



A study on spatial error occurrence characteristics of precipitation estimation of rainfall radar

Hwang, Seokhwan^{a*} · Yoon, Jung Soo^b · Kang, Narae^c

^aResearch Fellow, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

^bSenior Researcher, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

^cSenior Researcher, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

Paper number: 22-101

Received: 25 October 2022; Revised: 15 November 2022; Accepted: 21 November 2022

Abstract

A study on a method to overcome the limitations of the topographical and hydrological observation environment for estimating the QPE with high consistency with the ground rainfall by utilizing the spatiotemporal observation advantages of the rainfall radar for use in flood forecasting, and quantitative observations of localized rainfall due to these limiting conditions. Uncertainty should be identified in terms of flood analysis. Against this background, in this study, 22 major heavy rain events in 2016 were analyzed for each of Mt. Biseul (BSL), Mt. Sobaek (SBS), Mt. Gari (GRS), Mt. Mohu (MHS), and Mt. Seodae (SDS) to determine the observation distance and altitude. The uncertainty of observation was quantified and an error map was derived. As a result of the analysis, it was found that, on average, the rainfall radar exceeded 10% up to 100 km and 30% over 150 km. Based on the average radar operating altitude angle, it was found that the error for the altitude was approximately 10% or less up to the second altitude angle, 20% at the third or higher altitude angle, and more than 50% at the fourth altitude angle or higher.

Keywords: Radar, Rainfall radar, Error, Error estimation, Spatial error, Range distance error, Height distance error

강우레이더 강수량 관측의 공간적 오차 발생 특성 연구

황석환^{a*} · 윤정수^b · 강나래^c

^a한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 연구위원, ^b한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 수석연구위원,

^c한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 수석연구위원

요 지

홍수예보에 활용하기 위해 강우레이더의 시공간적 관측 장점을 살려 지상강수량과 정확성 높은 QPE 추정을 위한 지형적, 수문학적 관측 환경의 한계를 극복하기 위한 방법에 대한 연구와 이러한 한계 조건으로 인해 집중호우 관측의 정량적 불확실도를 홍수해석 측면에서 규명하여야 한다. 이러한 배경에서 본 연구에서는 비슬산(BSL), 소백산(SBS), 가리산(GRS), 모후산(MHS), 서대산(SDS) 강우레이더 각각에 대하여 2016년 22개 주요 호우사상을 분석하여 관측 거리와 고도에 따른 관측의 불확실도를 정량화하고 오차지도를 유도하였다. 분석결과 강우레이더 평균적으로 100 km까지는 대략 10% 이하, 150 km 이상에서는 30%를 초과하는 것으로 나타났다. 고도에 대한 오차는 레이더 운영 고도각 평균을 기준으로 2번째 고도 각까지는 대략 10% 이하, 3번째 이상에서는 20%, 4번째 고도각 이상에서는 50% 초과하는 것으로 나타났다.

핵심용어: 레이더, 강우레이더, 오차, 오차 추정, 공간 오차, 거리 오차, 고도 오차

*Corresponding Author. Tel: +82-31-910-0241
E-mail: sukany@kict.re.kr (Hwang, Seokhwan)

1. 서론

최근 기후변화로 인한 강수의 강도와 빈도가 증가하고 이로 인해 도시 침수 및 중소하천 범람으로 인한 피해가 지속적으로 발생하고 있다. 이러한 국지적 집중호우에 의해 발생하는 돌발홍수는 레이더 관측을 통해 산정된 강수를 활용해야 보다 정확한 홍수 예측이 가능하다. 호우의 발달이 빠르게 일어나기 때문에 1 km 이하의 상세한 관측이 필요하고, 빠르게 이동하기 때문에 넓은 범위에 대한 관측이 필요하다. 이러한 이유에서 환경부에서는 강수관측의 정확도와 정밀도를 향상시키기 위해 2000년 이후 강우레이더를 도입 운영 중에 있다. 더불어 강수추정의 정확도를 높이기 위해 이중편파 기능을 가진 장비의 도입과 함께 관측 전략 최적화를 통한 정량적 강수추정의 정확도 향상을 꾸준히 도모해 오고 있다. 그러나 강우레이더는 강수 관측을 위해 안테나 회전에 따라 빔을 방사하여 방위각 방향의 관측을 실시한다. 그리고 저고도 관측과 일정한 고도각의 관측을 위해 여러 고도각을 고정하여 관측하고 있다. 강우레이더는 전파를 이용하여 강수를 추정하는 장비이기 때문에 강수나 차폐물에 의해 전파 신호의 감쇄가 발생하게 된다. 그리고 전파는 직진을 하나 지구가 둥글기 때문에 거리가 멀어질수록 지면에서의 전파 고도는 높아지는 경향을 보인다. 즉 레이더에서 멀어질수록 해당 전파 위치의 지면에서 관측되는 강수와는 차이가 커질 가능성이 높아진다. 이러한 전파 감쇄와 전파가 감지하는 강수의 고도를 고려하면, 홍수예보에 활용되는 정확한 강수를 산정하기 위해서는 가급적 전파 감쇄 정도가 덜하고 관측 고도가 높아지지 않는 레이더에서 근거리 지역이 관측의 정확도가 높기 마련이다. 그러나 아직까지 거리와 고도에 따른 강수추정의 불확실도를 정량적으로 평가한 경우는 많지 않다. 특히 지역적 지형 및 기상 특성과 레이더 관측 전략이 다르기 때문에 우리나라 평가사례가 매우 중요하나 이에 대한 연구 사례는 매우 드물다.

레이더에 의한 강수 추정치는 하드웨어 검정(calibration), 레이더 측정 반사도(reflectivity, Z)과 강우강도(rainfall intensity; R) 사이의 관계에서 범위(range) 효과, 빔 오버슈팅(over shooting) 및 부분 빔 차폐(partial beam filling), 빔의 비정상적인 전파(abnormal beam propagation), 반사도 수직 프로파일(vertical profile of reflectivity, VPR)의 비균일성(Wilson and Brandes, 1979; Austin, 1987; Hunter, 1996; Rico-Ramirez *et al.*, 2007) 등에 의해 상당한 변동 및 불확실성을 나타낸다. 그리고 이러한 불확실성이 수문학적 예측에 어떻게 영향을 미치는지 정량화하는 것은 어려운 작업임이 입증되었다(Krajewski and Smith, 2002). Borga (2002)는 유출 분석에 VPR의 가변성 효과를 분석했다. VPR 오류와 모델 매개변수

불확실성의 상호 작용은 최근 Hossain *et al.* (2004)에 의해 조사되었다. 위에서 언급한 연구의 공통점은 레이더 오차의 개별 요소에 초점을 맞추었다는 것이다. 그러나 실제 적용에서 레이더 오차의 여러 원인을 분리하고 추정하는 것은 매우 어렵다. 그렇기 때문에 지금까지의 연구에서는 이 문제에 대한 대안적으로 레이더 추정치를 독립적인 기준 지표인 지상 강우량 정보와 비교하여 전체 레이더 불확실성의 추정에 초점을 맞추어 왔다(Ciach *et al.*, 2007; Germann *et al.*, 2006). Krajewski and Georgakakos (1985) 및 Krajewski *et al.* (1993)은 총 레이더 오차의 시공간 확률적 모델링을 제안했다. 그러나 정확한 지상 강우 측정치의 부족으로 인해 수문 모델링 연구에서 이 접근법의 최근 적용은 레이더 오차의 분포와 공간 및 시간의 의존 특성에 관한 단순화된 가정에 기반을 두고 있다(예: Carpenter and Georgakakos, 2004; Butts *et al.*, 2004). 실제로 대부분의 오차모델링 연구에서 레이더 오차장의 공간적, 시간적 상관관계는 무시되었다. Carpenter and Georgakakos (2004)는 이 문제를 인식하고 레이더 오류와 수문 모델의 전파에 대한 보다 현실적인 표현의 필요성을 지적했다.

이러한 레이더의 다양한 오차 요소 중 상시 발생하고 강수 추정에 영향 정도가 큰 거리와 고도에 의한 오차를 줄이기 위해 강우레이더는 여러 대의 레이더를 설치하여 중첩관측을 실시하고 있다. 즉 다른 레이더 관측을 이용해 거리, 고고도 관측을 감소시키기 위한 방법이다. 하지만, 우리나라의 경우에 현재 설치된 레이더 위치에서 거리와 고도에 따른 실측 자료를 기반으로 한 오차를 유도해야 보다 최적의 관측전략을 설정할 수 있고, 이를 통해 정확한 강수를 산정할 수 있게 된다. 예로, 임의의 한 개의 레이더가 관측할 수 있는 거리와 고도에 따른 정확도(불확실도)를 추정하면 여러 레이더 간의 중첩 범위나 고도각 배치를 보다 효과적으로 할 수 있다. 더불어 레이더 관측의 취약지역과 그 취약 정도를 정확히 추정할 수 있어 소형레이더 설치를 통한 보완 등의 대응 방안을 합리적으로 수립할 수 있다. 이러한 측면에서 본 연구에서는 강우레이더 실측자료를 기반으로 강우레이더 관측소 별 관측 영역의 거리와 고도에 따른 복합 오차를 산정하고, 강우레이더 관측 매개변수의 특성을 이용하여 거리와 고도 오차에 대한 각각의 성분을 분리하였다.

2. 분석 자료 및 방법

2.1 관측 거리와 고도에 따른 오차 유도

강우레이더 관측소 별 관측영역의 거리와 고도에 따른 오차 산정 및 호우의 공간적인 오차구조를 세분화 하였다. 강우레

이더 관측범위 내 거리와 고도에 따른 관측오차를 추정하기 위해 Table 1과 같이 비슬산(BSL), 소백산(SBS), 가리산(GRS), 모후산(MHS), 서대산(SDS) 강우레이더(Fig. 1) 각각에 대하여 2016년 22개 주요 호우사상을 분석하였다.

강우레이더에서 강수량추정을 위한 관측전략(빔의 고도각 배치 및 회전 운용 전략)은 Fig. 2과 같다. 이때 관측 목적에 따라 고도각의 수와 범위는 달라진다. 거리에 의한 불확실도의 주요 요인은 빔 차폐, 빔폭 확대, 빔 고도 등이며 고도에 의한 불확실도의 주요 요인은 호우의 수직 분포와 지형 차폐, 간섭 등이다. 빔의 전파는 직진성을 가지고 있으나 지구곡률에 의해 빔이 레이다에서 멀어질수록 지면으로부터 빔의 고도는 높아지게 된다. 더불어 빔이 가지는 빔폭 또한 거리가 멀어질수록 커지게 된다. 이러한 이유에서 레이다로부터 거리가 멀어질수록 비례해서 고도가 높아지면서 관측의 불확실도가 증가하게 되고 이것이 오차로 나타난다. 이때 오차의 기준점은 강우레이더 관측의 주 목적이 유출해석을 하기 위한 강수량 추정이 목적이므로 해당 빔과 정합하는 지면을 기준으로 설정한다. 본 연구에서 사용한 강우레이더에 대한 상세 정보는 ‘강우레이더 기본계획 일부 보완(HRFCO, 2015)’에서 참고 가능하다.

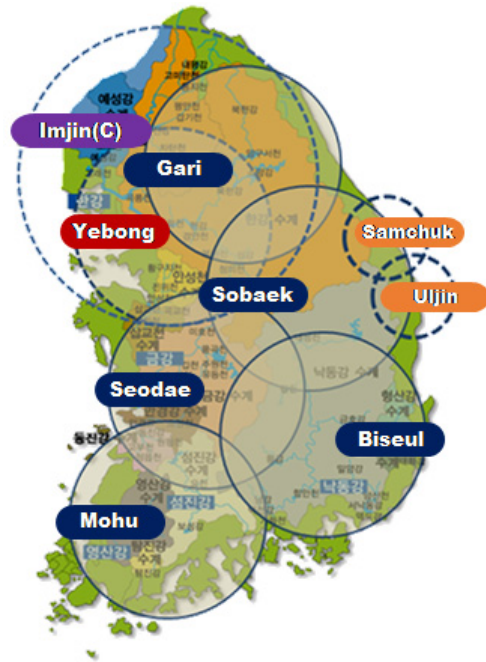


Fig. 1. Rainfall radar networks of Ministry of Environment Flood Control Office

Table 1. Rain events used to derive error according to distance and altitude of rainfall radar observation

Radar	Time	Number of sites	Statistics of gauge rainfall (mm)		
			mean	max	stdev
SDS	2016-07-16 08:10 ~ 2016-07-16 12:50	314	14.2	45.5	10.0
SDS	2016-07-06 04:10 ~ 2016-07-06 23:50	294	24.9	163.5	30.4
SDS	2016-07-04 03:10 ~ 2016-07-04 22:50	323	59.0	207.5	52.6
SDS	2016-07-02 00:10 ~ 2016-07-02 05:50	304	18.9	75.6	19.6
SDS	2016-07-01 21:10 ~ 2016-07-01 23:50	312	11.5	45.5	10.2
SBS	2016-07-16 08:10 ~ 2016-07-16 12:50	291	20.6	65.0	12.3
SBS	2016-07-06 21:10 ~ 2016-07-06 23:50	121	9.6	67.5	14.5
SBS	2016-07-05 18:10 ~ 2016-07-05 23:50	268	18.6	88.7	18.9
SBS	2016-07-04 04:10 ~ 2016-07-04 23:50	299	76.0	201.5	49.0
SBS	2016-07-02 00:10 ~ 2016-07-02 05:50	288	14.9	82.5	17.0
BSL	2016-09-17 00:10 ~ 2016-09-17 16:50	217	106.8	233.0	34.3
BSL	2016-09-03 00:10 ~ 2016-09-03 08:50	162	39.7	154.0	39.0
BSL	2016-07-06 10:10 ~ 2016-07-06 23:50	162	33.5	133.5	26.6
BSL	2016-07-03 15:10 ~ 2016-07-03 18:50	212	13.6	38.0	10.5
BSL	2016-07-01 13:10 ~ 2016-07-01 18:50	216	31.5	81.5	13.5
MHS	2016-09-17 00:10 ~ 2016-09-17 16:50	198	73.3	175.0	28.2
MHS	2016-07-03 11:10 ~ 2016-07-03 17:50	198	33.1	78.0	21.1
MHS	2016-07-01 11:10 ~ 2016-07-01 15:50	197	24.8	61.0	12.1
GRS	2016-10-03 00:10 ~ 2016-10-03 08:50	299	25.3	114.0	28.3
GRS	2016-07-16 06:10 ~ 2016-07-16 14:50	305	31.3	115.5	17.5
GRS	2016-07-05 05:10 ~ 2016-07-05 22:50	307	79.7	253.5	48.9
GRS	2016-07-01 16:10 ~ 2016-07-01 23:50	305	61.7	138.0	27.6

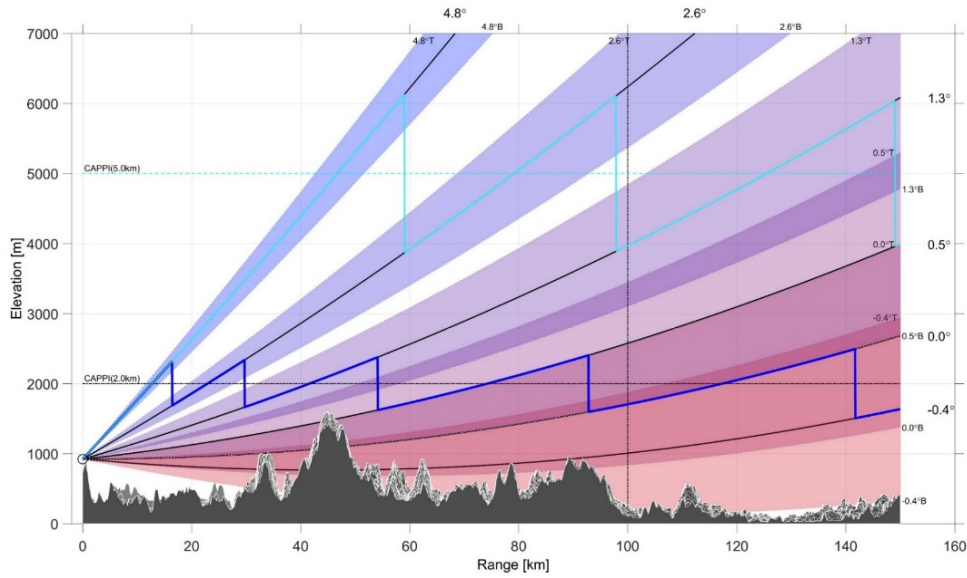


Fig. 2. Beam propagation and blocking diagram according to distance and altitude

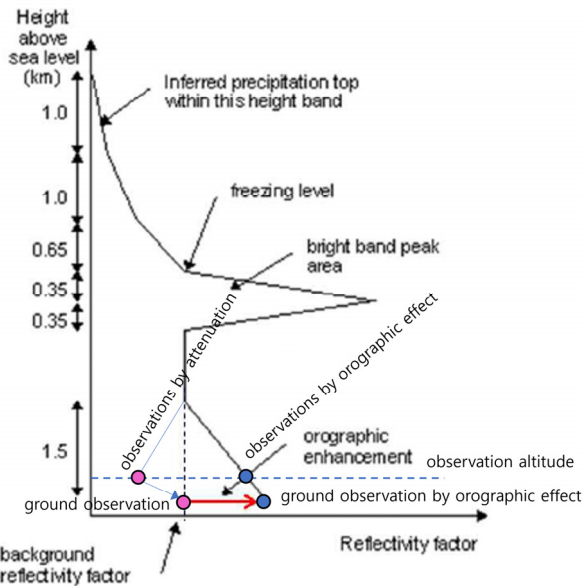


Fig. 3. Schematic diagram of change in reflectivity according to altitude

일반적으로 레이더에 의해 관측되는 관측변수(반사도 예)의 수직분포는 Fig. 3과 같은데, 강수의 물리적 특성에 의해 급격히 강도가 증가하는 밝은 띠(bright band) 영역 이하의 강수 분포는 이론적으로 비교적 일정하다고 볼 수 있다. 그러나 실제로는, 관측 지점이 레이더로부터의 거리가 멀어질수록 빔 폭 증가나 지형 등에 의한 빔 차폐의 영향으로 큰 감쇠가 발생할 수 있는데, 이로 인해 지면 근처에서는 감쇠로 인한 반사도의 강도가 감소하는 경향을 보인다. 우리나라와 같이 산지가

Table 2. Quantitative Precipitation Estimation (QPE) algorithm used for analysis

QPE Algorithm	References
R(Z)	Marshall and Palmer (1948)
R(KDP)	Use only KDP components from JPOLE Ryzhkov <i>et al.</i> (2005)
R(JPL)	JPOLE, Ryzhkov <i>et al.</i> (2005)

많은 경우, 산지효과(orographic effect)로 인한 강수의 증가로 반사도의 강도가 증가하는 경향을 보이기도 하나, 지표면 근처의 심한 간섭의 영향으로 인해 정확한 측정이 어렵다. 따라서, 강우레이더를 이용하여 지표면 근처의 정확한 강수량 추정을 위해서는 이러한 지면 근처의 오차 요소의 영향을 명확히 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 이러한 거리와 고도에 의한 오차 특성을 이중편파 변수의 특성을 이용하여 실증적으로 분석하였다. 오차의 발생 조건과 규모 및 형태 등을 호우사상 별로 표준화하여 개선 방법을 도출한다면 강우레이더에 의한 정량적강수추정(Quantitative Precipitation Estimation, QPE)의 정확도를 보다 향상시킬 수 있다. Table 2는 본 연구에서 적용한 강수추정 알고리즘으로 R(JPL)은 반사도 Z(Reflectivity), 차등반사도 ZDR (Differential reflectivity), 비차등위상차 KDP (Specific differential phase)의 이중편파 변수를 조건에 따라 사용하는 복합 알고리즘이다.

$$NE = \frac{\sum_{i=1}^N |R_i - G_i|}{\sum_{i=1}^N G} \quad (1)$$

3. 분석 결과

앞서 언급한 바와 같이 빔의 직진성과 지구 곡률에 의해 빔이 전파하면서 거리와 고도에 따른 오차가 복합적으로 발생한다. 따라서 복합된 오차에서 거리와 고도오차를 분리하기 위해서는 거리에 대한 오차가 일정한(또는 미미한) 인자를 기준으로 고도오차만을 추정해야한다. 반사도 Z의 경우는 관측 고도와 거리에 따른 오차가 중첩되어 나타나나, 비차등 위상차 KDP는 단위 거리당 위상차의 비율이므로 거리에 따른 오차

는 미미하다. 거리가 멀어짐에 따라 고도도 높아지기 때문에 강수추정 불확실도의 거리와 고도에 따른 성분을 구분하는 것은 매우 어려운데, 거리에 대한 불확실도 성분이 매우 작은 KDP를 이용한다면 이론적으로 분리가 가능하다. 따라서 이를 기본 가정으로 하여 Z와 KDP 관계로부터 관측 고도에 따른 오차 성분만 분리하였다.

3.1 개별 레이더 거리와 고도 오차

이를 위해 앞서 제시한 22개 호우사상에 대하여, 강우레이더로부터의 거리가 멀어짐에 따라 발생하는 QPE 불확실도의 정량적 추세를 분석하였다. Tables 3~5와 Fig. 4는 관측 거리에 따른 강우레이더의 QPE 불확실도를 지상 우량계 대비 오차(%)로 산정한 결과로, R(JPL) 알고리즘을 이용한 QPE의 경

Table 3. NE of R(JPL) as a function of beam distance from radar

Elevation angle (No.)	NE (%) estimated from the beam distance of radar station					
	10 km	25 km	50 km	75 km	100 km	125 km
EA6	80.9	86.8	96.8	108.2	125.2	207.1
EA5	85.8	85.8	86.0	88.8	104.6	163.2
EA4	80.8	80.8	82.0	86.9	100.1	127.8
EA3	76.4	76.4	77.0	80.0	88.5	107.8
EA2	81.0	81.0	81.1	82.1	86.5	100.6
EA1	100.4	101.3	106.9	120.6	145.1	183.0

Table 4. NE of R(Z) as a function of beam distance from radar

Elevation angle (No.)	NE (%) estimated from the beam distance of radar station					
	10 km	25 km	50 km	75 km	100 km	125 km
EA6	172.8	182.6	198.4	216.4	238.2	336.1
EA5	181.5	181.5	181.9	186.0	209.4	296.3
EA4	173.5	173.9	177.3	188.5	212.9	256.8
EA3	166.0	166.1	167.9	175.1	193.8	232.0
EA2	163.3	163.3	163.9	167.8	181.4	218.7
EA1	181.3	181.6	185.8	203.7	251.5	351.2

Table 5. NE of R(KDP) as a function of beam distance from radar

Elevation angle (No.)	NE (%) estimated from the beam distance of radar station					
	10 km	25 km	50 km	75 km	100 km	125 km
EA6	51.4	51.4	51.4	52.1	55.7	67.8
EA5	45.8	46.1	47.5	50.8	56.5	65.1
EA4	43.9	44.2	45.6	48.4	53.0	59.5
EA3	41.9	41.9	42.4	44.1	48.1	55.7
EA2	41.5	41.5	41.5	41.7	42.8	47.1
EA1	51.7	48.4	46.5	45.6	45.1	44.7

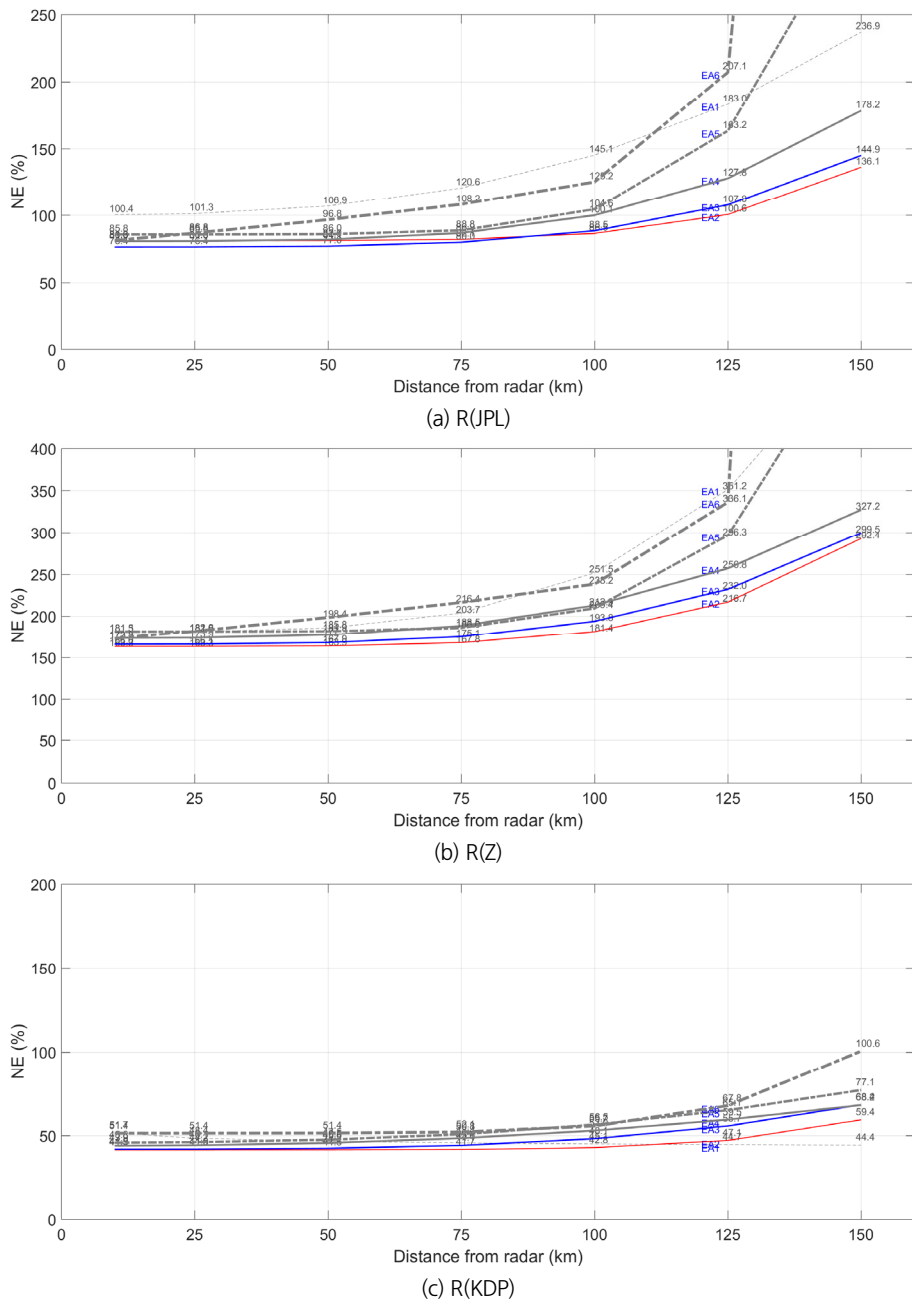


Fig. 4. Standard Errors for distance at each elevation angle. Thin dotted line (EA1), solid red line (EA2), solid blue line (EA3), solid black line (EA4), black dotted line (EA5), thick black dotted line (EA6)

우 강우레이더로부터의 거리가 증가함에 따라 오차가 증가하는 경향이 나타났다. 거리에 따른 표준 오차(Normalized Error, NE)는, QPE 알고리즘(또는 레이더 관측변수)에 따라 변동 정도에 차이가 있지만, 거리에 따라 표준 오차의 증감 경향성은 75 km 이상부터 증가가 시작하여 100 km 이상에서는 급격히 증가하는 추세를 보였다. 관측거리가 멀어짐에 따라 강우레이더의 관측 불확실도는 일정하게 증가하고 특히 100

km 이상에서는 급격히 증가하므로, 정확한 QPE의 유효 관측 반경은 100 km 이내로 설정함이 적절한 것으로 판단된다. 반사도를 사용하는 QPE인 R(JPL)과 R(Z)의 경우, 지상에서 가까운 1번째 고도각에서 지상에서 먼 2번째와 3번째 고도각에 비해 상대적으로 오차가 매우 크게 나타나는데, 이는 1번째 고도각의 경우 지형지물에 의한 빔 차폐가 오차 증가의 주 원인으로 추정된다.

그런데 R(KDP)의 경우 1번째 고도각의 경우에도 거리에 따라 QPE 불확실도가 거의 일정하게 나타났다. 이는 거리에 따른 감쇄 영향을 받지 않는 KDP의 특성을 잘 나타낸 결과로,

거리에 따른 KDP의 경우 거리에 따른 불확실도는 거의 일정하게 볼 수 있어 이를 기준으로 한다면 거리와 고도 복합 오차에서 고도 오차를 분리할 수 있다.

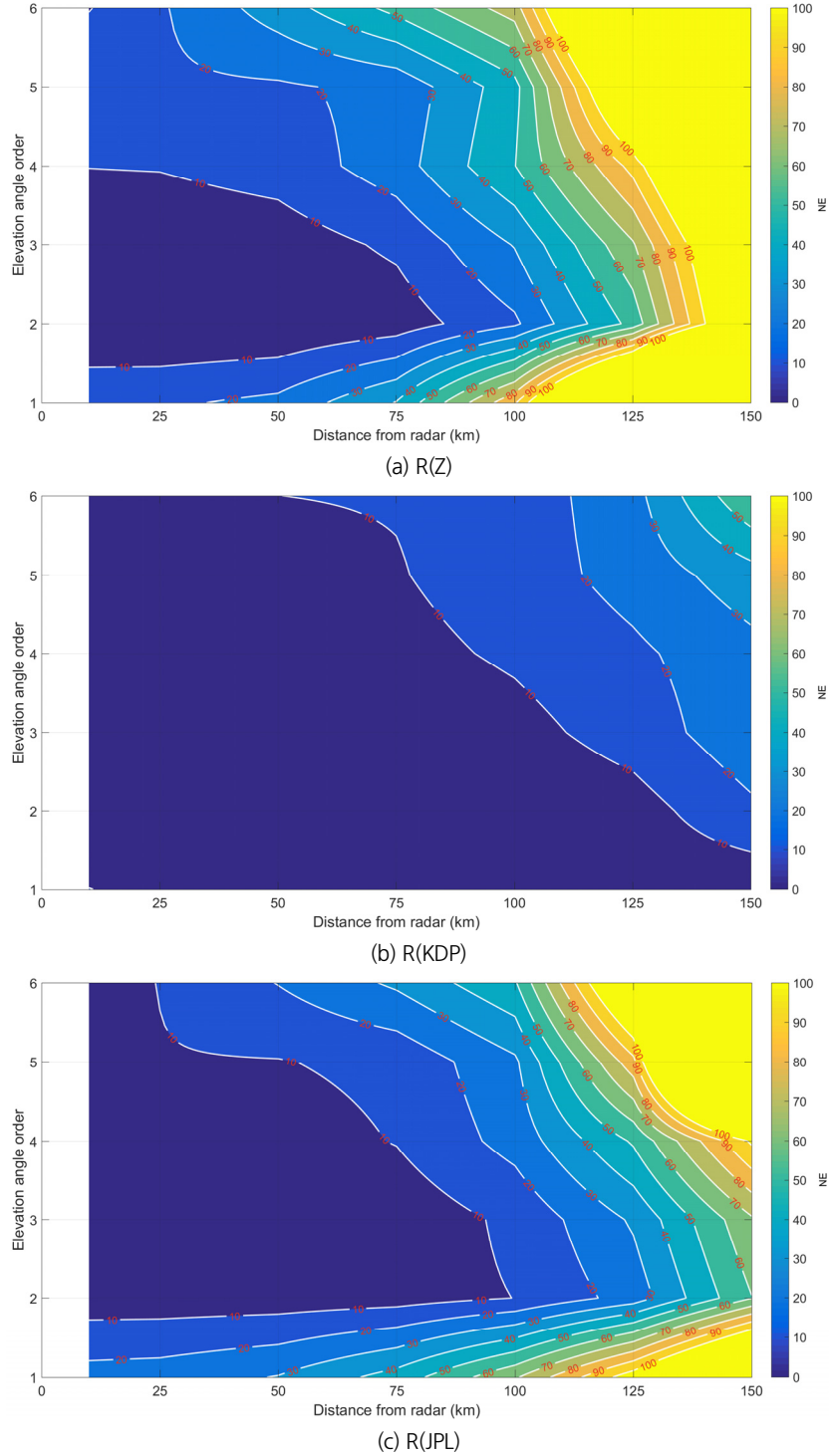


Fig. 5. Distribution of Standard Error (NE) of QPE by Distance from the radar and elevation angle (HRFCO and MLIT, 2017; HRFCO and ME 2018, 2019, 2020, 2021)

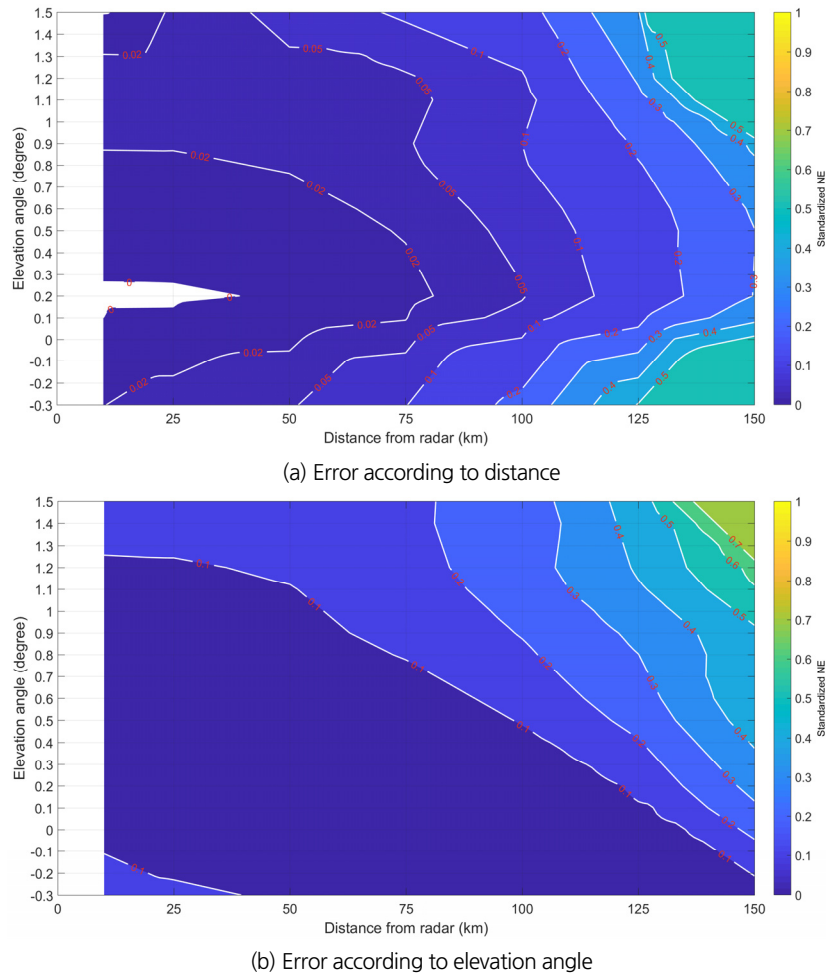


Fig. 6. Distance and altitude error of QPE for each standard basin based on measurements (HRFCO and MLIT, 2017; HRFCO and ME 2018, 2019, 2020, 2021)

Fig. 5는 R(Z), R(KDP), 그리고 R(JPL)에 대한 관측 거리와 관측 고도각에 따른 상대 오차의 최소 편의를 기준으로 표준 오차를 조정(최소 편의를 0으로 조정)하여 나타낸 그림으로, R(Z), R(KDP), 그리고 R(JPL)에 대한 관측 거리와 관측 고도각에 따른 표준 오차 분포를 나타낸다. R(Z) 상대적으로 표준 오차가 크게 나타나고, 근거리에서(약 75 km 이내)는 2, 3번째 고도각에서 표준 오차가 작게 나타나고 있으며, 약 100 km 이상의 거리에서는 표준 오차가 급격히 크게 증가한다. R(KDP) 전체적으로 표준 오차가 작고 우상단으로 갈수록 오차가 증가하는 경향을 보여, R(KDP)에서 관측 거리에 따라 발생하는 오차는 상대적으로 미미하므로 관측 고도에 따른 오차가 지배적인 것으로 추정된다. R(JPL)는 R(Z)와 전체적으로 비슷한 분포를 나타내나, R(Z)에 비해 표준 오차가 작게 나타났다.

Fig. 6은 Fig. 5의 결과에서 관측 거리에 따른 오차가 매우 작은 R(KDP)를 기준으로 관측 거리에 따른 오차와 고도에 따

른 오차를 분리하여 표준화[Z-score]한 결과이다. 거리에 대한 오차는 레이더 평균적으로 100 km까지는 대략 10% 이하, 150 km 이상에서는 30%를 초과하는 것으로 나타났다. 고도에 대한 오차는 레이더 운영 고도각 평균을 기준으로 2번째 고도각까지는 대략 10% 이하, 3번째 이상에서는 20%, 4번째 고도각 이상에서는 50% 초과하는 것으로 나타났다.

3.2 관측망 중첩 고려 거리와 고도 오차 분포

5개 강우레이더 합성 시 850개 표준유역별 거리와 고도에 따른 오차를 산정하였다(Fig. 7). 개별 레이더 기반으로 추정된 거리와 고도각 오차를 이용하여 실무 활용이 용이하도록 5개 강우레이더의 합성 관측망 최저 고도각을 기준으로 거리와 고도의 오차특성을 합성하여 표준유역별로 유역평균 거리오차와 고도오차 특성을 유도하였다.

합성 관측망 구성시 대부분 거리 100 km 이내, 고도각 2번

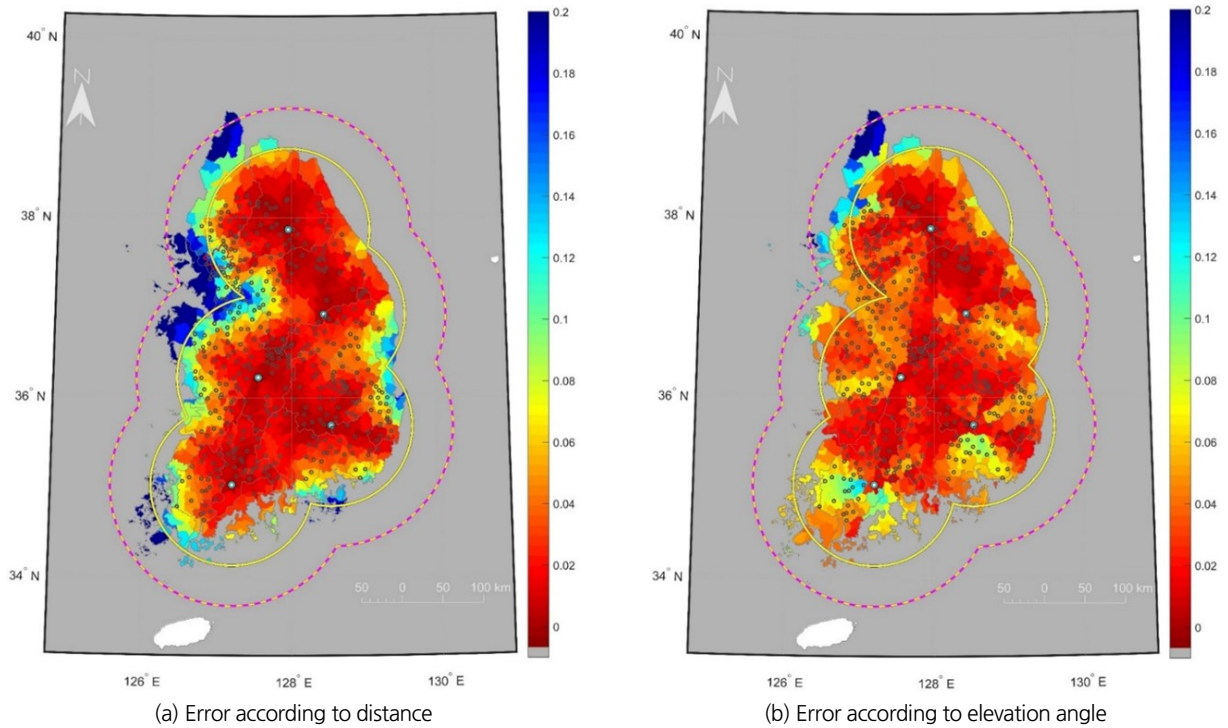


Fig. 7. Distance and altitude error of QPE for each Standard basin estimated from 5 rainfall radars

째 이하 관측 가능한 것으로 나타났다. 개별 강우레이더가 아닌 합성 관측망 고려시 레이더 간 상호 보완 작용으로 관측 최저 고도각이 개별에 비해 낮아져, 개별 강우레이더의 경우 고도가 거리에 비해 오차가 크게 변동했으나 강우레이더 합성의 경우 거리가 고도에 비해 크게 변동하는 것으로 나타났다.

4. 결론

홍수예보에 활용하기 위해 강우레이더의 시공간적 관측 장점을 살려 지상강우량과 정합성 높은 QPE 추정을 위한 지형적, 수문학적 관측 환경의 한계를 극복하기 위한 방법에 대한 연구와 이러한 한계 조건으로 인해 집중호우 관측의 정량적 불확실도를 홍수해석 측면에서 규명하여야 한다. 이러한 배경에서 본 연구에서는 비슬산(BSL), 소백산(SBS), 가리산(GRS), 모후산(MHS), 서대산(SDS) 강우레이더 각각에 대하여 2016년 22개 주요 호우사상을 분석하여 관측 거리와 고도에 따른 관측의 불확실도를 정량화하고 오차지도를 유도하였다. 분석결과 강우레이더 평균적으로 100 km까지는 대략 10% 이하, 150 km 이상에서는 30%를 초과하는 것으로 나타났다. 고도에 대한 오차는 레이더 운영 고도각 평균을 기준으로 2번

째 고도각까지는 대략 10% 이하, 3번째 이상에서는 20%, 4번째 고도각 이상에서는 50% 초과하는 것으로 나타났다. 본 연구를 통하여 홍수예보를 위한 강수량 추정 정확도 향상 방법, 관측전략 운영 방법, 관측 취약성 보완 방법 등 현행 강우레이더 관측 및 활용의 문제를 해결할 수 있는 과학적 해석 근거가 마련되었다. 그리고 이러한 불확실도를 최소화하기 위한 방향으로 관측전략 및 관측 반경 등을 설정하여 강우레이더 관측 및 자료처리 과정을 최적화 한다면 보다 안정적이고 정확한 홍수 시 강수량 추정이 가능할 것으로 기대된다. 특히 본 연구에서는 거리와 고도 오차를 실측으로부터 정량화하여 제시했으므로 개별레이더 합성장이나 레이더 간 합성장 산정에 있어 오차를 최소화하는 레이더 및 각 레이더의 관측 고도각 설정에 유용하게 활용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부 기후변화대응 AI기반 풍수해 위험도 예측기술개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2022-MOIS61-002).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Austin, P.M. (1987). "Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall." *Monthly Weather Review*, Vol. 115, No. 5, pp. 1053-1070.
- Borga, M. (2002). "Accuracy of radar rainfall estimates for streamflow simulation." *Journal of Hydrology*, Vol. 267, No. 1-2, pp. 26-39.
- Butts, M.B., Payne, J.T., Kristensen, M., and Madsen, H. (2004). "An evaluation of the impact of model structure on hydrological modelling uncertainty for streamflow simulation." *Journal of Hydrology*, Vol. 298, No.1-4, pp. 242-266.
- Carpenter, T.M., and Georgakakos, K.P. (2004). "Impacts of parametric and radar rainfall uncertainty on the ensemble streamflow simulations of a distributed hydrologic model." *Journal of Hydrology*, Vol. 298, No. 1-4, pp. 202-221.
- Ciach, G.J., Krajewski, W.F., and Villarini, G. (2007). "Product-error-driven uncertainty model for probabilistic quantitative precipitation estimation with NEXRAD data." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 8, No. 6, pp. 1325-1347.
- Germann, U., Galli, G., Boscacci, M., and Bolliger, M. (2006). "Radar precipitation measurement in a mountainous region." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A Journal of the Atmospheric Sciences, Applied Meteorology and Physical Oceanography*, Vol. 132, No. 618, pp. 1669-1692.
- Han River Flood Control Office (HRFCO) (2015). *Partially supplemented rainfall radar master plan*.
- Han River Flood Control Office (HRFCO) and Ministry of Environment (ME) (2018). *Evaluation of hydrological usability and establishment of utilization system of rainfall radar (III)*.
- Han River Flood Control Office (HRFCO) and Ministry of Environment (ME) (2019). *Evaluation of hydrological usability and establishment of utilization system of rainfall radar (IV)*.
- Han River Flood Control Office (HRFCO) and Ministry of Environment (ME) (2020). *Evaluation of hydrological usability and establishment of utilization system of rainfall radar (V)*.
- Han River Flood Control Office (HRFCO) and Ministry of Environment (ME) (2021). *Evaluation of hydrological usability and establishment of utilization system of rainfall radar (VI)*.
- Han River Flood Control Office (HRFCO) and Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT) (2017). *Evaluation of hydrological usability and establishment of utilization system of rainfall radar (II)*.
- Hossain, F., Anagnostou, E.N., Dinku, T., and Borga, M. (2004). "Hydrological model sensitivity to parameter and radar rainfall estimation uncertainty." *Hydrological Processes*, Vol. 18, No. 17, pp. 3277-3291.
- Hunter, S.M. (1996). "WSR-88D radar rainfall estimation: Capabilities, limitations and potential improvements." *National Weather Digest*, Vol. 20, No. 4, pp. 26-38.
- Krajewski, W.F., and Georgakakos, K.P. (1985). "Synthesis of radar rainfall data." *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 5, pp. 764-768.
- Krajewski, W.F., and Smith, J.A. (2002). "Radar hydrology: rainfall estimation." *Advances in Water Resources*, Vol. 25, No. 8-12, pp. 1387-1394.
- Krajewski, W.F., Raghavan, R., and Chandrasekar, V. (1993). "Physically based simulation of radar rainfall data using a space time rainfall model." *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 32, No. 2, pp. 268-283.
- Marshall, J.S., and Palmer, W.Mc.K. (1948). "The distribution of raindrops with size" *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 5, No. 4, pp. 165-166.
- Rico-Ramirez, M.A., Cluckie, I.D., Shepherd, G., and Pallot, A. (2007). "A high-resolution radar experiment on the island of Jersey." *Meteorological Applications: A Journal of Forecasting, Practical Applications, Training Techniques and Modelling*, Vol. 14, No. 2, pp. 117-129.
- Ryzhkov, A.V., Giangrande, S.E., and Schuur, T.J. (2005). "Rainfall estimation with a polarimetric prototype of WSR-88D." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 44, No. 4, pp.502-515.
- Wilson, J.W., and Brandes, E.A. (1979). "Radar measurement of rainfall - A summary." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 60, No. 9, pp. 1048-1060.