수도권 지역 집중호우 사상에 대한 이중편파 레이더의 관측 특성 분석

Observational Characteristics of Dual-Polarization Radar for Heavy Rainfall Events in Capital Area

노용훈* · 장기호** · 차주완*** · 이철규**** · 류근혁*****

Ro, Yonghun*, Chang, Ki-Ho**, Cha, Joo-Wan***, Lee, Chulkyu****, and Ryu, Geun-Hyeok*****

Abstract

In this study, the observational characteristics of dual-polarization radar for studying the heavy rainfall in the capital area were evaluated. To this end, three rainfall events that had caused significant flood damage due to the heavy rainfall from June to August 2020 were selected. The application of dual-polarization radar data revealed a significant change in precipitation during the analysis of observation characteristics of the affected capital area's heavy rainfall. Moreover, the physical characteristics of reflectivity, differential reflectivity, specific differential phase, and copolar-correlation coefficient and their temporal dynamics in radar rainfall were compared to rain gauge rainfall. The radar reflectivity has been identified at the frequency of ≥ 40 dBZ due to the effects of heavy rainfall in the capital area, while the differential reflectivity has confirmed that the particle size was larger. The specific differential phase seemingly exhibited the most similar distribution to rain gauge rainfall, while exhibiting local characteristics of heavy rainfall in the capital area, according to the differential reflectivity result. The copolar-correlation coefficient confirmed the consistent observational performance of the dual-polarization radar for evaluation of heavy rainfall. Overall, the radar rainfall demonstrated good performance in simulating the peak time, and CSU-HIDRO estimated the rainfall with up to 32.4% more accuracy than JPOLE.

Key words : Observational Characteristic, Dual-polarization Radar, Heavy Rainfall, Capital Area, Rainfall Event

요 지

본 연구에서는 수도권 지역의 집중호우 현상에 대한 연구용 이중편파 레이더의 관측 특성을 분석하였다. 이를 위해 2020년 6-8월 집중호우로 인한 침수 피해가 크게 발생했던 세 개 호우사상을 선별하였다. 강우 변화가 크게 나타난 시간에 관측된 레이더 자료를 이용하여 수도권 지역에 영향을 준 집중호우의 관측 특성을 분석하였다. 이를 위해 시간별 반사도, 차등반사도, 비차등위상, 교차상관계수의 물리적 특성과 지상 강우 대비 레이더 강우의 변화를 분석하였다. 그 결과 수도권 지역에서 집중호우 영향으로 레이더 반사도는 40 dBZ 이상 감지될 수 있었고, 차등반사도는 입자 크기가 증가된 것을 확인해 주었다. 비차등위상은 지상 강우와 가장 유사한 분포로 나타났으며, 차등반사도와 같이 수도권 집중호우의 국지적 특성을 나타냈다. 교차상관계수는 집중호우 관측에 대한 연구용 이중편파 레이더의 일관된 관측 성능을 확인해 주었다. 아울러 레이더 강우는 침투 시간을 잘 모의하였고, JPOLE보다 CSU-HIDRO가 최대 32.4% 더 정확하게 강우를 추정한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 관측 특성, 이중편파 레이더, 집중호우, 수도권, 호우사상

*교신저자, 정회원, 국립기상과학원 융합기술연구부 연구원(Tel: +82-64-780-6696, Fax: +82-64-738-6515, E-mail: royh1@korea.kr)

Corresponding Author, Member, Senior Researcher, Convergence Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences

**국립기상과학원 융합기술연구부 팀장

Team Leader, Convergence Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences

***국립기상과학원 융합기술연구부 연구관

Senior Scientist, Convergence Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences

****국립기상과학원 융합기술연구부 부장

Department Head, Convergence Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences

*****기상레이더센터 레이더분석과 연구관

Senior Scientist, Radar Analysis Division, Weather Radar Center

1. 서 론

기후변화 영향으로 국내의 강우 현상이 불규칙적으로 변하고 있다. 최근 5년 변화를 살펴보면 2016년과 2017년에는 강우 부족으로 지역적인 가뭄이 심각하게 나타났으나, 이후 강우량이 점차 증가하여 2020년에는 수도권에 기록적인 폭우 현상이 발생하였다(KMA, 2016; 2017; 2020a). 집중호우로 인해 서울에서는 한강이 범람하면서 주변 저지대 지역이 침수되고 일부 도로가 차단되었다. 우수관을 흐르던 물이 넘쳐 지상으로 배출됨에 따라 주요 도로와 가구 지역 주변이 잠기게 되었고, 국민의 생활 안전을 위협하는 등 침수 피해가 막대하게 발생하였다(MOIS, 2020).

지역에 따라 집중호우의 특성이 다르게 나타나면서 수도권뿐만 아니라 전국적으로도 호우 피해 규모와 범위도 다양하게 나타났다. 산지 지역에서는 토사유출로 인한 피해가 발생하였고, 하천 주변에서는 저지대 교각이 범람하면서 교통이 차단되는 문제가 나타났다. 해안 및 섬 지역에서는 저지대 침수뿐 아니라 강한 풍속으로 인한 선박 전도와 시설물 붕괴가 발생하였다. 또한, 일부 지역에서는 호우와 함께 짙은 안개가 발생하면서 시야 부족에 따른 교통사고 문제가 발생하였고, 무자비한 폭우로 인해 전류 공급이 차단되면서 단수 문제가 발생하거나 생활 지원이 필요한 지역도 나타났다(MOIS, 2019; 2020).

문제는 홍수 피해에 영향을 주는 국지적인 집중호우 현상을 과학적으로 해석하고 예측하기가 간단하지 않다는 점이다. 집중호우 발생은 특정 지역에만 국한되어 있지 않기 때문에 우리나라 전역 모두 위험에 노출되어 있다고 할 수 있다. 이러한 문제에 대비하기 위해 기상청에서는 2020년부터 집중호우 관측을 위한 캠페인을 시행해 왔다. 기상청은 국지적 집중호우 발생에 주로 영향을 주는 요인이 중규모 대류계라고 판단하고, 이에 대한 이해 및 규명을 통해 강우 예측 능력 향상을 목표로 정하였다. 중규모 대류계란 여러 개의 적란운과 그 주변의 층운으로 구성된 구름 무리로 호우, 우박, 돌풍, 번개 등의 기상 현상을 동반하는 뇌우와 태풍이 대표적인 중규모 대류계 현상이다(KMS, 1999). 기상청은 국립기상과학원을 중심으로 예보국, 수도권기상청, 수치모델링센터, 관측기반국, 국가기상위성센터, 기상레이더센터의 협력을 받아 집중호우 관측 캠페인을 현재까지 지속해 오고 있다.

집중관측 캠페인은 수도권에 발표된 예보가 실제와 다를 경우 발생할 수 있는 재해를 예방하기 위해 수행되었다. 이는 서해상에서 편서풍을 따라 유입된 공기가 웅진반도와 경기만을 통과하면서 기상조건이 크게 변함에 따라 수도권 지역에 갑작스러운 폭우가 발생하는 경향이 자주 나타났기 때문이다(KMA 2020a). 캠페인에서는 입체관측망 구축을 구축하여 예보모델을 개선하고 이러한 현상을 규명하려 하였다. 다양한 기상관측장비가 도입되었고, 해양관측 장비

와 환경관측 장비도 지원되었다(KMA, 2020b). 지상기상관측을 위한 장비에는 기상인자를 관측하기 위한 풍향풍속계, 온도습도계, 기압계, 시정계, 일조계와 강수 관측을 위한 우량계, 구름 상태 관측을 위한 운고계 등이 활용되었다. 강수특성 분석을 위한 광학우적계와 연직강우레이더 자료의 활용도 고려되었다. 광학우적계는 강수 입자의 크기와 낙하속도를 관측할 수 있고, 연직강우레이더는 관측 지역에 분포한 강수 구름의 연직 특성을 분석할 수 있다. 이 외에도 기상레이더, 라이다, 기상위성과 같은 원격탐사 장비도 동원되었다.

수도권 지역의 집중관측 지원을 위해 서해안에 연구용 소형 기상레이더가 도입되었다. 수리산, 망일산, 덕적도에 레이더가 설치되었고, 수도권과 서해 지역에 유입되는 위험 기상 현상을 감시하고 있다. 강수 발생과 대기수상 변화 등 유입된 구름시스템의 특성을 쉽게 파악하기 위해 세 지역 모두 이중편파 레이더가 설치되었다. 기상청은 레이더 관측망을 구축하여 수도권에 영향을 줄 수 있는 시스템을 감지하고 있으며, 위험 예상 지역에 거주하는 국민들에게 문자 알림 서비스를 제공하고 있다. 또한, 집중호우로 발생할 수 있는 돌발홍수 침수 피해에 대비하기 위해 관측자료를 분석하고 있다.

세 지역에 설치된 연구용 소형 이중편파 레이더는 파장이 짧은 X-밴드를 이용하고 있어 S-밴드를 이용하는 현업용 레이더와 달리 대상 구름의 특성을 분석하기 유리하다. 또한, 단일편파 레이더와 달리 수평과 수직 편파를 모두 송·수신할 수 있어 강수강도를 나타내는 반사도 외에 다양한 편파변수를 생성할 수 있다. 대표적으로 차등반사도, 비차등위상, 교차상관계수 등을 이용하면 구름 내부의 대기수상 변화를 파악할 수 있고, 지형, 채프, 선박 등 강수 관측에 영향을 주는 비기상요소의 영향을 분리할 수 있는 이점이 있다. 이러한 특성에 따라 최근 국내외적으로 이중편파 변수를 활용하여 강수 사례를 규명하려는 다양한 연구가 수행되었다(Matrossov, 2021; Misumi et al., 2021; Reinoso-Rondinel and Schleiss, 2021; Shin et al., 2021; Thurai et al., 2021; Wang et al., 2021). 이러한 연구 결과는 호우특성을 규명하기 위한 이중편파 변수의 활용 가능성을 부각해 주었다.

본 연구에서는 수도권 지역의 집중호우 관측을 위해 도입된 세 대의 연구용 이중편파 레이더의 강우 관측 특성을 분석하려 하였다. 이를 위해 2020년 6-8월까지 강우가 상대적으로 많이 나타난 사상을 선정하여 레이더 자료의 변화를 분석하였다. 레이더 편파변수는 수평반사도, 차등반사도, 비차등위상, 교차상관계수를 이용하였으며, 시간별 강우 유입에 따른 물리적 특성과 지상 강우 대비 추정된 레이더 강우의 변화를 분석하였다. 2장에서는 이중편파 레이더를 이용한 강우 관측 방법과 분석 자료에 대해 정리하였으며, 3장에서는 집중호우 사상에 대한 시간별 이중편파 변수의 분석 결과를 정리하였다. 또한, 기존 방법으로 레이더 강우를

추정하고 지상 강우와 비교 및 평가하였다. 아울러 4장에서는 연구 결과를 정리하고, 본 연구를 통해 기대할 수 있는 효과와 향후 수도권 지역의 집중호우에 대한 보다 정밀한 관측망을 확보를 위해 필요한 연구에 대해 논의하였다.

2. 레이더 강우 관측 및 분석 자료

2.1 이중편파 레이더를 이용한 강우 관측

2.1.1 이중편파 변수

이중편파 레이더는 수평과 수직의 전자기파를 이용하여 대기 중의 기상 현상을 관측할 수 있다. 수평파는 강수강도를, 수직파는 강수 유형 정보를 제공하므로 수문, 기상 분야에서는 강수 추정, 비, 눈, 우박에 대한 강수입자 구분, 강수의 구조적 발달, 구름물리 현상 해석 등 연구에 이중편파 레이더를 활용하고 있다(Ryzhkov et al., 2003). 강수 정보를 해석하기 위해 관측된 편파변수 중 반사도, 차등반사도(dB), 비차등 위상, 교차상관계수가 이용되고 있다.

반사도는 방사된 전자기파 에너지와 물체로부터 수신된 에너지의 비를 나타낸 값으로 강수의 세기를 단위 부피당 존재하는 강수 입자수로 표출해 준다. 차등반사도는 수평파와 수직파에 대한 반사도 차이로 강수 입자의 종류나 형태를 알려준다. 차등반사도가 양의 값이면 강수, 0이면 이슬비, 음의 값이면 빙정이나 우박을 나타낸다(Meischner, 2005). 비차등위상은 주어진 거리에서 수평파와 수직파의 위상차를 나타내는 것으로 차폐, 지형, 이상전파의 영향을 적게 받기 때문에 반사도와 함께 강수 분석에 이용된다(Kumjian, 2013). 교차상관계수(ρ_{HV})는 수평파와 수직파의 상관관계를 나타내는 것으로 강수는 0.7 이상, 비강수는 0.7 이하의 값을 갖는다. 교차상관계수가 0.95 이상이면 강수, 0.90~0.95는 우박, 0.9 이하는 이슬비를 나타낸다(Bringi and Chandrasekar, 2001).

본 연구에서는 이러한 이중편파 변수를 이용하여 집중호우의 특성을 다각적으로 분석하고자 한다. 레이더 반사도를 이용하면 집중호우에 대한 강우강도 변화를 분석할 수 있다. 또한, 반사도는 강수 시스템의 중심이 이동하는 경향을 뚜렷하게 나타낼 수 있어 수도권으로 유입되는 구름이 강화되는 양상을 포착할 수 있다. 강화된 구름에 대해 차등반사도를 이용하면 구름의 물리적 변화를 파악하고, 해상에서 내륙으로 유입된 시스템의 대기수상 변화를 분석할 수 있다. 여름철 발생한 집중호우 사상을 분석할 경우 온도에 따른 대기수상 변화는 크지 않지만, 차등반사도를 이용할 경우 상대적으로 약한 강우대와 강한 강우대를 구분할 수 있어 미세한 강수 시스템 변화를 파악할 수 있을 것이다. 비차등위상은 반사도와 비교하여 감쇄되는 경향이 작으므로 육지에 상륙하여 수도권으로 진행되는 집중호우가 산악지형이나 도시 지역을 통과하면서 받을 수 있는 관측 특성의 물리적 변화를 유리하게 분석할 수 있을 것이다. 아울러 교차상관계수는

차등반사도와 비차등반사도의 분석 결과를 검증해 줄 것이며, 레이더 관측에 미치는 외부 영향도 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

2.1.2 이중편파 레이더 강우 추정

이중편파 변수를 이용하면 지상 강우 대비 집중호우 사상에 대한 레이더 강우 특성을 비교할 수 있다. 본 연구에서는 이중편파 레이더의 강우 추정 복합 알고리즘인 JPOLE (Ryzhkov et al., 2005)과 CSU-HIDRO (Cifelli et al., 2011)를 이용하여 레이더 강우를 추정하였다. 기존에는 국내 호우사상에 대한 두 알고리즘의 적용성을 분석한 연구가 수행되었다(Noh et al., 2014; Kim et al., 2016). JPOLE 알고리즘은 간단히 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있고, 레이더 강우 추정을 위해 Eqs. (1)~(4)를 적용한다.

$$R(Z_H) = 0.0170(Z_H)^{0.7143} \quad (1)$$

$$R(Z_{DR}) = \frac{R(Z_H)}{0.4 + 5.0 |10^{0.1Z_{DR}} - 1|^{1.3}} \quad (2)$$

$$R(K_{DP}) = 44.0 |K_{DP}|^{0.822} \text{sign}(K_{DP}) \quad (3)$$

$$R(K_{DP}, Z_{DR}) = \frac{R(K_{DP})}{0.4 + 3.5 |10^{0.1Z_{DR}} - 1|} \quad (4)$$

여기서, Z_H 는 반사도(mm^6/m^3), Z_{DR} 은 차등반사도(dB), K_{DP} 는 비차등위상($^{\circ}/km$)을 나타내고, 추정된 레이더 강우는 mm/hr 단위를 나타낸다. Eq. (1)은 Z-R 관계 $Z = 300R^{1.4}$ 를 강우강도에 대해 정리한 식이기도 하다. JPOLE의 경우 Eq. (3)과 같이 비차등위상을 이용하여 강우를 추정할 때는 음의 값의 영향을 배제하기 sign 함수를 사용한다.

CSU-HIDRO는 대기수상체에 따라 강우추정 알고리즘을 다르게 적용하는 방법으로, 본 연구에서는 집중호우 사상을 분석하기 위해 Fig. 2와 같은 액체 수상체에 적용하는 알고리즘을 이용하였다. 이중편파 변수 조건에 따른 강우 추정 관계식은 Eqs. (5)~(7)과 같다.

Fig. 1. JPOLE Algorithm

Fig. 2. CSU-HIDRO Algorithm for Liquid Hydrometeor

$$R(Z_H, Z_{DR}) = 0.0067 \times (Z_H)^{0.927} 10^{(-0.343 Z_{DR})} \quad (5)$$

$$R(K_{DP}) = 40.5 (K_{DP})^{0.85} \quad (6)$$

$$R(K_{DP}, Z_{DR}) = 90.8 (K_{DP})^{0.93} 10^{(-0.169 Z_{DR})} \quad (7)$$

Fig. 2에서 $R(Z_H)$ 관계식은 Eq. (1)과 동일하다. 각 관계식으로 추정된 레이더 강우의 단위는 mm/hr이다. 본 연구에서는 집중호우를 분석하기 위해 위와 같은 두 알고리즘과 기상청에서 반사도만 이용하여 실시간으로 강우를 추정할 수 있는 관계식 $Z = 148 R^{1.59}$ 을 이용하여 레이더 강우를 추정하였다. 또한, 추정된 레이더 강우를 평가하기 위해 지상 강우 자료와의 평균오차(mean error, ME), 평균절대오차(mean absolute error, MAE), 평균제곱근오차(root mean square error, RMSE)를 비교하였다. 각 검정통계량을 정리하면 Eqs. (8)~(10)과 같다.

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - G_i) \quad (8)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |R_i - G_i| \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - G_i)^2} \quad (10)$$

위 식에서 N 은 레이더와 우량계의 분석 자료수, R_i 는 레이더 강우(mm/hr), G_i 는 지상 강우(mm/hr), $\bar{R}$ 는 레이더 강우 평균, $\bar{G}$ 는 지상 강우 평균을 나타낸다.

2.2 분석 자료

2.2.1 레이더 자료

수도권 집중호우 사상에 대한 연구용 이중편파 레이더의 강우 관측 특성을 분석하기 위해 본 연구에서는 수리산, 망일산, 덕적도에 설치된 X-밴드 레이더 자료를 분석하였다.

(a) Surisan Radar

(b) Mangilsan Radar

(c) Deokjeokdo Radar

Fig. 3. Three Research Radars in this Study

세 대 레이더는 모두 동일한 기종을 사용하고 있으며, 1분 간격으로 자료를 표출할 수 있다. 각 지역에 설치된 레이더를 나타내면 Fig. 3과 같고, 레이더 제원은 Table 1과 같다.

Table 1에서 알 수 있듯이, 레이더 안테나 직경은 1.82 m로 크진 않지만, 유효 관측반경이 약 90 km로 비교적 넓은 범위를 관측할 수 있는 것을 알 수 있다. 이러한 특성에

Table 1. Specifications of Three Research Radar in this Study

Model		E750DP
Antenna	Type	Parabola
	Gain (dB)	43
	Diameter (m)	1.82
	Beam Width (°)	1.27
Band		X
Transmitting Frequency (MHz)		9,360
Peak Power (kW)		1
Average Power (kW)		0.11
Observational range (km)		90

Fig. 4. Radar Observation Network (Surisan Radar, SRI; Mangilsan Radar, MIL; Deokjeokdo Radar, DJK)

따라 세 대의 레이더로 구성된 관측망을 이용하면 서해에서 수도권으로 유입되는 중규모 기상 현상을 감지하기 유리하다. 레이더별 관측 영역을 나타내면 Fig. 4와 같다.

Fig. 4에서 청색 영역이 레이더가 관측할 수 있는 영역을 나타내고, 회색 영역이 차폐 지역을 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 세 지역의 레이더는 차폐 영역을 서로 보완해 주고 있고, 수도권과 서해 지역을 관측할 수 있다. 덕적도 레이더는 차폐되는 면적이 가장 적고, 안테나 고도가 132 m로 낮아 서해에서 유입되는 강우 시스템을 집중적으로 관측할 수 있다. 망일산 레이더는 덕적도 레이더와 관측 영역이 겹치는 부분이 많지만, 안테나 고도가 높아 291 m로 높아 내륙에 상륙하여 수도권으로 북상하는 시스템을 관측하기 유리하다. 수리산 레이더는 동서 방향으로 차폐가 있어 관측 영역이 가장 적지만, 안테나 고도가 433 m로 가장 높아 해상에서 내륙으로 유입되어 서울과 경기 지역에 영향을 주는 중규모 기상 현상을 관측하기 유리하다.

본 연구에서는 호우 기간에 관측된 레이더 자료 중 5분

간격의 자료를 이용하였으며, 고도각 자료인 Plan Position Indicator (PPI)를 분석하였다. 이는 레이더 관측 고도각이 수리산(0.8°, 1.38°, 15°), 망일산(0.8°, 1.42°, 15°), 덕적도(1.5°, 2.14°, 15°)로 세 종류만 있고, 고도각 간격차가 크기 때문에 특정 고도의 Constant Altitude Plan Position Indicator (CAPPI)를 이용할 경우 자료가 내삽될 가능성이 크기 때문이다. 본 연구에서는 고도각 자료와 지상 강우의 상관성을 높게 하기 위해 세 레이더의 최저 고도각 자료를 분석하였다. 레이더 위치에서 멀어질수록 신호가 감쇄될 것을 고려하여, 두 개 이상의 레이더가 중첩되는 지역에서는 가장 인접한 지역의 레이더로 관측된 값을 분석하였다.

2.2.2 호우사상

호우사상은 2020년 6~8월에 국지적으로 발달한 강우 시스템을 분석하였다. 중부 지방에서는 이 기간에 발생한 장마가 역대 최장으로 기록되었고, 약 850 mm의 강우가 발생한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 총 강우량이 30 mm 이상, 강우 지속시간이 6시간 이상 관측된 호우사상을 분석하였다. 호우사상은 서해에서 수도권으로 레이더 에코가 영향을 준 사상을 기준으로 서울 관측소에서 무강우 기간이 8시간 미만으로 관측된 사례로 결정하였다. 본 연구에서 분석한 호우사상의 지속시간과 총 강우량을 정리하여 나타내면 Table 2와 같고, 사례별 강우주상도를 Fig. 5에 나타냈다.

Table 2에서 확인할 수 있는 것처럼 모든 호우사상에 대해 서울 지점에서 60 mm 이상의 많은 강우가 관측되었다. Event 1은 장마전선 영향을 받아 14시간 동안 75.9 mm, Event 2와 3은 모두 수도권과 중부 지역에서 발생한 호우에 영향을 받아 각각 20시간 동안 102.4 mm, 15시간 동안 69.0 mm의 강우가 발생하였다. Fig. 5(a)를 보면 Event 1은 다른 사상과 비교하여 지속시간은 작고, 강우강도의 진동 폭도 비교적 완만한 것으로 나타났다. 이는 장마전선이 통과하면서 서울에 지속적으로 영향을 준 것을 나타낸다. Event 2와 3을 나타낸 Figs. 5(b)~5(c)에서는 모두 호우 지속시간 동안 단시간에 강우강도가 급격히 증가한 패턴이 반복되는 것으로 나타났다. 이는 시공간적으로 불연속적이고 국지성이 강한 집중호우의 특성을 나타내는 것으로, Event 2의 경우 순간적으로 강우강도가 최대 80 mm/hr 이상 관측되었다.

호우사상 별로 발생한 피해 현황을 보면, Event 1, 3에서는 수도권 지역에 갑작스러운 물 폭탄이 발생하면서 침수 피해가 크게 나타났다. 특히, Event 3의 경우 한강이 범람하면서 서울 동부간선도로가 전면 통제되는 상황도 나타났다. 다른 사례와 비교하여 강우강도가 가장 크게 나타났던 Event 2에서는 중부 지방에 내린 집중호우와 댐 방류로 인해 지역적으로 호우주의보/경보가 발령되었고, 서울 한강대교에서는 9년 만에 홍수주의보가 발령되었다. 본 연구에서는 이러한 세 개 집중호우 사상에 대해 이중편파 레이더 자료의 관측 특성을 분석하였다.

Table 2. Rainfall Events Selected in this Study

Event	Duration	Total accumulated rainfall in Seoul (mm)
1	2020/06/29/20:10~2020/06/30/10:00	75.9
2	2020/08/03/02:00~2020/08/03/21:50	102.4
3	2020/08/15/02:10~2020/08/15/17:20	69.0

Fig. 5. Rainfall Hyetograph for the Three Events. (a) Event 1, (b) Event 2, (c) Event 3

3. 레이더 자료를 이용한 집중호우 사상 분석

집중호우 사상에 대한 레이더 관측 특성을 분석하기 위해 호우 기간 중 수도권 주변에 영향을 크게 준 시간에 관측된 레이더 영상과 지상 강우 분포를 분석하였다. Event 1은 수도권을 포함하여 레이더 강우 면적이 가장 크게 나타났던 6월 29일 23시 50분 자료를 분석하였다. 중부 지방의 장기간 집중호우에 영향을 준 Event 2는 호우 기간 중 시간별 강우강

도 변화가 가장 크게 나타난 8월 3일 9시 자료를 분석하였다. 수도권 지역에 물 폭탄을 발생시킨 Event 3은 순간 강우강도가 가장 크게 나타난 8월 15일 6시 30분 자료를 분석하였다. 호우사상 별로 분석시간의 지상 강우 분포와 수리산, 망일산, 덕적도 레이더로 관측된 반사도, 차등반사도, 비차등위상, 교차상관계수 영상을 나타내면 Fig. 6과 같다.

Fig. 6에서 확인할 수 있듯이, 세 개 사례 모두 레이더가 관측되지 않는 영역을 제외하고 지상 강우와 레이더 분포는

Fig. 6. Images of Rain Gauge Rainfall and Radar Parameters for the Three Events. (a) Event 1 (2020/06/29/23:50), (b) Event 2 (2020/08/03/09:00), (c) Event 3 (2020/08/15/06:30)

비교적 유사한 형태로 나타났다. 특히, 수도권에서 강우강도가 강할수록 이러한 경향이 뚜렷하게 나타났다. Event 1은 서해에서 유입된 강우와 남부 지방에서 유입된 강우가 합쳐져 수도권에 지속적인 영향을 주었고, Event 2와 Event 3은 서해에서 수도권 지역으로 띠 형태로 발달한 시스템이 영향을 주었다. Event 3의 경우 다른 두 사례와 비교하여 서울과 경기 지역에서 지상 강우가 가장 크게 나타났다. 레이더 반사도는 세 개 사례 모두 서울과 주변 지역이 다른 지역과 비교하여 상대적으로 크게 관측되었고, 집중호우 영향으로 반사도가 40 dBZ 이상 크게 감지될 수 있는 것으로 나타났다.

차등반사도는 주변 지역과 비교하여 레이더 반사도가 상대적으로 강하게 나타났던 지역에서 대체로 양의 값으로 나타났고, 그렇지 않은 지역에서는 0이나 음의 값으로 나타났다. 이는 시스템이 강화된 내륙에서 입자 크기가 증가된 호우의 전형적인 양상을 보여준다. 또한, 집중호우 주변 지역에 강우 시스템이 크게 발달하지 못한 약한 구름이 분포하고 있는 국지적 특성을 확인시켜 준다.

비차등위상은 다른 레이더 변수와 비교하여 지상 강우와 가장 유사한 분포 양상으로 나타났다. 반사도가 20 dBZ 이상 상대적으로 강하게 나타난 지역에서 비차등위상이 크게 관측되었고, 그렇지 않은 지역에서는 비차등위상이 작게 관측되었다. 반사도가 주변 지물의 영향으로 신호 감쇄의 영향을 크게 받을 수 있는 점을 고려하면, 비차등위상이 집중호우 특성 분석 유리한 것을 짐작할 수 있다. 또한, 비차등위상은 집중호우 주변으로 입자가 작은 구름이 분포

할 수 있는 차등반사도의 분석 결과를 검증해 주었다.

교차상관계수는 세 개 사례 모두 대체로 0.9 이상으로 나타났다. 이는 대기수상체 변동이 거의 없는 집중호우의 전형적인 특성을 나타내며, 세 지역에 설치된 연구용 레이더의 일관된 관측 성능을 확인시켜 준다. 서해 일부 지역에서 교차상관계수가 0.7 이하로 작게 관측된 부분도 있지만, 이러한 지점에서 상대적으로 크게 나타난 반사도, 비차등위상과 상대적으로 작게 나타난 차등반사도는 주변 체프나 선박이 레이더 관측에 영향을 준 것으로 판단된다.

집중호우에 대한 이러한 관측 결과는 지상 강우와 레이더 변수가 강하진 않으나 상관성이 있는 것을 보여준다. 호우사상 별로 레이더 관측 특성을 분석하기 위해 본 연구에서는 Table 2의 호우 기간 중 서울 지점의 지상과 레이더 강우, 반사도, 차등반사도, 비차등위상, 교차상관계수의 시간별 변화를 Fig. 7과 같이 비교하였다. 여기서 레이더 강우는 JPOLE와 CSU-HIDRO 알고리즘과 $Z=148R^{.159}$ 관계를 이용하여 추정하였다. 관측된 자료의 특성을 분석하기 위해 Table 3에 호우 사상별로 집중호우의 영향을 받아 강우가 상대적으로 크게 증가한 구간의 기본 통계량을 정리하였고, 지상 강우 대비 레이더 강우의 정확성을 Table 4에 나타냈다.

Fig. 7에서 지상 강우는 10분 관측자료, 레이더는 5분 간격으로 관측된 값을 나타낸다. 음영색으로 표기된 부분은 Fig. 5의 강우 주상도에서 지상 강우가 상대적으로 크게 증가한 구간을 나타낸다. Event 1의 결과를 나타낸 Fig. 7(a)를 보면, 반사도, 차등반사도, 비차등위상은 대체로 지상 강우

(a)

(b)

(c)

Fig. 7. Time Series of Rain Gauge and Radar Rainfall and Radar Parameters for the Three Events. (a) Event 1, (b) Event 2, (c) Event 3. From Above, Rain Gauge and Radar Rainfall, Reflectivity, Differential Reflectivity, Specific Differential Phase, and Copolar Correlation Coefficient

의 변화 양상과 유사하게 나타났고, 교차상관계수는 거의 모든 구간에서 0.95 이상으로 전형적인 호우특성을 나타냈다. 지상 강우가 크게 증가한 음영 구간은 Table 3과 같이 6월 30일 0~6시까지지로, 이 기간에 반사도는 15.4~37.6 dBZ, 차등반사도는 -1.2~1.4 dB, 비차등위상은 -2.1~1.4 deg/km로 나타났다. 대체로 지상 강우가 5.0 mm/hr 이상이면 반사도는 25 dBZ 이상, 차등반사도와 비차등위상이 양의 값으로 나타났다. 지상 강우가 5.0 mm/hr 미만이면 반사도는 20 dBZ 미만, 차등반사도와 비차등위상은 음의 값으로 나타났다. 기존 연구를 참고하면 전자의 조건에서는 강한 강우, 후자의 조건에는 이슬비와 같은 약한 강우로 분류되었다(Vivekanandan et al., 1999; Straka et al., 2000). 이러한 결과는 불규칙한 구름의 영향으로 일시적으로 강우가 급격히 증가할 수 있는 집중호우의 특성을 확인시켜 주었다.

세 개 방법으로 추정된 레이더 강우는 전 구간에서 지상 강우보다 작게 나타났지만, 강우강도가 순간적으로 크게 나타난 침투 시간대에 레이더 강우도 상대적으로 크게 추정된 것을 알 수 있다. 전 구간에서 JPOLE로 추정된 강우가 가장 크게 나타났지만, CSU-HIDRO가 반사도만을 이용한 $Z=148R^{1.59}$ 와 유사하게 지상 강우의 증감 패턴을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 특히, 지상 강우가 가장 크게 감지된 4시경에 CSU-HIDRO로 추정된 강우가 다른 두 방법보다 지상 강우에 가깝게 추정된 것으로 나타났다. Table 4를 보면 CSU-HIDRO가 JPOLE 보다 MAE는 2.0% 작게 RMSE는 32.4%까지 작게 나타났고, 반사도만을 이용하여 추정된 결과와 비교하여 오차가 크게 차이나지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 강우 관측에 이중편파 레이더를 활용하는 것이 효과적인 것을 보여준다.

Event 2의 경우 Fig. 7(b)와 같이 호우 기간에 강우가 큰 폭으로 증가한 부분을 세 구간으로 구분할 수 있다. Table 3에서 알 수 있듯이, 이러한 구간은 순서대로 8월 3일 2시에서 6시 35분, 7시 55분에서 10시, 18시 30분에서 20시 10분으로 나타났다. 이 구간 중 지상 강우가 15.0 mm/h 이상 나타난 경우 대체로 반사도는 20.0~46.0 dBZ, 차등반사도는 -1.0~1.2 dB, 비차등위상은 0.7~2.3 deg/km, 교차상관계수는 0.95 이상으로 나타났다. 이는 Table 3의 변수별 최소, 최대 범위 내 값으로, Event 1에서 강한 강우로 분류되었던 기존 연구의 범위에 포함된다. 지상 강우가 5.0 mm/hr 미만으로 나타난 구간에서는 레이더 편파변수의 변동성이 크게 나타나는 문제가 있지만, 이러한 결과는 강우강도가 큰 집중호우에 대한 소형 기상레이더의 일관된 관측 성능을 확인시켜 주었다.

레이더 강우는 Event 1과 다르게 침투 시간대에 대체로 지상 강우보다 크게 추정되는 것으로 나타났다. 크기 별로 비교하면 JPOLE이 가장 크게 강우를 추정하였고, CSU-HIDRO는 JPOLE 보다는 약간 작게, 그리고 반사도만을 이용하여 추정된 경우가 가장 작게 모의되었다. 또한, 대체로 지상 강우의 침투 시간과 일치하게 레이더 강우도 크게 추정된

Table 3. Basic Statistics During Rainfall Increasing Term for the Three Rainfall Events in this Study

Event	Rainfall Increasing Term	Basic Statistics	Rain Gauge Rainfall (mm/hr)	Radar Reflectivity (dBZ)	Differential Reflectivity (dB)	Specific Differential Phase (deg/km)	Copolar-Correlation Coefficient
1 (06/30)	1 (00:00~06:00)	Max.	25.20	37.63	1.40	1.38	0.99
		Min.	0.60	15.38	-1.20	-2.07	0.96
		Mean	10.14	26.66	0.11	-0.34	0.98
2 (08/03)	1 (02:00~06:35)	Max.	48.00	45.88	2.67	2.54	0.99
		Min.	0.60	3.50	-3.20	-2.81	0.75
		Mean	9.90	21.54	0.18	0.22	0.96
	2 (07:55~10:00)	Max.	61.80	49.38	2.75	3.81	1.00
		Min.	1.20	4.38	-2.56	-1.53	0.79
		Mean	18.18	26.64	0.20	0.37	0.96
	3 (18:30~20:10)	Max.	87.00	37.25	1.02	4.67	0.99
		Min.	0.60	6.00	-0.33	-2.29	0.77
		Mean	18.54	22.02	0.27	-0.07	0.97
3 (08/15)	1 (02:10~03:20)	Max.	20.40	37.63	1.67	4.44	0.99
		Min.	0.60	9.63	-1.06	-1.31	0.95
		Mean	8.46	24.67	0.30	0.51	0.98
	2 (04:50~10:10)	Max.	60.60	34.88	1.69	4.01	1.00
		Min.	0.60	1.25	-2.95	-1.87	0.87
		Mean	7.74	18.65	-0.08	-0.46	0.97
	3 (12:50~17:20)	Max.	78.00	35.50	1.67	3.11	1.00
		Min.	0.60	1.50	-1.01	-2.07	0.88
		Mean	11.52	14.99	0.18	-0.28	0.97

Table 4. Accuracy Evaluation of Radar Rainfall Compared to Rain Gauge Rainfall

	Event 1			Event 2			Event 3		
	JPOLE	CSU-HIDRO	Z=148R ^{1.59}	JPOLE	CSU-HIDRO	Z=148R ^{1.59}	JPOLE	CSU-HIDRO	Z=148R ^{1.59}
ME (mm)	-2.897	-4.801	-4.295	5.239	-2.318	-7.405	-3.469	-5.035	-4.559
MAE (mm)	4.897	4.801	4.317	17.422	16.126	10.586	4.997	5.070	4.580
RMSE (mm)	10.135	6.850	6.395	32.554	29.370	20.246	8.585	8.133	7.724

것을 알 수 있고, Table 4를 통해 JPOLE보다 CSU-HIDRO가 지상 강우와의 편차가 작음을 확인할 수 있다. 특히, ME는 CSU-HIDRO가 -2.318로 JPOLE보다 매우 작게 나타났고, 이는 반사도만을 이용하여 추정된 결과보다도 우수하게 나타났다. MAE와 RMSE는 Event 1보다 크게 나타났지만, CSU-HIDRO가 JPOLE보다 각 7.4%, 9.8%로 더 작게 나타났다. 전반적으로 앞의 사상보다 강우 변동이 크게 나타났기 때문에 지상 강우와 비교하여 레이더 강우의 오차가 크게

나타났지만, 이종편파 레이더가 집중호우의 강우 변동성을 잘 모의하는 것을 알 수 있다.

Event 3도 호우 기간에 강우가 세 차례 정도 큰 폭으로 증가한 것으로 나타났다. Table 3에서 이 구간은 8월 15일 2시 10분에서 3시 20분, 4시 50분에서 10시 10분, 12시 50분에서 17시 20분인 것을 알 수 있다. Fig. 7(c)를 보면 대체로 지상 강우의 침투 시간에 레이더 강우가 크게 증가한 것으로 나타났지만, 앞의 두 사상과 달리 6시에서 7시 사이에

는 지상 강우는 크게 증가하였지만 레이더 강우가 거의 추정되지 않는 문제가 나타났다. 이러한 구간에서는 레이더 관측과 지상 관측 사이에 시간적인 편차가 발생한 것을 확인할 수 있는데, 이는 집중호우에 동반된 강한 풍속이 영향을 준 것으로 판단된다. 특히, 그림에서는 두 번째로 지상 강우의 변동이 크게 나타날 때 레이더와의 시간차가 가장 크게 나타났으며, 이때 반사도는 8.9~30.0 dBZ, 차등반사도는 -2.1~1.7 dB, 비차등위상은 -1.1~2.0 deg/km로 앞의 두 사상보다는 변동 범위가 조금 더 크게 나타났다. 이는 집중호우의 강우 변동이 더 큰 것을 보여주는 것으로, Fig. 7(c)에서 지상 강우의 변동이 크게 나타난 것을 통해서도 확인할 수 있다. 교차상관계수는 다른 두 사상과 동일하게 강우가 발생한 기간에는 거의 모든 구간에서 0.95 이상으로 나타났다.

지상 강우 대비 세 개 방법으로 추정된 레이더 강우를 비교한 결과에서는 다른 두 사상과 달리 Table 4에서 이중편파 레이더로 추정된 강우와 반사도만을 추정된 강우의 오차가 크게 다르지 않는 것으로 나타났다. 이 경우에는 CSU-HIDRO가 JPOLE보다 ME와 MAE는 좀 더 크게 나타났지만, RMSE는 CSU-HIDRO가 5.3% 더 작게 나타났다. 다른 사상과 비교하여 Event 3이 지상 강우의 변화가 큰 것을 고려하면 이러한 결과는 앞의 두 결과와 같이 집중호우 특성 분석에 이중편파 레이더 자료를 활용하기 적합한 것을 확인해 준다.

상기와 같은 세 개 사상의 분석 결과를 통해 집중호우에 대한 연구용 소형 기상레이더의 관측 특성을 확인할 수 있었다. 비록 풍속이 강하거나 강우가 작은 경우에는 레이더 관측에 오차가 반영될 가능성이 있지만, 서해에서 수도권 지역으로 유입되는 집중호우를 관측하기에는 적합한 것을 알 수 있었다. 반사도와 비차등위상은 지역에 따라 강우강도의 변동성을 보이는 집중호우의 국지적 특성을 분석하기 적합한 것을 확인하였고, 특히, 비차등위상이 반사도보다 호우 관측에 유리한 이점이 있는 것을 알 수 있었다. 차등반사도는 집중호우를 동반하는 중규모 구름의 내부적 변화를 분석할 수 있고, 호우관측에 대한 일관된 교차상관계수는 레이더 변수 분석의 신뢰성을 높여 주었다. 아울러 지상 강우 대비 추정된 레이더 강우의 오차가 작지는 않았지만, 사례 분석을 통해 CSU-HIDRO가 JPOLE 보다 32.4%까지 정확하게 집중호우를 관측할 수 있음을 알 수 있었고, 집중호우 관측에 대한 이중편파 레이더의 활용 가능성을 확인할 수 있었다. 특히, 강우 시스템 변동에 따라 집중호우가 크게 영향을 주는 침투 시간을 예측하기 적합할 것을 알 수 있었다. 결과적으로 이중편파 레이더 변수를 이용하면 중규모 구름이 강화되거나 약화되는 현상을 추적하는 것이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 수도권 지역의 집중호우 현상에 대한 연구용 이중편파 레이더의 관측 특성을 분석하였다. 이를 위해 2020년 집중호우로 인한 침수 피해가 크게 발생했던 세 개 강우사상을 선별하였고, 강우 변화가 크게 나타난 시간에 관측된 레이더 자료를 분석하였다. 반사도, 차등반사도, 비차등위상, 교차상관계수 자료가 이용되었고, 강우 시스템의 유입에 따라 시간별로 다르게 나타나는 물리적 특성 변화를 분석하였다. 또한, 이중편파 변수로 추정된 레이더 강우와 지상 강우를 비교하였다. 연구를 통해 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 레이더 자료와 지상 강우 분포는 유사하게 나타났으며, 세 개 호우사상 모두 서해에서 유입된 강우가 수도권 지역의 집중호우에 발생에 영향을 준 것으로 나타났다. 레이더 반사도는 수도권 지역에서 집중호우 영향으로 40 dBZ 이상 크게 감지될 수 있었고, 차등반사도는 내륙에서 시스템이 강화되면서 입자 크기가 증가된 것을 나타냈다. 비차등위상은 지상 강우와 가장 유사한 분포로 반사도보다 호우 관측에 유리하며, 차등반사도와 함께 집중호우의 국지적 특성을 확인시켜 주었다. 교차상관계수는 집중호우 관측에 대한 연구용 이중편파 레이더의 일관된 관측 성능을 확인해 주었다.
- 2) 지상 강우가 크게 증가한 구간을 분석한 결과 지상 강우가 5.0 mm/hr 이상이면 반사도는 25 dBZ 이상, 차등반사도와 비차등위상은 양의 값으로 나타났다. 지상 강우가 5.0 mm/hr 미만이면 차등반사도와 비차등위상이 음의 값을 갖거나 편파변수의 변동성이 크게 나타났다. 이러한 현상은 집중호우의 강우 변동성이 클수록 더 크게 나타나는 경향이 있었다. 또한, 교차상관계수는 모든 집중호우 사상에 대해 0.95 이상으로 일관되게 나타났다. 전반적으로 강우강도가 큰 집중호우에 대한 연구용 이중편파 레이더의 일관된 관측 성능을 확인해 주었다.
- 3) 레이더 강우와 지상 강우를 비교한 결과 레이더 강우가 지상 강우의 침투 시간을 잘 모의하는 것으로 나타났고, 이중편파 레이더로 집중호우를 추정할 경우 JPOLE보다 CSU-HIDRO가 지상 강우와의 오차가 작고 최대 32.4% 더 정확하게 강우를 추정할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 반사도만을 이용하여 강우를 추정된 결과와 비교하여 집중호우에 대한 이중편파 레이더의 활용 가능성을 확인할 수 있었다. 특히, 강우 시스템의 변동성을 추적하기에 이중편파 레이더가 효과적인 것을 확인할 수 있었다.

상기와 같은 결과를 통해 수도권 지역에서 발생한 집중호우 사상에 대한 연구용 이중편파 레이더의 관측 특성을

확인할 수 있었다. 레이더 개별적으로는 차폐로 인한 관측 한계가 있지만 세대의 소형 레이더를 모두 이용하여 수도권 지역으로 접근하는 위험기상 현상을 감지하고 강우 시스템의 이동 방향을 예측하기에 충분한 것을 알 수 있었다. 특히, 이중편파 레이더 변수를 이용하면 중규모 구름이 강화되거나 약화되는 현상을 추적하는 것이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 특성은 매년 발생빈도가 점진적으로 증가하는 집중호우와 태풍으로 인한 수도권 지역의 침수 피해에 대한 근본적인 대책 방안을 수립하는데 기여할 수 있다. 향후 국지적 호우에 대한 보다 정량적인 강우 정보를 생성하기 위해 연구용 레이더 관측망과 우량계, 광학우적계 등의 지상 관측 자료를 함께 분석할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 기상청 국립기상과학원 기상조절 및 구름물리 연구(KMA2018-00224)의 지원을 받았습니다. 연구용 소형 기상레이더 운영 자료 산출에 대해 기상청 기상레이더센터에 감사드립니다.

References

- Bringi, V.N., and Chandrasekar, V. (2001). *Polarimetric doppler weather radar: Principles and applications*. Cambridge University Press.
- 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.
- Kim, G., Ku, J.M., Ro, Y., and Yoo, C. (2016). Evaluation of dual polarization rainfall estimation algorithm applicability in Korea: A case study on Biseulsan radar. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 16, No. 1, pp. 281-293.
- KMA. (2016). *Annual climatological report 2016*. Korea Meteorological Administration.
- KMA. (2017). *Annual climatological report 2017*. Korea Meteorological Administration.
- KMA. (2020a). *Annual climatological report 2020*. Korea Meteorological Administration.
- KMA. (2020b). *A research on development plans for a mid-to long-term the meteorological task*. Korea Meteorological Administration.
- KMS. (1999). *Atmospheric science*. Korea Meteorological Society, p. 175.
- Kumjian, M.R. (2013). Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part I: description of the polarimetric radar variables. *Journal of Operational Meteorology*, Vol. 1, No. 19, pp. 226-242.
- Matrosov, S.Y. (2021). Polarimetric radar variables in snowfall at Ka-and W-band frequency bands: A comparative analysis. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 38, No. 1, pp. 91-101.
- Meischner, P. (2005). *Weather radar: principles and advanced applications*. Springer Science and Business Media.
- Misumi, R., Uji, Y., and Maesaka, T. (2021). Modification of raindrop size distribution due to seeder-feeder interactions between stratiform precipitation and shallow convection observed by X band polarimetric radar and optical disdrometer. *Atmospheric Science Letters*, Vol. e1034, pp. 1-11.
- MOIS. (2019). *Annual disaster report 2019*. Ministry of the Interior and Safety.
- MOIS. (2020). *Disaster and safety management in Korea*. Ministry of the Interior and Safety.
- Noh, S.J., Lim, S., Choi, S.W., Hwang, S.H., and Lee, D.R. (2014). Comparison of quantitative precipitation estimation algorithms using dual polarization radar measurements in Korea. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 6, pp. 105-116.
- Reinoso-Rondinel, R., and Schleiss, M. (2021). Quantitative evaluation of polarimetric estimates from scanning weather radars using a vertically pointing micro rain radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 38, No. 3, pp. 481-499.
- Ryzhkov, A.V., Giangrade, 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. 263-268.
- Ryzhkov, A.V., Giangrande, S.E., and Schuur, T.J. (2003). *Rainfall measurements with the polarimetric WSR-88D radar*. Report of the National Severe Storms Laboratory, Norman, OK, pp. 1-98.
- Shin, K., Song, J.J., Bang, W., and Lee, G. (2021). Quantitative precipitation estimates using machine learning approaches with operational dual-polarization radar data. *Remote Sensing*, Vol. 13, No. 4, pp. 1-21.
- Straka, J.M., Zrnić, D.S., and Ryzhkov, A.V. (2000). Bulk hydrometeor classification and quantification using polarimetric radar data: Synthesis of relations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 39, No. 8, pp. 1341-1372.
- Thurai, M., Wolff, D., Marks, D., Pabla, C., and Bringi,

V. (2021). Separation of stratiform and convective rain types using data from an s-band polarimetric radar: A case study comparing two different methods. *Environmental Sciences Proceedings*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-9.

Vivekanandan, J., Zmic, D.S., Ellis, S.M., Oye, R., Ryzhkov, A.V., and Straka, J. (1999). Cloud microphysics retrieval using S-band dual-polarization radar measurements. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 80, No. 3, pp. 381-388.

Wang, Y., Tang, L., Chang, P.L., and Tang, Y.S. (2021).

Separation of convective and stratiform precipitation using polarimetric radar data with a support vector machine method. *Atmospheric Measurement Techniques*, Vol. 14, No. 1, pp. 185-197.

Received	September 1, 2021
Revised	September 2, 2021
Accepted	January 24, 2022