 강우를 얻고자 하는 연구(Seo, 1998a ; Seo, 1998b) 등은 중요한 의미를 갖는다.

현재 레이더 강우가 갖는 편의를 제거하기 위한 다양한 방법론이 제시되고 있다. 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 관련된 연구들이다.

레이더 강우 자료가 가지는 편의의 제거문제는 기본적으로 참값이라고 가정되는 지상우량계 자료가 사용된다. 레이더 강우의 지상보정 결과는 지상우량계 자료의 절대적인 영향을 받기 때문에 어떤 우량계 자료를 쓰느냐에 따라 그 결과에 차이가 발생한다. 본 연구에서 고려한 지상우량계 자료는 기상청, 건설교통부, AWS에서 측정된 자료이다. 이 세 가지 우량 자료는 관측 단위, 측정 시간 등이 모두 달라 상이한 특성을 가진다. 예를 들어, 기상청 자료는 0.1 mm 단위까지 측정되고, 건설교통부 자료는 1 mm, AWS 자료는 0.5 mm 단위로 강우를 측정한다. 이외에도 측정목적과 측정기기의 종류, 검·보정의 유·무에 따라 강우값의 질적

* 정회원·고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정-E-mail: keslo99@korea.ac.kr

** 정회원·고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정-E-mail: guitar77@korea.ac.kr

*** 정회원·고려대학교 사회환경시스템공학과 교수-E-mail: envchul@korea.ac.kr

또는 양적인 차이가 발생한다.

본 연구에서는 레이더 강우의 지상보정을 위한 비교 방법(본 연구에서는 설계(design)라 칭함)을 검토하는 경우 기상청, 건설교통부, AWS의 세 가지 우량계 자료를 참값으로 가정하였다. 레이더 강우와 우량계 강우를 비교하는 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. 모의 강우를 이용하는 경우에는 관측방법에 따른 편이가 없어 설계편의(design bias)의 존재가 잘 부각된다. 그러나 실측자료를 사용하게 되면 설계편의뿐만 아니라 보정편의(retrieval bias)가 동시에 존재하게 되어 레이더 강우와 우량계 강우 사이의 정량적인 차이를 파악하기 어려워진다. 이에 본 연구에서는 지상보정 설계 및 사용되는 지상우량계별로 편의를 포함한 여러 통계적 특성치를 각각 측정하여 비교·평가하고자 한다.

2. 지상보정의 배경이론

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. 먼저, 레이더가 그 대상 지역을 측정할 경우에 레이더 측정치는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

여기서 $K(\mathbf{r})=A\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_g)$ 이다. 아울러 Eqs. (1) and (2)에서 아래첨자는 각각 레이더와 지상강우관측소를 나타낸다. 또한 총 관측이 n 번 수행되는 경우 각각을 Ψ_r^n 와 Ψ_g^n 라고 표현한다.

본 연구에서 고려하는 3개의 지상보정 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 $\Psi_g^n > 0$ 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 $\epsilon_{di}^n = \Psi_{ri}^n - \Psi_{gi}^n$ 으로 나타내고 일반적으로 지상관측치와 레이더 관측치 간의 정확도를 비교하는데 하나의 지표로 사용되는 평균제곱오차(MSE, mean-square error)는 Eq. (3)과 같이 정의된다.

$$\langle\epsilon_{di}^n\rangle^2 = \langle(\Psi_{ri}^n - \Psi_{gi}^n)^2\rangle \quad (3)$$

Ha and North(1999), Ha et al.(2002)과 Yoo et al.(2006)은 지상보정 설계에서 통계치들 사이의 관계를 구명하고, 특히 design 1의 통계치를 이용하여 design 2와 design 3에 대한 통계치를 계산하는 방법을 제시하였다. 그 결과에 따르면 design 1과 2는 편이가 발생하지 않고, design 3의 경우에만 음(-)의 설계편의를 가지게 되는데, 지상 우량계 강우가 '0'(무강우)인 경우를 제외시키는 design 3은 심각한 설계편의를 야기시킬 수 있음을 이론적으로 제시하였다. 이에 관한 자세한 배경이론은 Ha and North(1999), Ha et al.(2002), Yoo et al.(2006) 등의 연구에 기술되어 있다.

3. 레이더 및 지상우량계의 강우량 특성

3.1 자료의 특성

본 연구에서 사용한 레이더 자료는 2003년도 관악산 레이더 자료(C band, $R=240$ km)이다. 반사도-강우강도 관계에 적용된 매개변수는 Marshall-Palmer(1948)가 제안한 $A=200$ 과 $b=1.6$ 이다. 본 연구에서는 1

km×1 km의 공간해상도로 481×481 개의 격자를 이루고 있고, 1.5 km의 유효 고도를 갖는 10분 간격의 2차원 평면 면적강우량을 사용하였다. 그러나 가용한 지상 우량계 자료는 한 시간 단위이므로 레이더 강우 자료를 누가하여 한 시간 단위의 격자별 강우량으로 산정하였고, 이를 그 격자에 대한 레이더 관측값으로 간주하였다. 만일 하나의 레이더 강우의 격자에 대응하는 지상우량관측소의 수가 2개 이상일 경우에 이들 지상우량계 강우량을 산술평균하여 지상에서 측정된 강우량으로 간주하였다.

본 연구에 사용된 남한 내 우량계 자료는 KMA, MOCT 및 AWS로써 각각 76개소, 303개소, 434개소의 자료를 사용하였다. 이들 자료는 측정단위, 운영방식 및 검·보정 수행 등에서 모두 상이하다. 예를 들어 우량관측단위의 경우 KMA는 0.1 mm, MOCT는 1 mm, 마지막으로 AWS는 0.5 mm 단위를 사용하고 있다.

3.2 강우량 비교 및 분석

지상우량계 자료는 레이더 강우량의 편의를 분석하는데 이용되므로 레이더가 측정한 강우량과 비교하여 어떤 거동을 보이는지 살펴볼 필요가 있다. 레이더 및 지상우량계의 상이한 특성을 가지적으로 확인하기 위하여 2003/08/17/00:00부터 2003/08/25/00:00의 기간 동안의 대구 지점에서 측정된 강우량을 우량계 자료별로 구분하여 Fig. 1에 시계열로 나타냈다. Fig. 1에서는 특히 지상강우량과 레이더 강우량의 차이를 명확히 확인할 수 있다.

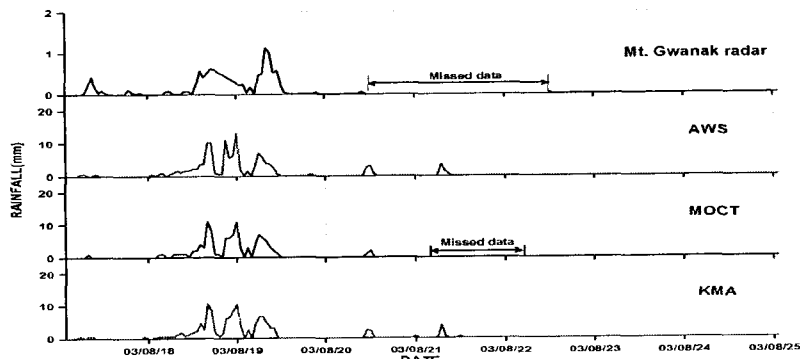


Fig. 1 The time series of radar and rainfall in Daegu (top: radar, upper-middle: AWS, lower-middle: MOCT, bottom: KMA)

4. 레이더 강우의 지상보정 결과

4.1 지상우량계 자료에 따른 지상보정 결과 비교

레이더 강우량과 지상우량계 강우량간의 지상보정 결과 비교는 관악산 레이더의 실제 관측해상도인 1 km × 1 km에서 수행하였다. 본 연구에서 고려한 호우사상 및 자료기간은 아래 Table 1과 같다

Table 1. Period of data used in this study

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

먼저 우량계 자료별 지상보정 특성을 파악해 보기 위해 각각의 지상보정 설계에 대한 편의 및 평균제곱 오차를 추정하였다. 평균제곱오차의 개념은 인공위성에서 관측한 강우를 시-공간 축상에서 포괄적으로 관측할 때 발생하는 오차를 추정하는데 유용하게 사용된 바 있다(North and Nakamoto, 1989). 대상 자료를 이용하여 적용한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Statistics of radar measurements $\langle\psi_{ri}\rangle$, ground measurements $\langle\psi_{gi}\rangle$, errors $\langle\xi_{di}\rangle$ and MSE

Station	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
KMA(76)	1 km	0.469	1.780	-1.312	12.471	0.901	3.127	-2.225	21.658	1.19	4.446	-3.255	30.066
MOCT(303)	1 km	0.434	1.569	-1.135	28.335	0.857	2.545	-1.688	26.840	1.167	4.922	-3.755	46.518
AWS(448)	1 km	0.508	1.792	-1.284	24.372	0.966	2.954	-1.988	24.396	1.339	4.671	-3.332	44.947
All(827)	1 km	0.473	1.692	-1.218	18.449	0.916	2.796	-1.880	45.164	1.264	4.728	-3.464	55.405

() : number of station · ALL : KMA+MOCT+AWS

첫 번째로 평균제곱오차를 기준으로 자료별 특징을 살펴보면, KMA가 다른 우량계 자료에 비해 평균제곱오차가 가장 작고, 특히 design 1에서 가장 작게 나타난다. 즉, design 1이 레이더 강우와 우량계 강우간 관계를 가장 뚜렷하게 나타낸다고 판단할 수 있다. 두 번째, 편의 $\langle\xi_{di}\rangle$ 을 고려하면 모든 관측소에서 design 3의 편이가 design 1, 2보다 크게 나타난다. 즉, design 3은 design 1, 2에 비해 레이더 강우의 지상보정에 심각한 왜곡을 초래할 수 있는 것으로 해석할 수 있다. 결국 레이더 강우의 지상보정에는 설계편이가 가장 작은 design 1이나 2를 선택하여 사용해야 한다.

4.2 호우사상별 Ground-Truth 결과의 비교 및 평가

Table 3. Statistics of radar measurements $\langle\psi_{ri}\rangle$, ground measurements $\langle\psi_{gi}\rangle$, errors $\langle\xi_{di}\rangle$ and MSE for the type of rainfall

Station / 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
KMA (76)	Typhoon	1 km	0.897	3.374	-2.476	15.851	1.199	3.953	-2.754	13.565	1.358	4.615	-3.257	15.367
	Jangma	1 km	0.402	1.097	-0.695	8.278	0.883	2.249	-1.366	13.856	1.327	3.755	-2.428	20.435
	Convective	1 km	0.249	3.303	-3.055	20.046	0.437	5.376	-4.939	48.218	0.483	6.115	-5.632	52.738
MOCT (303)	Typhoon	1 km	0.931	2.576	-1.645	7.111	1.247	2.763	-1.516	5.947	1.508	4.281	-2.773	15.598
	Jangma	1 km	0.340	1.017	-0.677	0.340	0.787	1.895	-1.108	0.862	1.256	4.750	-3.494	33.252
	Convective	1 km	0.242	3.108	-2.866	0.007	0.433	4.831	-4.397	9.998	0.481	6.363	-5.882	37.187
AWS (448)	Typhoon	1 km	0.770	3.089	-2.319	10.088	1.072	3.310	-2.238	6.171	1.299	4.438	-3.139	15.411
	Jangma	1 km	0.456	1.307	-0.851	0.359	1.029	2.366	-1.337	1.117	1.392	3.631	-2.239	3.195
	Convective	1 km	0.272	3.046	-2.774	0.003	0.486	4.854	-4.368	13.624	0.563	6.171	-5.608	46.540

() : number of station

Table 3은 가용한 지상우량계 자료에 대하여 호우사상별로 지상보정을 수행한 결과를 보여주고 있다. 호우사상별 자료기간은 Table 1과 동일하다. Table 3에 나타난 가장 큰 특징은 모든 우량계 자료에서 장마기간 동안 오차의 편이가 태풍, 대류성 강우 기간의 편이보다 작고, 아울러 design 1에서의 편이가 가장 작게 나타난 점이다. 장마는 강우장이 대부분 횡방향으로 긴 형태를 가지기 때문에 횡방향뿐만 아니라 종방향으로 넓게 퍼진 형태의 태풍보다 무강우를 반영한 비율이 높다. 따라서 장마에 해당하는 모든 설계에서 편이의 규모가 작게 나타나게 된다. 다시 말해, 장마는 태풍보다 강우의 공간적 간헐성이 잘 부각되어 설계별 차이가 크게 나타난 것이다.

우량계 자료별로 분석해보면 MOCT의 편이와 평균제곱오차가 다른 관측소에 비해 가장 작은 경향을 나타낸다. 이러한 결과의 원인은 근본적으로 자료에 포함된 무강우의 비율에서 찾을 수 있다. 즉, MOCT 우량계에 '0'으로 측정된 강우량이 KMA 및 AWS의 경우보다 많아 통계적 특성에 영향을 준 것이다. 이상과 같이 호우사상별로 지상보정 결과를 비교하였을 경우에도 실시간 홍수예경보 이용이라는 측면과 강우관측망 등을 고려할 때 다른 강우 자료에 비해 편이가 작은 MOCT design 1의 방법이 레이더 강우의 지상보정 목적에 더 적합하다고 판단할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 레이더 강우의 지상보정을 위해 가능한 3가지 비교 방법, 즉 지상보정 설계를 실측자료에 적용하여 평가하였다. 동일 기간의 KMA, MOCT, AWS의 우량계 자료와 관악산 레이더 강우 자료와의 차이(오차)를 살펴보고 각 우량계 자료에 따른 통계적 특성을 비교하였다. 추가로 호우 사상의 특성에 따른 차이도 함께 검토하였다.

이상과 같은 우량계 자료를 가지고 레이더 강우의 지상보정을 비교·형태별로 구분하여 살펴본 결과 우량계 자료에 따른 지상보정 설계편의의 확인한 차이는 잘 부각되어 나타나지 않았다. 이는 실측 강우의 경우 보정편의 및 설계편의가 동시에 존재하여 명백하게 구분되지 않기 때문이다. 그러나 각 우량계 자료에 따른 지상보정 결과에는 약간의 차이를 보여 주었다. 호우사상별로 그리고 전체 자료 기간의 두 가지 형태로 레이더 강우의 지상보정을 수행한 결과, 모든 우량계 자료에서 장마 기간의 설계편의가 다른 호우 사상에 비해 작게 나타났다. 이는 장마가 태풍이나 대류성 강우에 비해 강우의 공간적 간헐성을 크게 반영하고 있기 때문이다. 또한 MOCT의 design 1의 방법이 다른 자료의 비교 방법에 비해 설계편의가 작은 것으로 확인되었다.

결론적으로 보면 본 연구에서 고려한 세 가지 지상우량계 자료의 본질적인 특성 차이는 뚜렷하지만, 비교·형태별로 구분한 지상보정 결과를 살펴보면 우량계 자료별로 통계적 특성치의 차이는 크지 않은 것으로 확인되었다. 다만 실시간 홍수예경보의 목적으로는 무강우의 비율이 높고, 강우관측망 분포가 조밀한 MOCT의 우량계 자료가 레이더 강우의 지상보정 목적에 가장 유리한 결과를 나타내는 것으로 판단할 수 있었다.

감 사 의 글

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

참 고 문 헌

1. 건설교통부 (2004a). 전국 강우레이더 설치 및 홍수예경보시스템 개선 기본계획 수립 3차년도, 927pp.
2. 건설교통부 (2004b). 한강유역조사 제 3권 수리·수문조사 보고서 - 1편 수문관측망 조사
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Marshall, J.S., and Palmer, W.Mc. (1948). The distribution of raindrops with size. *Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 5, pp. 165-166.
7. North, G.R., and Nakamoto, S. (1989). Formalism for comparing rain estimation designs. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 6, pp. 985-992.
8. 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.
9. 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.
10. 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.