

수도권 돌발홍수 감시를 위한 X밴드 이중편파레이더의 운영 기술 및 수문 적용성

Operation Techniques and Hydrological Applications of X-band Dual-polarization Radar for Monitoring Flash Flood in Metropolitan Area

윤정수* · 황석환** · 이동률*** · 강나래****

Yoon, Jungsoo*, Hwang, Seokhwan**, Lee, Dong-Ryul***, and Kang, Narae****

Abstract

Radar is useful for monitoring flash flood in urban areas because it provides rainfall data with high spatial and temporal resolution for a wide area. In 2014, the Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology introduced the first X-band dual-polarization radar in Korea and has subsequently been researching on flash floods in the metropolitan area using the rainfall data. Considering the various advantages of X-band dual-polarization radar, the Water Hazard Information Platform in Korea introduced two X-band dual-polarization radars (KRU and YSU radars) into the metropolitan area, in 2017. This study described the characteristics of KRU and YSU radars, their observation strategies, and quality control techniques. Moreover, we also assessed the hydrological applications of the X-band dual-polarization radars in the metropolitan area by analyzing three years of rainfall data from 2017 to 2019.

Key words : Flash Flood, X-band Dual-polarization Radar, Metropolitan Area, Hydrological Applications

요 지

레이더는 넓은 영역과 높은 시공간 해상도의 강우 자료를 제공한다는 점에서 도시지역에서의 돌발홍수 대응에 유리하다. 2014년에 한국건설기술연구원은 국내 최초로 X밴드 이중편파레이더를 도입하였고 시공간적으로 고해상도의 강우 자료를 활용하여 수도권 지역에서의 돌발홍수에 대한 연구를 진행하여 왔다. 수재해정보플랫폼 융합 기술 연구단은 X밴드 이중편파레이더의 다양한 장점에 주목하여 수도권에 2기의 X밴드 이중편파레이더(KRU 레이더와 YSU 레이더)를 2017년에 도입하였다. 본 연구에서는 KRU 레이더와 YSU 레이더의 특성 및 관측전략, 품질관리기술을 서술하고 2017년부터 2019년까지 3년간의 강우 사례를 분석하여 수도권 지역에서의 X밴드 이중편파레이더의 수문 적용성에 대하여 평가를 실시하였다.

핵심용어 : 돌발홍수, X밴드 이중편파레이더, 수도권 영역, 수문 적용성

*정회원, 한국건설기술연구원 돌발홍수연구센터 수석연구원(E-mail: jungsooyoon@kict.re.kr)

Member, Senior Researcher, Flash Flood Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

**교신저자, 정회원, 한국건설기술연구원 돌발홍수연구센터 센터장(Tel: +82-31-910-0241, Fax: +82-31-910-0251, E-mail: sukany@kict.re.kr)

Corresponding Author, Member, Managing Director, Flash Flood Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

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

Member, Senior Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

****정회원, 한국건설기술연구원 돌발홍수연구센터 수석연구원(E-mail: naraekang@kict.re.kr)

Member, Senior Researcher, Flash Flood Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

1. 서론

도시지역은 불투수면적이 넓어 유출에 대한 도달시간이 짧아 돌발홍수에 대한 대응 시간이 충분하지 않다. 이와 같은 도시지역의 수문 특성과 많은 인구가 집중적으로 분포되어 있는 도시지역의 특성은 홍수로 인한 피해를 더욱 가중시킬 수 있다. 집강우를 제공하는 우량계를 활용하여 이러한 도시지역의 돌발홍수를 대응하기에는 많은 한계점이 있을 수밖에 없다. 도시지역에서의 돌발홍수를 대응하기 위해서는 미리 원거리에서 유입되어 오는 강우를 관측하거나 돌발적으로 발생하는 호우에 대한 빠른 관측이 필요하다. 레이더는 넓은 영역과 높은 시공간 해상도의 강우 자료를 제공한다는 점에서 도시지역에서의 돌발홍수 대응에 매우 유리하다.

한국건설기술연구원은 2004년부터 C밴드 레이더를 도입하여 도시지역에서의 돌발홍수 대응 연구를 진행해 왔다. 2014년에 한국건설기술연구원은 국내 최초로 X밴드 이중편파레이더(이하 KICT 레이더)를 도입하였고 시공간적으로 고해상도의 강우 자료를 활용하여 수도권 지역에서의 돌발홍수에 대한 연구를 진행하였다(Yoon et al., 2018). 또한 KICT 레이더는 2014년 6월에 경기도 고양시에서 발생한 직경 약 1 km의 용오름 현상을 관측하여 그 효능을 입증한 바 있다(Jeong et al., 2016). X밴드 이중편파레이더는 높은 시공간 해상도 자료를 제공할 뿐만 아니라 안테나 직경이 불과 1.8 m에 불과한 소형레이더이기 때문에 도시지역에서의 설치도 매우 용이하다.

단일편파레이더는 대기수상체 정보로서 되돌아오는 신호의 전력을 의미하는 반사도를 제공하였고 이러한 반사도는 ZR 관계식을 이용하여 레이더 강우 강도로 변환되어 왔다. 단일편파레이더는 하나의 파장 정보만을 이용하였기에 반사도만의 편파변수를 제공할 수 있었던데 반해 이중편파레이더는 하나의 파장과 그 파장에 수직된 파장을 하나 더 사용하여 단일편파레이더에 비해 더 많은 편파변수들을 제공할 수 있게 되었다. 대표적인 이중편파레이더의 편파변수는 수직과 수평의 신호 전력비인 차등반사도와 두 신호의 위상차인 차등위상차이다. 그리고 차등위상차에 대한 거리 미분으로 비차등위상차가 또 하나의 편파변수로 제공되고 있다. 이중편파레이더는 반사도, 차등반사도, 비차등위상차의 조합으로 레이더 강우를 생산하고 있다(Ryzhkov et al., 2005; Cifelli et al., 2011; Yoon et al., 2016).

이중편파레이더가 제공하고 있는 편파변수 중 비차등위상차는 매우 흥미로운 변수이다. 물리적으로 반사도는 단위 시간당의 에너지를 의미하기에 되돌아오는 신호의 진폭과 관련된 수밖에 없다. 그렇기에 관측반경 내에 강우 관측을 방해하는 요소가 있다면 반사도에 감쇄현상이 발생하고 이는 강우 강도의 크기를 작게 만드는 원인이 된다(Austin, 1987; Ryzhkov and Zmić, 1995b). 이에 비해 비차등위상차는

두 파장의 위상차이기 때문에 반사도와 같은 감쇄현상이 크게 나타나지 않는다(Ryzhkov and Zmić, 1995a; Zmić and Ryzhkov, 1999). 또한 비차등위상차는 차등위상차에 대한 거리 미분 형태로 이는 내부에너지의 변화량을 거리 미분하여 유도되는 힘과 유사한 물리적 특성을 지닌다. 이에 비차등위상차는 수문분야에서 힘의 특성을 지닌 강우 강도와 거의 비례 관계를 가지는 것으로 나타나고 있다(Humphries, 1974; Jameson, 1985; Sachidananda and Zmić, 1986; Chandrasekar et al., 1990).

X밴드 이중편파레이더는 고해상도 자료와 다양한 편파변수를 제공하고 있어 정도 높은 강우 강도 자료를 제공할 수 있다. 수재해정보플랫폼 융합 기술 연구단은 X밴드 이중편파레이더의 다양한 장점에 주목하여 수도권에 2기의 X밴드 이중편파레이더를 2017년에 도입하였다. 현재 2기의 X밴드 이중편파레이더는 고려대학교(이하 KRU 레이더)와 연세대학교(이하 YSU 레이더)에 각각 설치되어 운영 중에 있다. 본 연구에서는 KRU 레이더와 YSU 레이더의 특성 및 관측전략, 품질관리기술을 서술하고 2017년부터 2019년까지 3년간의 강우 사례를 분석하여 수도권 지역에서의 X밴드 이중편파레이더의 수문적용성에 대하여 평가를 실시하였다.

2. X밴드 이중편파레이더 운영 기술

2.1 레이더 특성 및 관측전략

수재해정보플랫폼 융합 기술 연구단에서 도입한 두 기의 레이더(KRU 레이더와 YSU 레이더)는 KICT 레이더와 동일한 Ridgeline Instrument (RLI)에서 제작한 RXM-25 레이더이다. RXM-25 레이더는 X밴드 이중편파레이더로 개략적인 제원은 Table 1과 같다. 또한 고려대학교와 연세대학교에 각각 설치되어 있는 KRU 레이더와 YSU의 레이더의 위치 및 관측반경(40 km)은 Fig. 1과 같다. Fig. 1과 같이 KRU 레이더와 YSU 레이더는 불과 약 8.3 km 떨어져 있어 86.8% 관측영역이 겹친다. 그러나 Fig. 2와 같이 주변 건물 및 지형으로 인해 KRU 레이더의 서남부 영역과 YSU 레이더의 북동부 영역이 완전 차폐가 발생하고 있어 두 레이더 서로 간은 상호 보완적으로 관측을 하고 있다.

Fig. 3(a)는 현재 운영 중인 KRU 및 YSU 레이더의 5분 관측전략을 나타낸다. 5분 관측전략은 13개의 관측 고도각으로 5분마다 반복적으로 수행하는 전략이다. 5분 관측전략에는 고도각 89.9°의 관측자료가 포함되어 있어 차등반사도의 오차 산정에 적용할 수 있다. 한편 한국건설기술연구원은 5분 관측전략 외에 보다 빠른 주기의 관측이 가능하도록 Figs. 3(b)와 (c)의 2.5분 및 1분 관측전략개선안을 제시하여 실험적으로 운영한 바 있다. 한국건설기술연구원이 제시한 2.5분 및 1분의 관측전략개선안은 Fig. 4와 같은 방법으로 제시하였다.

Table 1. Specifications of RXM-25 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

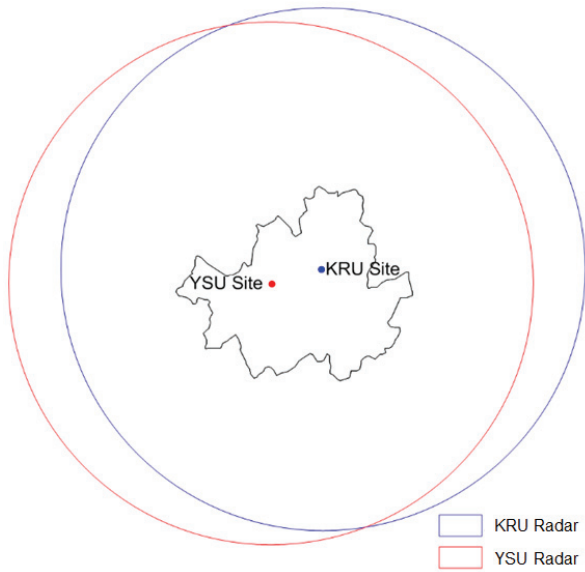
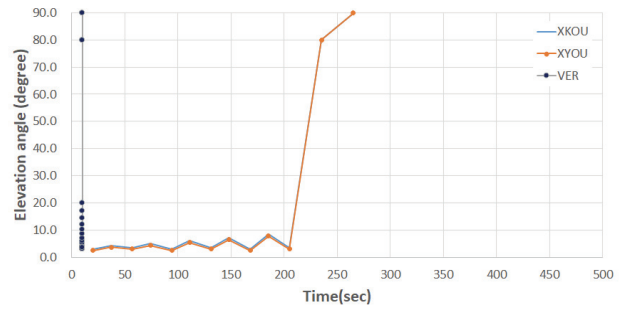
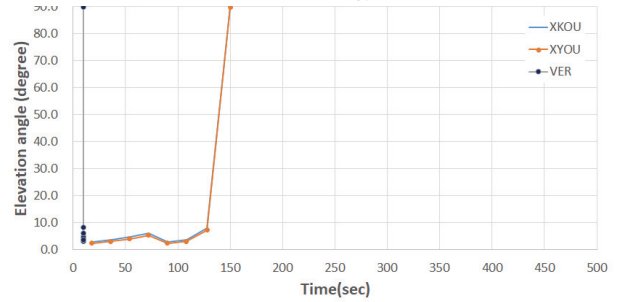


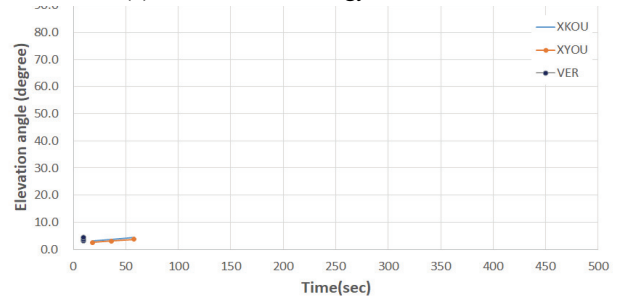
Fig. 1. Location of KRU and YSU Radar and Radar Range of 40 km



(a) Observation strategy of 5 min

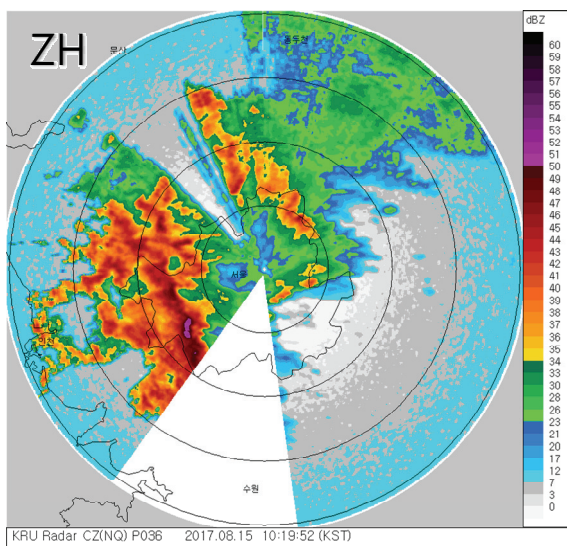


(b) Observation strategy of 2.5 min

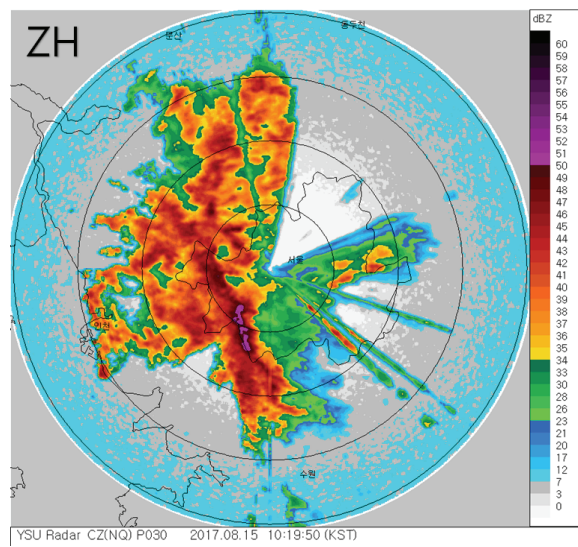


(c) Observation strategy of 1 min

Fig. 3. Observation Strategies of KRU Radar and YSU Radar



(a) KRU Radar



(b) YSU Radar

Fig. 2. Reflectivity of KRU Radar and YSU Radar

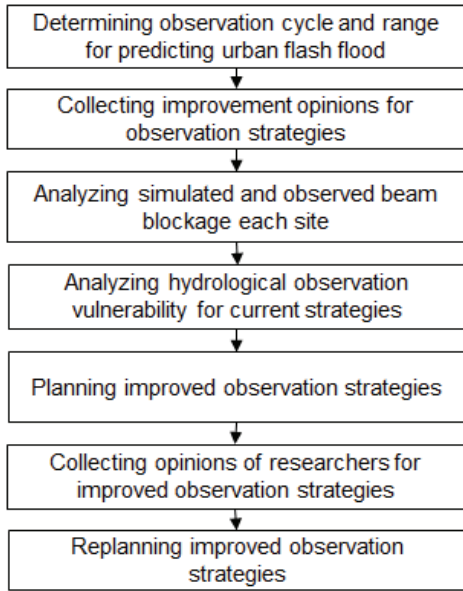


Fig. 4. Flow Chart of Suggestion on Improved Observation Strategies

2.2 X밴드 이중편파 레이더 자료의 품질관리기술

2.2.1 기초품질관리기술

레이더 원자료에는 비기상예코가 포함되어 있어 이러한 비기상예코를 제거해주어야 한다. 레이더 하드웨어 자체에 비기상예코를 제거하는 알고리즘이 포함되어 있지만 여전히 제거되지 못한 비기상예코를 제거해야 할 필요성이 있다. 한국건설기술연구원에서는 원자료에서 여전히 제거되지 못한 비기상예코를 제거하기 위한 기초품질관리기술을 Fig. 5와 같이 제시하였다. 한국건설기술연구원에서 제시한 기초품질관리 기술은 설정변수로 교차상관계수(Cross correlation coefficient,

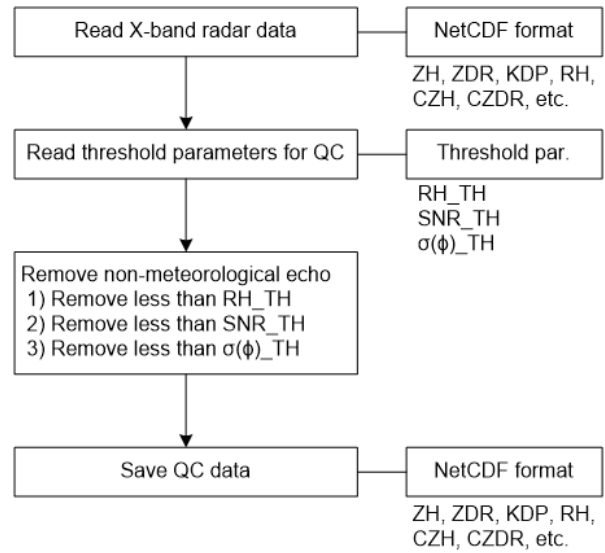


Fig. 5. Flow Chart of Basic Quality Control Technique

RH), 신호대 잡음비(Signal to noise, SNR) 및 차등위상차의 표준편차($\sigma(\phi)$)를 적용하여 세 변수의 일정값 이하인 경우 비기상예코로 간주하여 제거하는 매우 간결한 방법이다. Fig. 6은 기초품질관리기술 전후를 비교한 결과로 그림에서와 같이 비 기상예코 부분이 제거됨을 확인 할 수 있다.

2.2.2 차등반사도 품질관리

레이더 하드웨어 검보정에 따라 관측변수에는 오차가 나타나며 이를 보정하는 다양한 방법이 제시되고 있다(Gorgucci et al., 1992; Atlas, 2002). 그 중 차등반사도의 오차를 산정하고 보정 하는 방법은 수직으로 관측된 차등반사도가 0dB에 가까워야 한다는 개념을 널리 사용하고 있다(Gorgucci et al., 1999). 한국건설기술연구원에서도 이러한 개념을 바탕으로

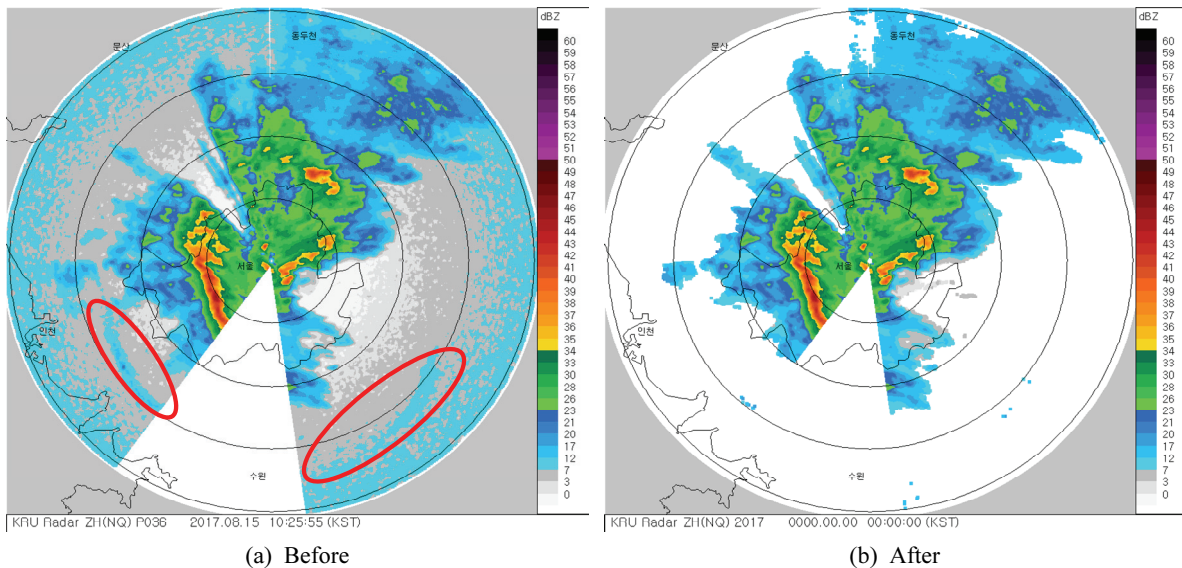


Fig. 6. Before and After Applying Basic Quality Control Technique

차등반사도 품질을 관리하는 방법을 적용하고 있다. Fig. 7은 한국건설기술연구원에서 적용하고 있는 차등반사도 품질관리 프로그램을 적용한 실제 강우 사례에서의 차등반사도 오차를 나타낸다.

2.2.3 레이더 강우의 실시간 품질관리기술

KRU 레이더와 YSU 레이더의 관측 전략에 의하면 X밴드 이중편파레이더 자료는 20초마다 생산된다. 20초마다 생산되는 X밴드 이중편파레이더는 netcdf 형식으로 제공되고 있으며 파일 하나의 크기는 대략 25-35 MB 정도로 한 사이트에서의 하루 용량이 대략 100 GB 정도 된다. 한국건설기술연구원에서는 이러한 대량의 자료를 보다 손쉽게 사용하기 위해 5분 관측전략의 일부 고도각 자료만을 이용하여 1분 레이더 강우자료를 생산하는 프로그램을 개발하여 적용 중에 있다. 1분 레이더 강우를 지상의 우량계 강수와 비교하여 다양한 품질평가 지수(Mean Error, R/G, Mean Absolute Error, Root Mean Square Error, 1 - Normalized Error, Correlation Coefficient)를 실시간으로 산정하는 프로그램이 한국건설

기술연구원에서 개발되어 적용 중에 있다(Fig. 8).

3. 레이더 강우의 수문적용성 평가

본 연구에서는 KRU 레이더 및 YSU 레이더의 레이더 강우의 수문적용성을 평가하기 위해 2017년부터 2019년까지 총 109 개의 강우 사례를 적용하였다(Table 2). 각 강우사례 관측 시에 적용된 관측전략은 5분 관측전략이었다. 실제로 KRU 레이더 및 YSU 레이더는 2017년 4월 이후부터 관측을 실시하였으나 도입 초기의 자료들은 하드웨어 검보정 문제로 제외하였다. 또한 레이더 강우의 수문적용성 평가를 위해 사용된 통계값은 1-NE와 R/G로, 두 값 모두 100%에 가까울수록 정확도가 높음을 의미한다.

Fig. 9는 2017년부터 2019년까지 강우사례에 따른 1-NE를 나타낸다. 1-NE는 강우의 편의와 함께 오차의 변동성이 같이 포함되어 있는 통계값이기 때문에 100%가 되기 위해서는 참값과 관측값이 일대일 선에 정확히 일치되어 있어야 하지만 이는 현실적으로 불가능하다. 실제로 1-NE가 60% 수준

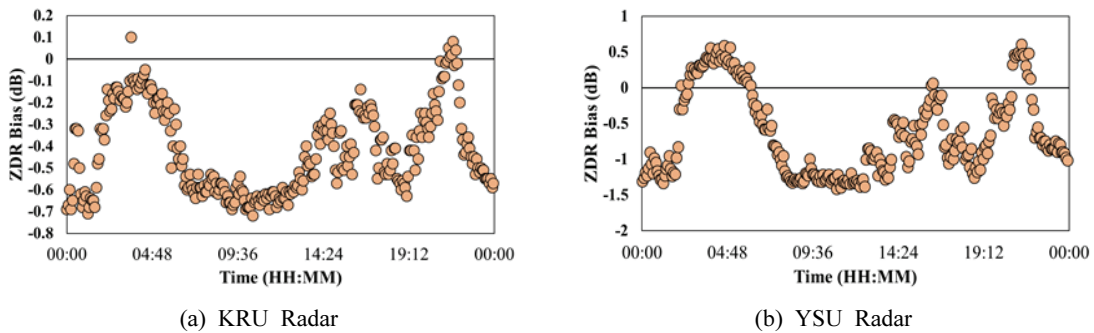


Fig. 7. Example for ZDR Bias of a Storm Event

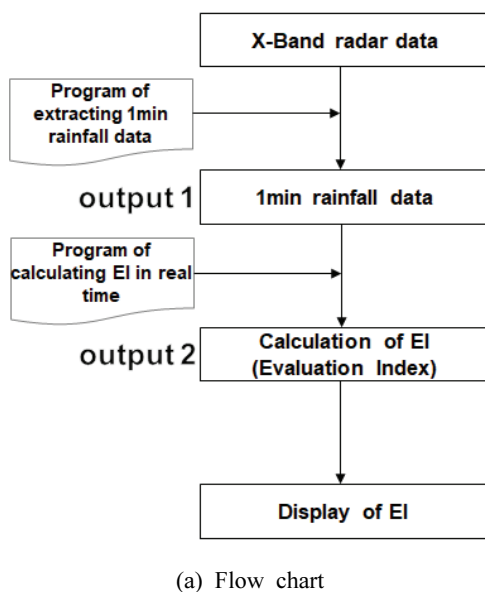


Fig. 8. Real-time Quality Evaluation

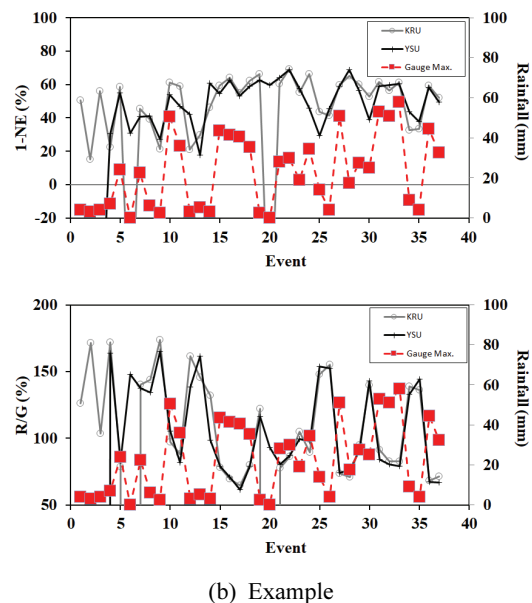
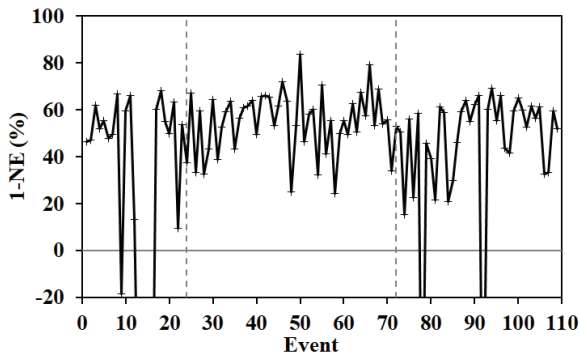
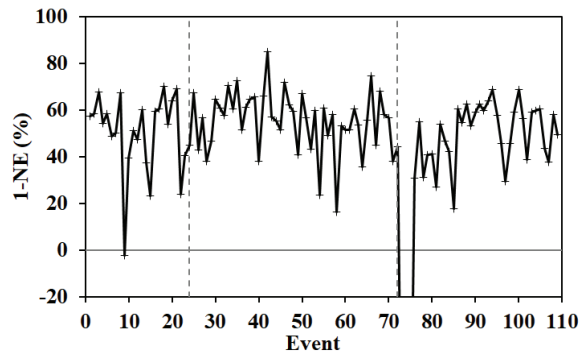


Table 2. Applied Events

Year	No.	Date (Month/Day)
2017	24	07/02, 07/03, 07/04, 07/06, 07/07, 07/08, 07/09, 07/10, 07/14, 07/15, 07/16, 07/17, 07/23, 07/24, 07/27, 07/28, 08/15, 08/20, 08/21, 08/23, 08/28, 09/19, 10/10, 10/11
2018	48	04/04, 04/05, 04/10, 04/14, 04/22, 04/23, 04/24, 05/02, 05/06, 05/12, 05/13, 05/16, 05/17, 05/18, 06/14, 06/15, 06/26, 06/27, 06/28, 06/29, 06/30, 07/01, 07/02, 07/10, 07/11, 07/12, 07/28, 08/06, 08/09, 08/12, 08/13, 08/15, 08/21, 08/23, 08/28, 08/29, 08/30, 09/03, 09/06, 09/20, 09/21, 09/22, 10/05, 10/06, 10/10, 10/23, 10/26, 10/28
2019	37	04/25, 04/26, 05/27, 06/06, 06/07, 06/10, 06/18, 07/10, 07/11, 07/15, 07/16, 07/20, 07/21, 07/24, 07/25, 07/26, 07/27, 07/28, 07/29, 07/30, 07/31, 08/01, 08/03, 08/04, 08/07, 08/11, 08/12, 08/13, 08/15, 08/27, 08/29, 09/04, 09/05, 09/06, 09/07, 09/10, 09/11

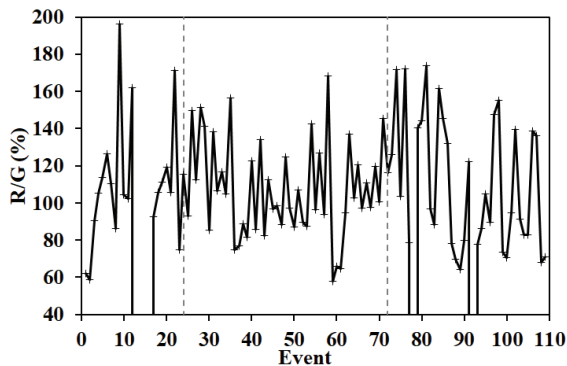


(a) KRU Radar

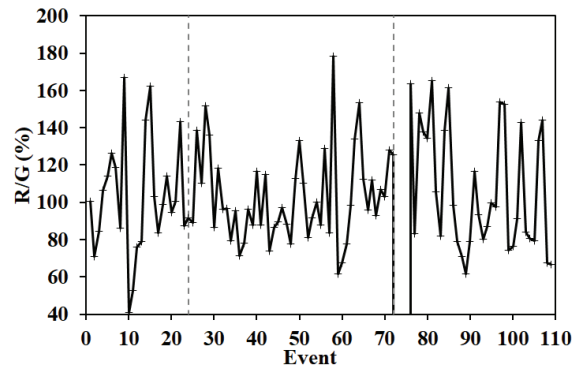


(b) YSU Radar

Fig. 9. 1-NE with Respect to Events (from 2017 to 2019)



(a) KRU Radar



(b) YSU Radar

Fig. 10. R/G with Respect to Events (from 2017 to 2019)

이상이면 정확도가 양호한 수준이며 70% 이상의 경우 정확도가 매우 높다고 볼 수 있다. 그림에서 1-NE가 -20% 이하인 경우는 결측에 해당하는 경우이며, 경우에 따라서 음의 1-NE를 나타내는 강우사례가 존재하는 데 이는 레이더 강우가 과대하게 추정된 경우이다. 그림에서와 같이 KRU 레이더와 YSU 레이더의 1-NE는 대략 60% 수준에서 변동하며 나타나고 있어, 수도권에 설치된 X밴드 이중편파레이더의 정확도는 어느 정도 양호한 수준으로 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 2017년부터 2019년까지 강우사례에 따른 R/G를 나타낸다. R/G는 1-NE와 다르게 편의만을 포함하는 통계값으로 편의가 없는 경우인 100%를 기준으로 그 이상인 경우는 과대 추정을, 그 이하인 경우는 과소 추정을 의미한다. 그림에서 40% 이하의 사례는 1-NE와 동일한 결측에 해당하는 경우이다. 두 레이더의 R/G는 강우의 사례에 따라 100% 이상과 이하를 반복적으로 보이고 있어 레이더 강우의 과대와 과소 추정이 반복적으로 나타나고 있음을 확인할 수

있었다. Fig. 11은 우량계 강우량과 레이더 강우량의 비교를 나타내며 본 그림을 통해서도 두 레이더의 편차가 거의 없는 것으로 확인할 수 있다. Fig. 11에 적용된 3년 전체에 대한 레이더 강우의 1-NE는 두 레이더 모두 약 63%로, R/G는 약 84%로 나타났다. R/G 값이 약 84% 수준인 것으로 보아 두 레이더에 약간의 편차가 존재함을 확인할 수 있었다.

Fig. 12는 전체 강우사례에 대한 우량계 평균 강우량과 레이더 평균 강우량을 비교한 그림이다. 여기서 평균 강우량은

두 레이더 사이트 내에 존재하는 우량계 강우의 평균값과 그 우량계와 위치적으로 매칭되는 레이더 강우량의 평균값을 각각 나타낸다. 그림에서와 같이 우량계 평균 강우량과 레이더 평균 강우량은 거의 일대일 선 위에 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 다만 우량계 평균 강우량의 크기가 커질수록 레이더 평균 강우량의 크기가 다소 작아지는 것으로 나타났다.

Fig. 13은 강우 크기에 따른 1-NE를 나타낸다. 본 그림에서 적용된 강우의 크기는 우량계의 최대 강우량이다. 그림에서

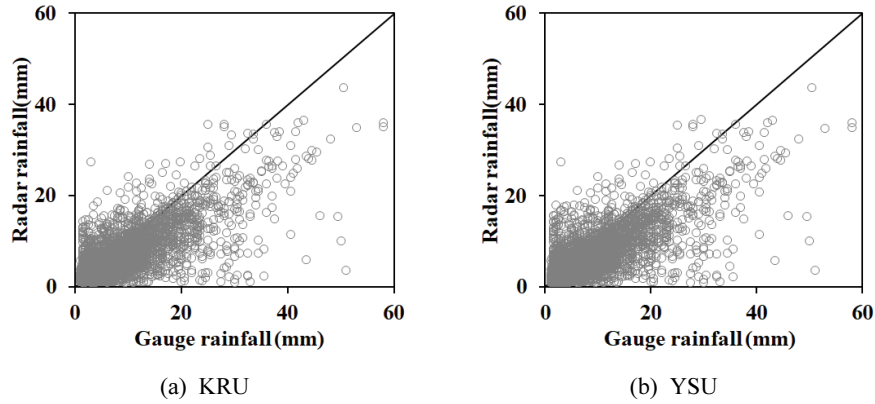


Fig. 11. Gauge Rainfall Versus Radar Rainfall (from 2017 to 2019)

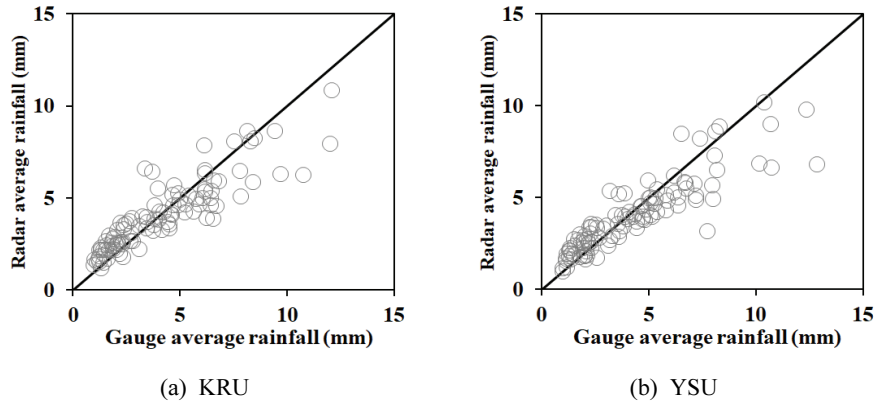


Fig. 12. Gauge Average Rainfall Versus Radar Average Rainfall (from 2017 to 2019)

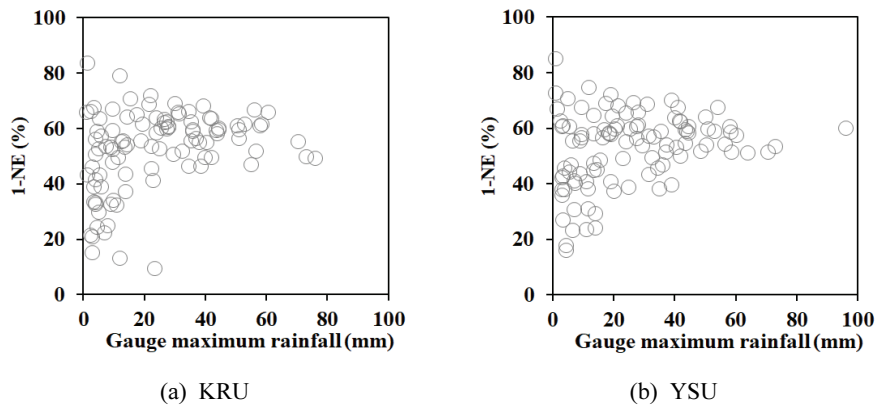


Fig. 13. 1-NE According to Gauge Maximum Rainfall (from 2017 to 2019)

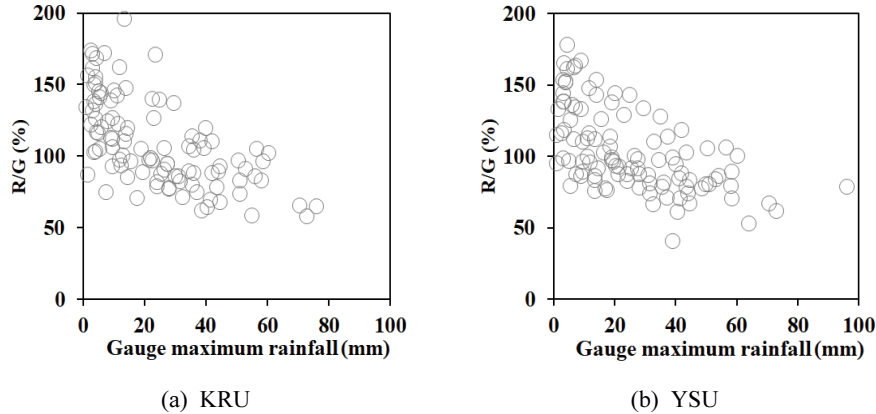


Fig. 14. R/G According to Gauge Maximum Rainfall (from 2017 to 2019)

와 같이 강우의 크기가 작은 경우에는 1-NE가 매우 크게 변동하는 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서 레이더 강우 강도 추정시에 적용된 KDP의 특성과 관련된다. KDP는 그 추정 과정의 불확실성으로 인해 강우 강도가 작은 경우 변동성이 매우 크게 나타난다는 특성을 나타내며, Fig. 13에 이러한 특성이 잘 나타나 있다고 볼 수 있다. 강우의 크기가 커질수록 1-NE는 60% 수준으로 수렴하는 것으로 나타나고 있다. 이를 통해 KDP로 추정된 레이더 강우는 강우가 클수록 안정적인 정확도를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 14는 강우 크기에 따른 R/G를 나타낸다. Fig. 14에서도 강우의 크기가 작은 경우 R/G가 매우 크게 변동하고 있음을 확인할 수 있다. 다만 강우의 크기가 작은 경우는 100~200% 수준으로 나타나 대체로 과대하게 추정되고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 강우의 크기가 커질수록 100% 수준 이하로 떨어져 레이더 강우가 과소하게 추정되고 있음을 확인할 수 있다. 이는 X밴드 레이더의 특성으로 강우의 크기가 커질수록 감쇄가 심하게 나타나며, 심한 경우 신호가 사라지는 문제가 나타나기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 KRU 레이더와 YSU 레이더의 특성 및 관측전략, 품질관리기술 및 수도권 지역에서의 X밴드 이중 편파레이더의 수문적용성에 대하여 평가를 실시하였다. 그 결과는 다음과 같다.

첫 번째, 두 레이더는 위치상으로 거의 중복되고 있어 그 중첩 영역이 거의 86.8% 수준으로 나타나고 있다. 그러나 두 레이더는 서로간의 차폐 영역을 서로 상호 보완하여 관측을 하고 있어 수도권 기상 감시에는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. 현재 두 레이더는 5분 관측전략 위주로 운영되고 있지만 한국건설기술연구원에서는 보다 빠른 돌발홍수 감시를 위해 2.5분 및 1분 관측전략 개선안을 제시하여 실험적으로 운영하였다.

두 번째, 한국건설기술연구원에서는 두 레이더에 대한 품질을 기초품질관리기술, 차등반사도 오차 산정, 레이더 강우의 실시간 품질평가 기법 순으로 확인하고 있다. 먼저 기초품질관리기술은 세 개의 설정변수(RH, SNR 및 $\sigma(\phi)$)를 적용하여 세 변수의 일정값 이하인 경우 비기상예코로 간주하여 제거하는 매우 간결한 방법으로 비기상예코를 효과적으로 제거하는 것으로 나타났다. 차등반사도 오차는 수직으로 관측된 차등반사도가 0dB가 되어야 한다는 개념을 활용하여 산정하였다. 마지막으로 실시간 품질평가 기법은 1분 레이더 강우를 우량계 강우와 비교하여 그 품질을 실시간으로 평가하는 방법이다.

세 번째, KRU 레이더 및 YSU 레이더의 수문적용성을 평가한 결과 1-NE는 약 63% 수준으로 R/G는 약 84% 수준으로 나타나 정확도는 양호한 수준이나 약간의 편이가 존재함을 확인하였다. 또한 강우의 크기가 작은 경우 변동성이 크게 나타나고 있으며, 이는 강우 크기가 작은 경우 불확실성이 크게 나타나는 KDP의 영향 때문이다. 강우의 크기가 큰 경우 레이더 강우가 다소 과소하게 추정되고 있으며, 이는 X밴드 특유의 감쇄 현상과 매우 큰 강우에서 그 신호가 없어서 버리는 현상 때문이다.

수도권에 설치된 두 기의 레이더는 수도권에서의 돌발홍수 감시를 위해 설치되었다. 두 레이더는 정확도 면에서 다소 양호한 수준으로 나타나고 있어 앞으로 수도권 돌발홍수 감시에 큰 역할을 할 것으로 기대되고 있다. 다만 강우의 작은 경우 변동성이 크게 나타나고 있다는 점과 강우가 큰 경우 다소 과소추정되고 있다는 점은 앞으로 개선해야 할 사항들이다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물관리연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다(79606).

References

- Austin, P.M. (1987). Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall. *Monthly Weather Review*, Vol. 115, No. 5, pp. 1053-1070.
- Chandrasekar, V., Bringi, V.N., Balakrishnan, N., and Zrnić, 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.
- Cifelli, R., Chandrasekar, V., Lim, S., Kennedy, P.C., Wang, Y., and Rutledge, S.A. (2011). A new dual-polarization radar rainfall algorithm: Application in Colorado precipitation events. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 28, No. 3, pp. 352-364.
- Gorgucci, E., Scarchilli, G., and Chandrasekar, V. (1992). Calibration of radars using polarimetric techniques. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 30, No. 5, pp. 853-858.
- Gorgucci, E., Scarchilli, G., and Chandrasekar, V. (1999). A procedure to calibrate multiparameter weather radar using properties of the rain medium. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 37, No. 1, pp. 269-276.
- Humphries, R.G. (1974). *Depolarization effects at 3 GHz due to precipitation*. Scientific Report MW-82, Storm Weather Group, McGill University, Montreal, Quebec, Canada.
- 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 the Atmospheric Sciences*, Vol. 42, No. 6, pp. 607-614.
- Jeong, J.-H., Kim, Y.-H., Oh, S.-B., Lim, E., and Joo, S. (2016). Investigation of Goyang tornado outbreak using X-band polarimetric radar: 10 June 2014. *Atmosphere*, Korean Meteorological Society, Vol. 26, No. 1, pp. 47-58.
- Ryzhkov, A.V., and Zrnić, 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 Zrnić, D.S. (1995b). Precipitation and attenuation measurements at a 10-cm wavelength. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 34, No. 10, pp. 2121-2134.
- 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.
- Sachidananda, M., and Zrnić, D.S. (1986). Differential propagation phase shift and rainfall rate estimation. *Radio Science*, Vol. 21, No. 2, pp. 235-247.
- Yoon, J., Hwang, S.-H., Lee, D.-R., and Oh, B.-H. (2018). Quantitative assessment on the radar rainfall of KICT X-band dual-polarization radar. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 2, pp. 329-337.
- Yoon, J., Suk, M.-K., Nam, K.-Y., and Park, J.-S. (2016). Application of an empirical method to improve radar rainfall estimation using cross governmental dual-pol. radars. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 7, pp. 625-634.
- Zrnić, 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	November 27, 2019
Revised	December 3, 2019
Accepted	December 26, 2019