



KICT X밴드 이중편파레이더의 레이더 강우량에 대한 정량적 평가

Quantitative Assessment on the Radar Rainfall of KICT X-band Dual-polarization Radar

윤정수* · 황석환** · 이동률*** · 오병화****

Yoon, Jungsoo*, Hwang, Seok-Hwan**, Lee, Dong-Ryul***, and Oh, Byung-Hwa****

Abstract

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) introduced X-band dual-polarization radar (KICT hydrological radar) in September 2013 to observe the heavy rainfall in urban area. It has been known that X-band dual-polarization radar is good for the observation of the heavy rainfall because the radar can provide data with high spatial-temporal resolution. This study estimated the radar rainfall by using the specific differential phase (K_{DP}) from KICT hydrological radar and quantitatively assessed the radar rainfall. Forty two rain events were applied and eighty AWSs within the radar observational range were used for the assessment. As a result, there was no bias in the radar rainfall estimated by K_{DP} . The accuracy of the radar rainfall was more than 50 % and the accuracy on the close range from 5 to 20 km was more than 60 %. Also, it has found that X-band dual-polarization radar was useful for the observation of the heavy rainfall than the small rainfall because the accuracy increased as the radar rainfall increase.

Key words : KICT Hydrological Radar, X-band Dual-polarization Radar, Radar Rainfall, Heavy Rainfall

요 지

한국건설기술연구원(KICT)은 도시 지역에서의 집중 호우 감시를 위해 2013년 9월에 X밴드 이중편파레이더(KICT 수문레이더)를 도입하였다. X밴드 이중편파레이더는 시공간적으로 고해상도의 관측자료를 제공하여 도시 지역에서의 집중 호우 감시에 탁월한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 KICT 수문레이더로부터 제공되고 있는 비차등위상차(K_{DP})를 이용하여 레이더 강우량을 추정하였고 레이더 강우량에 대한 정량적 검증 실시하였다. 이를 위해 2013년부터 2016년까지 관측된 총 42개의 강우사례를 적용하였고 레이더 관측반경 40 km 내에 위치한 80개의 AWS를 이용하였다. 그 결과 KDP로 추정된 레이더 강우량의 편차는 거의 없는 것으로 나타났다. 정확도는 50% 이상으로 나타났으며, 근거리 영역인 5-20 km 영역에서의 정확도는 60% 이상의 수준으로 나타났다. 또한 강우의 세기가 커질수록 정확도가 높아지는 것으로 나타나 X밴드 이중편파레이더는 강우의 크기가 작은 호우 보다 큰 호우에서 우수한 것으로 나타났다.

핵심용어 : KICT 수문레이더, X밴드 이중편파레이더, 레이더 강우량, 집중 호우

*교신저자, 정회원, 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 연구원(Tel: +82-31-995-0851, Fax: +82-31-910-0251, E-mail: jungsooyoon@kict.re.kr)
Corresponding Author, Member, Researcher, Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

**정회원, 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 수석연구원(E-mail: sukany@kict.re.kr)

Member, Senior Researcher, Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

***정회원, 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 선임연구원(E-mail: dryi@kict.re.kr)

Member, Senior Research Fellow, Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

****정회원, 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 연구원(E-mail: joayoi@kict.re.kr)

Member, Researcher, Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

1. 서론

원거리에서의 악기상 관측, 시공간적으로 고해상도 관측 자료의 제공, 대기수상체에 대한 다양한 정보 제공 등의 다양한 장점으로 기상레이더는 기상 및 수문 분야에서 큰 역할을 할 것으로 기대되어 왔다. 국내에서는 세 기관(기상청, 국토교통부, 국방부)이 100km 이상의 장거리 관측이 가능한 S 및 C 밴드 단일 또는 이중편파 레이더를 도입하였고 각 기관의 도입 목적과 활용에 따라 레이더 명칭과 관측 전략을 다르게 적용하고 있다. 기상청과 국방부는 기상레이더의 본 명칭을 그대로 사용하고 있으며 국토교통부는 기상 관측 보다는 대하천에서의 홍수 감시를 목적으로 하고 있어 강우레이더로 칭하고 있다. 강수의 세기 뿐 만 아니라 강수의 발생 및 소멸과 강수의 종류에도 관심이 큰 기상청에서는 저고도에서 고고도까지의 레이더 관측 전략을 적용하고 있는 반면 홍수 감시를 위한 강우의 세기에만 관심이 큰 국토교통부는 저고도에서의 레이더 관측 전략만을 적용하고 있다.

국방부 6기 레이더와 기상청 면봉산레이더, 국토교통부 임진강레이더를 제외한 기상청 9기 레이더와 국토교통부 6기의 레이더는 모두 S밴드 단일 및 이중편파레이더이다. 국토교통부는 이미 6기의 레이더가 모두 S밴드 이중편파레이더로 도입되었고 기상청은 2010년까지 기 도입된 S밴드 단일편파레이더를 2019년까지 S밴드 이중편파레이더로 교체 완료할 예정이다. 그러나 국내 S밴드 단일편파 레이더로부터 제공돼 왔던 레이더 강우량은 우량계 강우량과 비교하여 정량적으로 매우 과소하다는 문제가 있어왔으며, 이에 다양한 보정 방법이 도입되어 레이더 강우를 보정하여 왔다 (Ahn and Kim, 2003; Suk et al., 2005; Kim et al., 2013; Yoo et al., 2013). 이러한 상황에서 국내 기상 및 수문학자들은 S밴드 이중편파레이더가 도입되면 이러한 레이더강우의 과소 문제가 해결 될 것이라 생각하였다. 그러나 S-밴드 이중편파레이더에서도 레이더강우의 정확도는 편파변수에 대한 조절 없이는 단일편파레이더와 비슷한 수준으로 나타났다(Yoon et al., 2016).

한국건설기술연구원은 2004년 9월에 도시지역에서의 집중 호우를 감시하기 위하여 C밴드 단일편파레이더를 도입하여 수문레이더(이하 KICT 수문레이더)로 칭하고 있다(건설교통부, 2005). 이후 2013년 9월에는 X밴드 이중편파레이더를 도입하여 현재까지 도시 홍수 감시를 위해 운영 중에 있다. KICT 수문레이더는 도시에서의 이상 강우에 대한 빠른 감시를 위해 두 개의 주 고도각으로 운영되고 있다. X밴드 이중편파레이더인 KICT 수문레이더는 S밴드 이중편파레이더에 비해 더 높은 시공간해상도의 자료를 제공하고 있다. 높은 시공간 해상도를 제공한다는 점에서 X밴드 이중편파레이더는 도시유역에서의 홍수 감시에 매우 유리하다 (Smith et al., 2007; Bruni et al., 2015; Chen and Chandrasekar,

2015; Yoon et al., 2017). 또한 KICT 수문레이더는 이중편파 레이더이기 때문에 다양한 편파변수들을 생산하고 있어 대기수상체에 대한 다양한 정보를 제공하고 있다.

X밴드 이중편파레이더의 또 다른 장점은 비차등위상차(K_{DP})이다. S밴드 단일편파 레이더의 대표적인 변수인 반사도(Z)는 감쇄와 부분차폐 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있으며, 이는 레이더 강우의 과소 추정 문제의 원인이 되고 있다(Austin, 1987; Ryzhkov and Zrníc, 1995b). 이에 비해 K_{DP} 는 위상정보인 차등위상차(Φ_{DP})의 거리 미분으로 추정되며 이 두 변수들은 위상 정보이기 때문에 감쇄나 부분차폐의 영향을 받지 않는다는 장점을 가지고 있다(Ryzhkov and Zrníc, 1995a; Zrníc and Ryzhkov, 1999). 또한 K_{DP} 는 큰 강우영역에서 정확도가 매우 높은 레이더 강우를 생산하는 것으로 알려져 있다(Sachidananda and Zrníc, 1986; Chandrasekar et al., 1990). K_{DP} 는 강우강도와 선형적으로 관련되어 있으며 이러한 점으로부터 다양한 K_{DP} 를 이용한 강우 강도 알고리즘이 제시되었다(Humphreys, 1974; Jameson, 1985; Sachidananda and Zrníc, 1986; Chandra et al., 1990).

본 연구에서는 KICT 수문레이더의 K_{DP} 로 추정된 레이더 강우량에 대한 정량적 검증에 실시하였다. 이를 위해 2013년 도입 이후 2016년까지 관측된 총 42개의 강우사례를 적용하였으며 레이더 반경 내에 존재하는 총 80개의 AWS를 사용하였다.

2. 적용자료

한국건설기술연구원은 Fig. 1(a)와 같은 X밴드 이중편파 레이더를 운영 중에 있다. KICT 수문레이더는 안테나 직경 1.8 m에 불과한 소형레이더로 관측반경은 40 km이다(Fig. 1(b)). 이중편파레이더는 반사도만을 제공하였던 단일편파 레이더와 다르게 다양한 편파변수들을 제공하여 대기수상체의 다양한 정보를 추출할 수 있다. 또한 X밴드 레이더는 C 및 S 밴드레이더 보다 시공간적으로 높은 해상도 자료를 제공할 수 있어 도시지역에서의 집중 호우 감시에 탁월한 것으로 알려져 있다.

KICT 수문레이더는 경기도 고양시 한국건설기술연구원에 위치하고 있다(Fig. 2(a)). 레이더 강우량의 정확도 및 오차를 검증하기 위해 Fig. 2(b)와 같이 관측반경 40 km 내에 위치한 80개의 AWS를 이용하였다. KICT 수문레이더는 호우의 수평관측을 위해 두 개의 주 고도각(5.0°와 6.0°)을 이용하여 PPI 관측을 하고 있으며 호우의 수직관측을 위해 18°마다 RHI 관측을 실시하고 있다. 본 연구에서는 레이더 강우 추정을 위해 PPI 5.0°자료를 적용하였다. 또한 레이더 강우량과 우량계 강우량의 비교를 위해 2013년부터 2016년까지 총 42개의 호우사례를 적용하였다(Table 1).

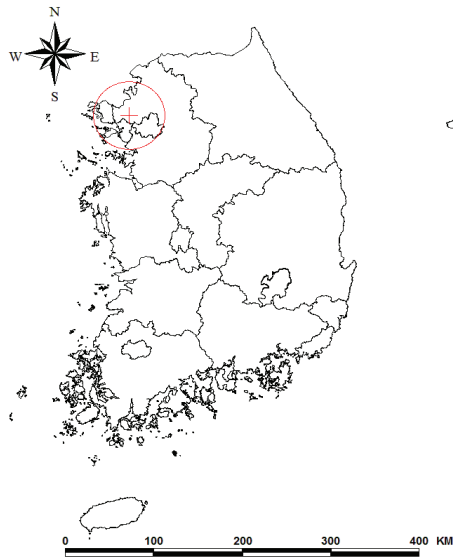


(a) KICT hydrological radar

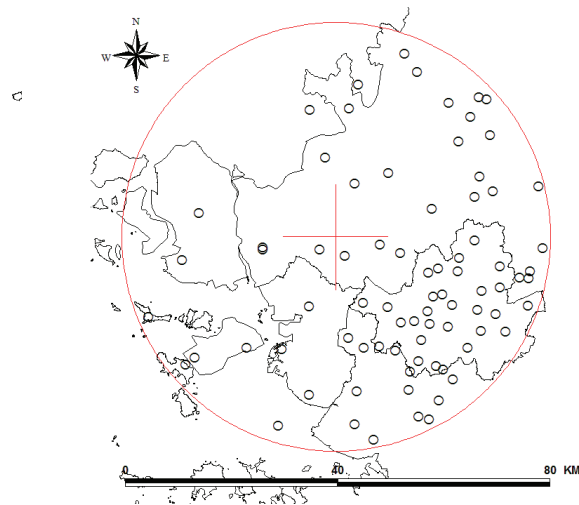
Manufacturer	RLI(U.S.)
Antenna diameter(m)	1.8
3-dB beam width(°)	1.4
Transmitting tube	Klystron
Band	X
Transmitting frequency(MHz)	9,410
Peak power(kW)	25
Observational range(km)	40

(b) Specifications

Fig. 1. Introduction of KICT Hydrological Radar



(a) Location of KICT hydrological radar



(b) AWSs within observational range

Fig. 2. Location of KICT Hydrological Radar and AWSs Applied in this Study

Table 1. Applied Rainfall Events

Year	No	Date (Month/Day)
2013	5	09/10, 09/11, 09/13, 09/14, 09/29
2014	10	06/10, 07/02, 07/22, 07/23, 07/24, 07/25, 08/21, 08/22, 09/02, 10/20
2015	13	05/11, 05/12, 06/11, 06/14, 06/26, 07/12, 07/13, 07/23, 07/24, 07/25, 07/26, 08/02, 10/27
2016	14	05/02, 05/03, 05/06, 05/24, 06/15, 06/22, 07/01, 07/04, 07/05, 07/16, 07/29, 09/27, 10/02, 10/03

3. 레이더 강우 강도 추정 알고리즘 및 통계 검증값

KICT 수문레이더의 레이더 강우 강도는 Table 2와 같은 두 X밴드 이중편파레이더 강우 강도 추정 알고리즘으로

추정되었다. R1 식은 Chen et al.(2016)에서 적용한 X밴드 이중편파레이더 강우 강도 추정 알고리즘이며 R2는 Wang and Chandraseker(2010)에서 적용한 X밴드 이중편파레이더 강우 강도 추정 알고리즘이다. KICT 수문레이더는 X밴드 이중편파레이더이기 때문에 강우 강도 추정 시 K_{DP} 만을

적용하고 있다. 물론 다른 두 편파변수인 Z , Z_{DR} 을 이용하여 강우 강도 추정을 할 수 있으나 X밴드 이중편파레이더는 감쇄 영향으로 보통 레이더 강우 강도 추정 시 K_{DP} 만을 이용하고 있다. 추정된 레이더 강우 강도는 통계 검증을 위해 강우계와 비교 시 샘플링 오차를 최소화 하기 위해 60분 누적 강우량으로 변환하였다.

Table 2. Algorithms to Estimate Radar Rain Rate

Name	Algorithm	Reference
R1	$R(K_{DP}) = 23.7 \times K_{DP}^{0.87}$	Chen et al.(2016)
R2	$R(K_{DP}) = 18.15 \times K_{DP}^{0.791}$	Wang and Chandraseker(2010)

Table 3. Statistical Measure

Mean Error (ME)	$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - G_i)$
Bias (BS)	$BS = \frac{\sum_{i=1}^N R_i}{\sum_{i=1}^N G_i}$
Mean Absolute Error (MAE)	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i - G_i $
Root Mean Square Error (RMSE)	$SE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - G_i)^2$
1 - Normalized Error (1-NE)	$1 - NE = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N R_i - G_i }{\sum_{i=1}^N G_i}\right) \times 100$
Correlation Coefficient (CC)	$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})(G_i - \bar{G})}{\{(n-1)\sigma_R \sigma_G\}}$

본 연구에서는 레이더 강우량의 정량적 검증을 위해 Table 3과 같은 통계 검증값을 사용하였다. Table 3에서 ME 및 BS는 자료의 편의를 확인하기 위한 검증값으로 ME는 관측값과 참값의 차이 형태의 편의를, BS는 두 값의 비 형태로 편의를 제공한다. 이에 ME는 0에 가까울수록, BS는 1에 가까울수록 편의가 적음을 의미한다. MAE와 RMSE는 편의와 오차 변동성을 모두 포함하는 검증값으로 0에 가까울수록 오차가 적음을 의미한다. NE 역시도 MAE와 RMSE와 같이 편의와 오차 변동성을 모두 포함하나 참값으로 정규화된 검증값이다. 본 연구에서 적용된 1-NE는 1에서 NE를 뺀 후 100을 곱하여 백분율화한 것으로 오차 보다는 정확도 개념의 검증값이다. 이에 1-NE는 100%에 가까울수록 정확도가 높음을 의미한다. 또한 상관계수인 CC가 참값과 관측값의 상관정도를 파악하기 위해 적용되었다.

4. KICT 수문레이더 강우량의 평가

Table 4는 KICT 수문레이더 강우량의 정확도 및 오차 검증값을 나타낸다. 표에서와 같이 R1 알고리즘의 정확도는 전체 강우사례에 대해 51.6% 수준으로 나타나고 있으며

R2 알고리즘의 정확도는 이보다 약간 낮은 50.7%의 수준으로 나타났다. 편의 수준을 나타내는 ME 및 BS 결과로 보아 두 알고리즘 모두 편의는 거의 없는 것으로 나타났으나 R1 알고리즘의 편의가 R2 알고리즘의 편의보다 작게 나타났다. 편의와 함께 오차의 변동성을 검증하는 MAE 및 RMSE 역시도 R1 알고리즘이 R2 알고리즘 보다 작게 나타났다. 레이더 강우량과 우량계 강우량의 상관성을 나타내는 CC는 두 알고리즘 모두 0.7 이상으로 나타났다. 42개의 총 강우사례로부터 정확도 및 오차 검증값을 확인해 본 결과 R1 알고리즘이 R2 알고리즘 보다 다소 우수한 것으로 나타났다.

Fig. 3은 60분 누적 우량계 강우량과 60분 누적 레이더 강우량의 산점도를 나타내며 이때 적용된 자료는 42개 전체 강우 사례이다. 그림에서와 같이 R1 알고리즘으로부터 추정된 레이더 강우량이 일대일 선에 더 가깝게 나타나고 있다. 즉, R1 알고리즘으로부터 추정된 레이더 강우량의 편의가 더 작게 나타나고 있다. R1 알고리즘으로부터 추정된 레이더 강우량은 R2 알고리즘으로부터 추정된 레이더 강우량과 비교하여 전체적으로 더 크게 나타나고 있다. 그러나 R1 알고리즘은 레이더 강우량의 편의를 다소 경감시키고 있지만 작은 강수영역에서 강우량을 과대하게 추정하고 있다.

Fig. 4는 각 호우사상에 따른 레이더 강우량의 정확도를 나타낸다. 그림에서와 같이 레이더 강우량의 정확도는 강우 사례에 따라 변동하고 있으며 두 알고리즘 모두 평균적으로 대략 50% 수준을 보이고 있다. 강우량 정확도의 변동폭은 R1 알고리즘이 R2 알고리즘 보다 크게 나타나고 있다. 즉, R1 알고리즘의 정확도는 최소 -10%에서 최대 70%의 수준을 나타내고 있는 반면, R2 알고리즘은 최소 10%에서 최대 60% 수준을 나타내고 있다. R1 알고리즘에서 음의 정확도를 보이는 사례도 있으며 이는 레이더 강우량이 우량계 강우량 보다 크게 추정되었기 때문이다. 호우사상 전체적으로 R1 알고리즘 정확도는 R2 알고리즘의 정확도 보다 약간 더 우수한 것으로 보이고 있으나 호우사례에 따른 정확도의 변동폭은 오히려 더 크게 나타나고 있다.

Table 4에서와 같이 R1 알고리즘은 통계적 지표상으로 R2 알고리즘에 비해 우수하게 나타나고 있다. R1 알고리즘으로부터 추정된 레이더 강우량은 편의를 나타내는 ME는 거의 0에 가깝게 나타나고 있으며 BS는 1에 가깝게 나타나고 있어 편의가 거의 없는 것으로 나타나고 있다. 또한 오차의 변동성을 나타내는 MAE와 RMSE 역시도 R1으로부터 추정된 레이더 강우량이 더 작게 나타나고 있다. 두 강우량의 상관성을 나타내는 상관계수인 CC와 정확도 지수인 1-NE 역시도 R1 알고리즘이 다소 우수한 것으로 나타나고 있다. 그러나 R1 알고리즘의 호우사례에 따른 정확도는 그 변동폭이 크게 나타나고 있으며, 이는 호우의 종류에 따른 알고리즘 선택의 필요성을 의미한다.

Table 4. Accuracy and Error of the Radar Rainfall

Year	Algorithm	1-NE (%)	ME (mm)	BS	MAE (mm)	RMSE (mm)	CC
2013	R1	48.3	0.535	1.127	2.180	3.697	0.783
	R2	48.9	-0.257	0.939	2.152	3.798	0.764
2014	R1	56.2	0.227	1.055	1.817	3.362	0.833
	R2	55.6	-0.561	0.865	1.846	3.281	0.837
2015	R1	45.2	0.074	1.023	1.720	3.191	0.649
	R2	46.5	-0.375	0.880	1.678	3.001	0.632
2016	R1	55.5	-0.638	0.864	2.092	3.942	0.775
	R2	52.0	-1.281	0.727	2.249	4.316	0.762
Total	R1	51.6	-0.015	0.996	1.905	3.527	0.767
	R2	50.7	-0.633	0.839	1.939	3.631	0.756

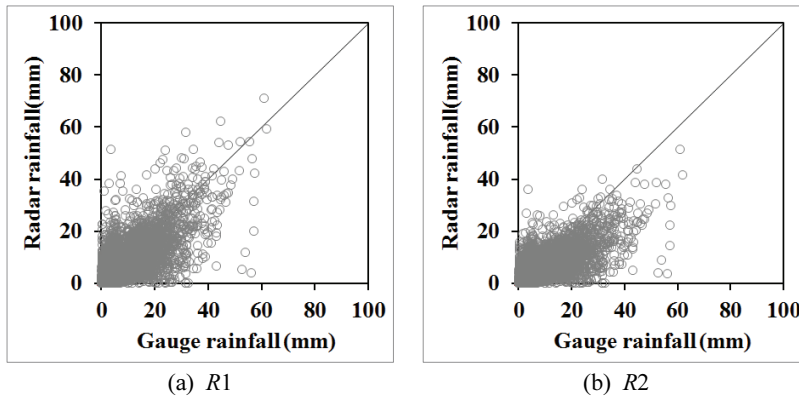


Fig. 3. Scatter Plot Between Gauge Rainfall and Radar Rainfall

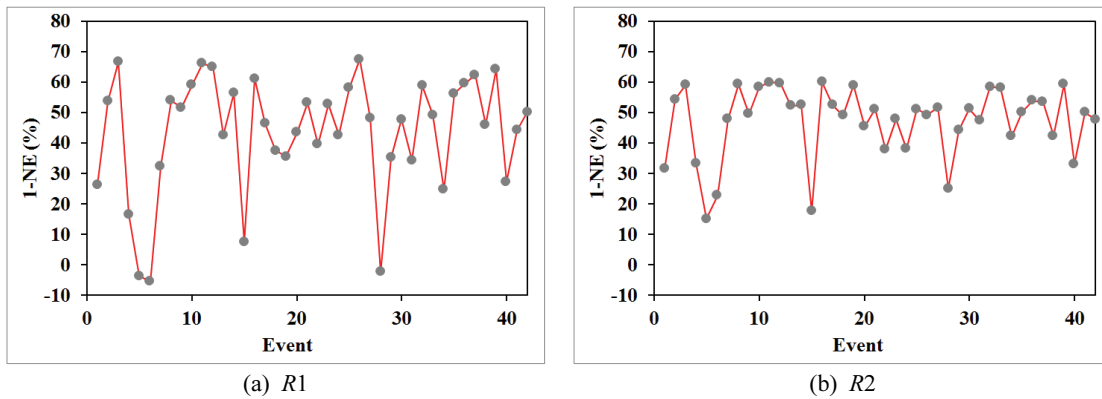


Fig. 4. Accuracy of the Radar Rainfall According to Events

5. 거리영역, 고도차 및 강우 강도의 크기에 따른 정확도 평가

Fig. 5는 거리영역에 따른 레이더 강우량의 정확도를 나타내며 Table 5는 이를 정량적으로 정리한 것이다. 그림에서와

같이 레이더 강우량의 정확도는 거리가 멀어짐에 따라 줄어드는 것으로 나타났다. 특히 근거리영역인 5~20 km에서 두 알고리즘으로 추정된 레이더 강우량의 정확도는 약 60% 정도의 수준을 보이고 있으며 원거리영역(35~40 km)에서의 정확도는 40% 이하로 나타나고 있다. 거리가 멀어짐에

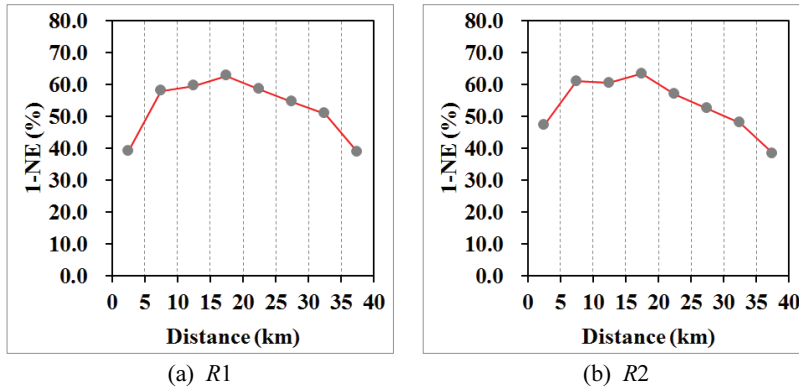


Fig. 5. Accuracy of the Radar Rainfall According to Radar Range

따라 지구곡률효과로 인해 빔의 고도가 높아지고 빔의 관측 반경이 확대되어 이러한 레이더의 거리 오차가 발생하는 것은 매우 당연한 결과이다. 물론 최근거리영역인 0~5 km 영역에서는 오히려 정확도가 50% 이하로 매우 낮게 나타나고 있는데 이는 레이더 최근거리에서 오차를 유발하는 사이드로브로 인한 결과이다.

Table 5. Accuracy of the Radar Rainfall Shown in Fig. 5

Dist(km)	I-NE (%)	
	R1	R2
0 - 5	39.2	47.3
5 - 10	58.1	61.2
10 - 15	59.6	60.6
15 - 20	62.8	63.5
20 - 25	58.5	57.1
25 - 30	54.6	52.5
30 - 35	50.9	48.1
35 - 40	38.9	38.5
Total	51.6	50.7

Fig. 6은 강우의 크기에 따른 레이더 강우량의 정확도를 나타낸다. 이때 적용된 강우의 크기는 레이더 강우량과 비교된 지상 우량계 강우량의 평균값으로 적용하였다. 그림에서와 같이 레이더 강우량의 정확도는 약 5 mm 이하에서 변동성이 크게 나타나다 강우의 크기가 커짐에 따라 60% 정도의 수준으로 수렴하는 것으로 나타났다. K_{DP} 는 작은 강수 영역에서 변동성이 크게 나타나고 큰 강수영역에서 그 정확도가 높아진다는 점에서 Fig. 6은 K_{DP} 의 특성을 잘 반영하는 결과라 할 수 있다. 이러한 결과를 고려하였을 때 X밴드 이중편파 레이더는 강우의 크기가 작은 호우보다 큰 호우에서 보다 큰 장점을 발휘할 수 있다.

Table 4의 레이더 강우량에 대한 통계적 지표에서 R1

알고리즘이 R2 알고리즘 보다 대체적으로 우수한 결과를 보이고 있었다. Fig. 6에서와 같이 R1 알고리즘은 5 mm 이상의 강우 영역에서 60% 이상의 정확도를 보이고 있으며 이는 R2 알고리즘 보다 우수한 결과이다. 반면 5 mm 이하 강우 영역에서의 R1 알고리즘 정확도는 R2 알고리즘 보다 변동성이 크게 나타나고 있으며 음의 정확도를 보이고 있다. 즉 R1 알고리즘은 R2 알고리즘에 비해 레이더 강우를 크게 추정하여 전체적인 편의 규모를 줄여주고 있으나 작은 강우역시도 크게 추정한다는 문제점이 존재한다.

Fig. 7은 레이더 빔의 고도와 우량계 고도 차이에 따른 레이더 강우량의 정확도를 나타낸다. 그림에서와 같이 고도 1-2 km 사이에서 정확도가 60% 수준을 보이고 있고 고도 차이가 커질수록 정확도는 줄어드는 것으로 나타났다. 고도 차이에 따른 레이더 강우량의 정확도는 Fig. 5의 거리영역에 따른 레이더 강우량의 정확도 결과와 거의 유사하게 나타나고 있다. 이는 KICT 수문레이더 사이트 내에서는 거리에 따른 레이더 빔 고도의 증가가 레이더 빔과 우량계 고도 간의 차이 보다 레이더 강우 오차에 더 큰 영향을 미치는 것을 의미한다.

Fig. 8은 전체 강우사례로부터 산정된 레이더 강우량 정확도의 공간적 분포를 나타낸다. 레이더 강우량 정확도의 공간적 분포는 도넛 형태로 나타나고 있다. 이는 앞서 거리영역에 따른 레이더 강우량 정확도에서와 같이 최근거리와 원거리에서의 정확도가 가장 낮고 5~20 km의 영역에서 정확도가 가장 높기 때문에 나타나는 형태이다. 또한 KICT 수문레이더의 서북 방향은 정확도가 다소 낮게 나타나고 있다. 이는 서북 방향이 서해 및 북한과 인접하고 있어 정확도 평가에 적용될 우량계가 존재하지 않기 때문이다.

6. 결론

본 연구에서는 KICT 수문레이더의 레이더 강우량에 대한 정량적 검증을 실시하였다. 이를 위해 2013년 도입 이후 2016년까지 관측된 총 42개의 강우사례를 적용하였으며

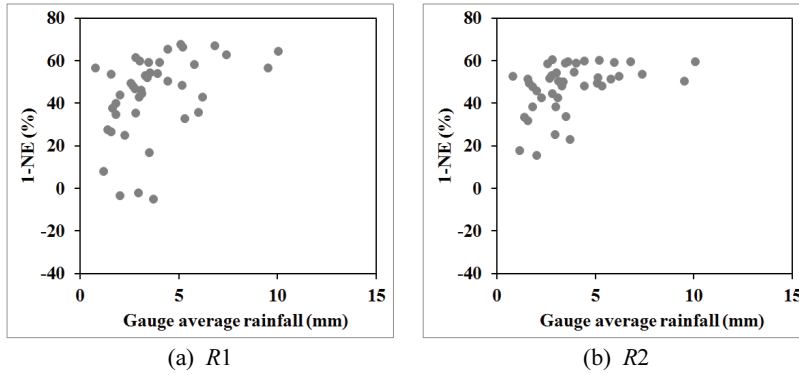


Fig. 6. Accuracy of the Radar Rainfall According to Gauge Average Rainfall

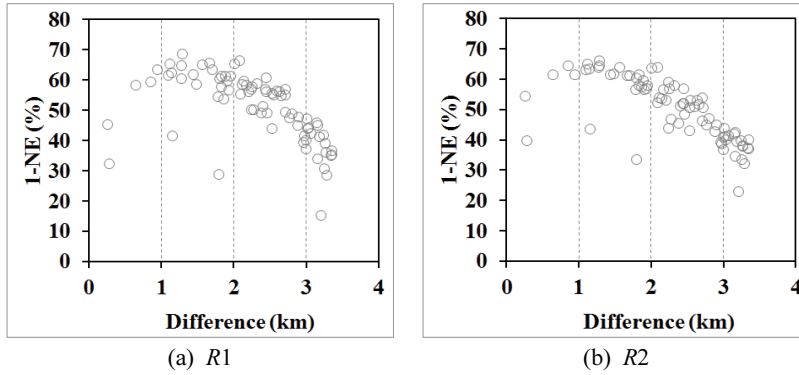


Fig. 7. Accuracy of the Radar Rainfall According to Difference Between Height of Radar Beam and Altitude of Gauge

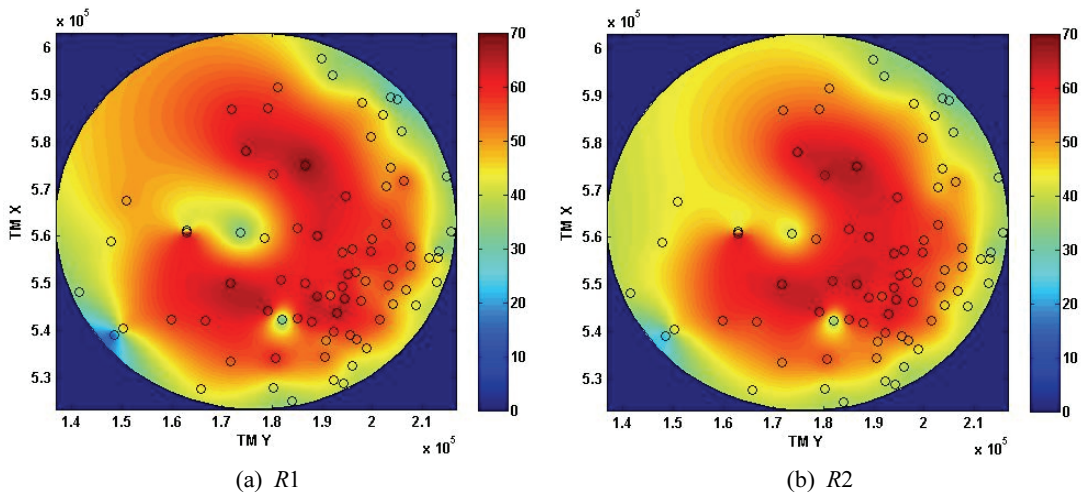


Fig. 8. Spatial Distribution of Accuracy of the Radar Rainfall

레이더 반경 내에 존재하는 총 80개의 AWS를 사용하였다. 레이더 강우 강도는 두 개의 X밴드 이중편파레이더 강우 강도 추정 알고리즘으로 추정되었다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

첫 번째, R1 알고리즘의 정확도는 전체 강우사례에 대해 51.6% 수준으로 나타나고 있었으며 R2 알고리즘의 정확도

는 이보다 약간 낮은 50.7%의 수준으로 나타났다. 편의 수준을 나타내는 ME 및 BS에서 두 알고리즘 모두 편의는 거의 없는 것으로 나타났으나 R1 알고리즘의 편의가 R2 알고리즘의 편의보다 작게 나타났다. 편의와 함께 오차의 변동성을 검증하는 MAE 및 RMSE 역시도 R1 알고리즘이 R2 알고리즘 보다 작게 나타났다. 레이더 강우량과 우량계

강우량의 상관성을 나타내는 CC는 두 알고리즘 모두 0.7 이상으로 나타났다.

두 번째, R1 알고리즘은 통계적 지표상으로 R2 알고리즘에 비해 우수하게 나타났다. 그러나 R1 알고리즘은 작은 강수영역에서 강우량을 과대하게 추정하고 있었으며 호우 사례에 따른 정확도 평가에서 그 변동폭이 크게 나타났다. 이는 호우의 종류에 따른 알고리즘 선택의 필요성을 의미한다.

세 번째, 레이더 강우량의 정확도는 거리가 멀어짐에 따라 줄어드는 것으로 나타났다. 특히 근거리영역인 5~20 km에서 두 알고리즘으로 추정된 레이더 강우량의 정확도는 약 60% 정도의 수준을 보이고 있으며 원거리영역(35~40 km)에서의 정확도는 40% 이하로 나타났다. 최근거리영역인 0~5 km 영역에서는 오히려 정확도가 50% 이하로 매우 낮게 나타났다. 이러한 거리영역에 따른 정확도로 인해 레이더 강우량 정확도의 공간적 분포는 도넛 형태로 나타났다.

네 번째, 레이더 강우량의 정확도는 약 5 mm 이하에서 변동성이 크게 나타나다 강우의 크기가 커짐에 따라 60% 정도의 수준으로 수렴하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 고려하였을 때 X밴드 이중편파레이더는 강우의 크기가 작은 호우보다 큰 호우에서 보다 큰 장점을 발휘할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원 (17AWMP-B079625-04)에 의해 수행되었습니다.

References

- Ahn, S., and Kim, J. (2003) Estimation of Z-R Relationships Between Radar Reflectivity and Rainfall Rate. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 1, pp. 13-21.
- Austin, P.M. (1987) Relation Between Measured Radar Reflectivity and Surface Rainfall. *Monthly Weather Review*, Vol. 115, No. 5, pp. 1053-1070.
- Bruni, G., Reinoso, R., van de Giesen, N.C., Clemens, F.H.L.R., and ten Veldhuis, J.A.E. (2015) On the Sensitivity of Urban Hydrodynamic Modeling to Rainfall Spatial and Temporal Resolution. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 19, pp. 691-709.
- Chandrasekar, V., Bringi, V.N., Balakrishnan, V.N., and Zrníc, D.S. (1990) Error Structure of Multiparameter Radar and Surface Measurements of Rainfall. Part III: Specific Differential Phase. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 7, No. 5, pp. 621-629.
- Chen, H., and Chandrasekar, V. (2015) The Quantitative Precipitation Estimation System for Dallas-Fort Worth (DFW) Urban Remote Sensing Network. *J. Hydrol.*, Vol. 531, pp. 259-271.
- Humphries, R.G. (1974) *Depolarization Effects at 3 GHz due to Precipitation*. Storm Weather Group Scientific Report MW-82, McGill University, Montreal, Quebec, p. 84.
- Jameson, A.R. (1985) Microphysical Interpretation of Multiparameter Radar Measurements in Rain. Part III: Interpretation and Measurement of Propagation Differential Phase Shift Between Orthogonal Linear Polarizations. *Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 42, No. 6, pp. 607-614.
- Kim, K., Kim, M., Lee, G., Kang, D., and Kwon, B. (2013) The Adjustment of Radar Precipitation Estimation based on the Kriging Method. *J. Korean. Earth Sci. Soc.*, Vol. 34, pp. 13-27.
- Ryzhkov, A.V., and Zrníc, D.S. (1995a) Comparison of Dual Polarization Radar Estimators of Rain. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 12, No. 2, pp. 249-256.
- Ryzhkov, A.V., and Zrníc, D.S. (1995b) Precipitation and Attenuation Measurements at a 10-cm Wavelength. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 34, No. 10, pp. 2121-2134.
- Sachidananda, M., and Zrníc, D.S. (1986) Differential Propagation Phase Shift and Rainfall Rate Estimation. *Radio Science*, Vol. 21, No. 2, pp. 235-247.
- Smith, J.A., Baeck, M.L., Meierdiercks, K.L., Miller, A.J., and Krajewski, W.F. (2007) Radar Rainfall Estimation for Flash Flood Forecasting in Small Urban Watersheds. *Adv. Water Resour.*, Vol. 30, pp. 2087-2097.
- Suk, M., Nam, K., Kim, Y., and Oh, S. (2005) Estimation of Quantitative Rain Intensity from Radar Reflectivities Using a Window Probability Matching Method. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 41, No. 1, pp. 123-138.
- Yoo, C., Park, C., Yoon, J., and Kim, K. (2013) Interpretation of Mean-field Bias Correction of Radar Rain Rate using the Concept of Linear Regression. *Hydrol. Process.*, Vol. 28, No. 19, pp. 5081-5092.
- Yoon, J., Joo, J., Yoo, C., Hwang, S., and Lim, S. (2017) On Quality of Radar Rainfall with Respect to Temporal and Spatial Resolution for Application to

Urban Area. *Meteorological Applications*, Vol. 24, No. 1, pp. 19-30.

Yoon, J., Seok, M-K., Nam, K-Y., Ko, J-S., and Park, J-S. (2016) Application of an Empirical Method to Improving Radar Rainfall Estimation using Cross Governmental Dual-pol. Radars. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 7, pp. 625-634.

Zmić, D.S., and Ryzhkov, A.V. (1999) Polarimetry for Weather Surveillance Radars. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 80, No. 3, pp. 389-406.

Received	October 26, 2017
Revised	October 30, 2017
Accepted	November 9, 2017

