



Areal average rainfall estimation method using multiple elevation data of an electromagnetic wave rain gauge

Lim, Sanghun^{a*} · Choi, Jeongho^b · Kim, Won^c

^aResearch Fellow, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

^bAdjunct Professor, Department of Mechatronics Engineering, Chosun College of Science & Technology, Gwangju, Korea

^cSenior Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

Paper number: 20-032

Received: 8 April 2020; Revised: 20 April 2020; Accepted: 20 April 2020

Abstract

In order to predict and prevent hydrological disasters such as flood, it is necessary to accurately estimate rainfall. In this paper, an areal average rainfall estimation method using multiple elevation observation data of an electromagnetic wave rain gauge is presented. The small electromagnetic rain gauge system is a very small precipitation radar that operates at K-band with dual-polarization technology for very short distance observation. The areal average rainfall estimation method is based on the assumption that the variation in rainfall over the observation range is small because the observation distance and time are very short. The proposed method has been evaluated by comparing with ground instruments such as tipping-bucket rain gauges and a Parsivel. The evaluation results show that the methodology works fairly well for the rainfall events which are shown here.

Keywords: Electromagnetic wave rain gauge, Multiple elevation, Dual polarization, Rainfall estimation

전파강수계의 다중 고도각 자료를 이용한 면적 평균 강우 추정 기법

임상훈^{a*} · 최정호^b · 김원^c

^a한국건설기술연구원 국토보전연구본부 연구위원, ^b조선이공대학교 메카트로닉스공학과 겸임교수,

^c한국건설기술연구원 국토보전연구본부 선임연구위원

요 지

홍수와 같은 수문 재해를 예측하고 예방하기 위해서는 강우량을 정확하게 추정해야한다. 본 연구에서는 전파강수계의 다중 고도 관측 데이터를 사용한 면적 평균 강우량 추정 방법을 개발하였다. 소형 전파강수시스템은 K 대역 이중 편파 기술을 사용하여 매우 짧은 거리를 관측하는 소형 레이더이다. 면적 평균 강우 추정 방법은 관측 거리와 시간이 매우 짧기 때문에 관측 범위에서 강우 변동이 작다는 가정을 기반으로 한다. 제안된 방법은 지상우량계 및 파시벨우적계와 같은 지상 장비와 비교하여 평가되었다. 비교 평가된 강우 사상들에 대해 전파강수계로부터 추정된 평균강우와 지상장비로부터 관측된 강우량이 잘 일치함을 보여준다.

핵심용어: 전파강수계, 다중 고도각, 이중편파, 강우추정

*Corresponding Author. Tel: +82-31-910-0373
E-mail: slim@kict.re.kr (S. Lim)

1. 서론

신뢰성 높은 수문 재해 예경보 시스템 구축을 위해서는 기존의 지점 중심 우량계 등의 의존에서 벗어나 보다 효과적인 관측 방법이 필요하다. 지상에 설치된 우량계는 강우를 지속적으로 직접 측정하는데 강점이 있지만, 우량계가 없는 지역의 공간 강우 분포에 대한 정확한 정보를 제공하는 데는 한계가 있다(Hunter, 1996). 이에 대한 대안으로서 최근 레이더를 이용한 강우 추정 방법이 활발하게 연구되고 있다(Bringi and Chandrasekar 2001; Ryzhkov *et al.*, 2005; Wang and Chandrasekar, 2010; Cifelli *et al.*, 2011; Lim *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2015). 레이더로부터 강우의 공간 분포에 대한 정보를 획득함으로써 보다 정확한 재해예보가 가능하다. 특히 이중편파 레이더의 도입에 따라 보다 정확한 강우량 추정이 가능하게 되어 홍수 등의 수문재해 예측을 위한 레이더의 활용도가 높아지고 있다. 그러나 이러한 레이더도 공간적인 분포에 따른 정확성의 차이가 존재한다. 기상(강우)레이더는 현존하는 가장 보편적인 광역 강수분포 탐지 장비이며, 지상의 우량계와 검보정 절차를 거쳐 강수강도 추정에 활용되고 있다. 그러나 주로 지상으로부터 수백 m에서 수 km 이상의 고도에서 관측을 수행하여 지상강우량에 대한 직접적인 반영에 어려움이 있다. 또한 단위 공간 셀이 수백 $m^2 \sim 1 km^2$ 이상으로 지상의 강우량 편차를 반영하지 못하므로 실측용 우량계로 사용하기에는 다소 어려움이 있다(KICT, 2014).

본 연구에서는 기존의 원통형 지상우량계와 같은 관측 기능을 수행하면서 공간적 한계를 극복할 수 있는 고분해능의 강우 공간분포를 기반으로 지형의 영향을 고려할 수 있는 새로운 개념의 전자파를 이용한 전파강수계(Electromagnetic Wave Rain Gauge (EWRG))를 개발하였다. 일반적으로 이중편파 기상레이더 자료를 이용한 정량적 강우 강도는 레이더 변수들(반사도(Z_h), 차등 반사도(Z_{dr}) 및 비차등위상차(K_{dp}))를 이용하여 게이트 단위(셀 단위)로 계산된다. 이중편파레이더를 위한 대표적인 QPE 알고리즘으로는 JPOLE (Joint Polarization Experiment)(Ryzhkov *et al.*, 2005)과 CSU (Colorado State University)(Cifelli *et al.*, 2011)가 있다.

이에 반해 전파강수계는 지점 우량이 아닌 관측면적에 대한 우량을 추정한다. 본 연구에서는 이중편파 전파강수계의 다중 고도 관측 자료를 사용하여 정확한 면적 평균 강우량 추정치를 제공하는 방법을 개발하였다. 다중고도의 반사도, 비차등위상차의 고도각별 평균값을 이용하여 면적 단위의 면적 평균 강우 강도를 추정한다. 전파강수계의 단위 면적 평균 강우는 단위 면적의 평균 레이더 변수들을 이용한 추정

강우를 의미하며 관측범위에 따라 달라진다. 본 연구에서 면적강우는 전파강수계 관측 반경 1 km을 가정하여 $3.14 km^2$ 을 의미한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 개발된 1차 전파강수계 시제품의 시스템 규격 및 스캔전략에 대해 간략하게 설명하고 제안된 평균 면적 강우 추정 방법에 대해 3장에서 기술하였다. 4장에서는 제안된 면적강우 추정 기법을 여러 강우사상에 적용하고 그 결과를 논의하였다. 마지막으로, 5장에서는 본 연구에서 제시한 방법과 결과들에 대해 간략히 요약 정리하였다.

2. 전파강수계 개요

2.1 전파강수계 목적 및 규격

본 연구에서 개발한 시스템은 전자파를 이용한 근거리의 고분해능 및 높은 관측변수-우량 관계를 적용하여 강우량을 측정함으로써 오랫동안 사용되어 온 전통적인 물받이 방식의 지상우량계를 보완하여 면적 우량 관측에 사용하기 위한 장비이다. 이 시스템은 이중 편파 기술을 사용하며 K 대역에서 작동한다. Fig. 1은 전파강수계의 프로토타입 사진이다. 이 시스템은 송신기, 수신기 및 데이터 수집 시스템을 2개의 어셈블리로 통합한 초소형 통합시스템이다. 파라볼릭 접시 안테나의 크기는 50 cm이며 빔폭은 1.6° 이다. 송수신기는 4 W의 피크 전력으로 LFM (Linear Frequency Modulation) 신호를 생성한다. 전파강수계의 보다 자세한 규격은 Table 1에 제시하였다(Jang *et al.*, 2018).

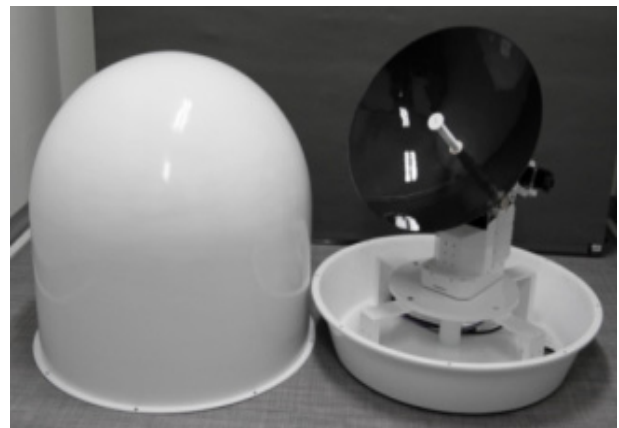


Fig. 1. EWRG 1st prototype system picture. (left) Radome, (right) antenna, pedestal and transmitter/receiver

Table 1. Specification of the EWRG 1st prototype

Item	Specification	Remark
Antenna shape	Parabolic reflector type	
Antenna diameter (cm)	50	Carbon
Polarization	Simultaneous (H/V)	
Beam width (deg)	1.7	
Gain (dBi)	38	
VSWR	< 1.5:1	
Driving range (deg)	0~360 (Azimuth), -2~+92 (Elevation)	
Driving speed (RPM)	4 (Azimuth), 2 (Elevation)	
Operating frequency (GHz)	24.15	BW: 200MHz
Tx power (W)	4 (H/V)	
Effective observation range (m)	1-3 km	
Waveform	LFM pulse	pulse compression
Pulse width (μs)	0.2, 1	
PRF (Hz)	10,000	
Distance resolution (m)	30	
ADC resolution (bit)	14	

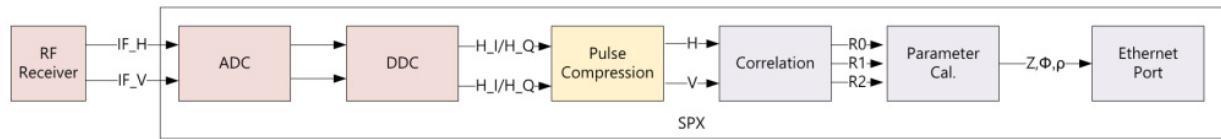


Fig. 2. Signal processing function flowchart

2.2 전파강수계 자료 처리

전파강수계의 송수신장치로부터 수신한 수평 채널과 수직 채널의 중간주파수(IF) 신호를 ADC (Analog to Digital Converter)에서 샘플링하여 디지털 신호로 변환하고 DDC (Digital Down Converter)와 펄스압축 과정을 거쳐 I/Q 데이터로 변환한다. I/Q 데이터로부터 상관계수와 기상변수를 계산하여 최종 산출물을 이더넷을 통하여 운영제어장치로 전달한다(Fig. 2).

수평 및 수직 편파별 상관계수 R0, R1, R2로부터 편파별 반사도(Z), 시선속도(V), 스펙트럼 폭(W)과 이중편파 기상변수인 차등반사도(ZDR)를 계산한다. 교차상관계수 ρ_{hv} (0)로부터 이중편파 기상변수 상관계수(ρ_{HV}), 차등위상차(Φ_{DP})를 계산하며, 또한 품질관리를 위한 변수로 신호대잡음비(SNR), 신호 품질지수(SQI) 등도 계산한다. 최종 계산된 기상변수는 이더넷을 통하여 외부로 전달한다.

2.3 전파강수계 스캔 전략

전파강수계는 일반적으로 낮은 고도의 강우를 관찰하기

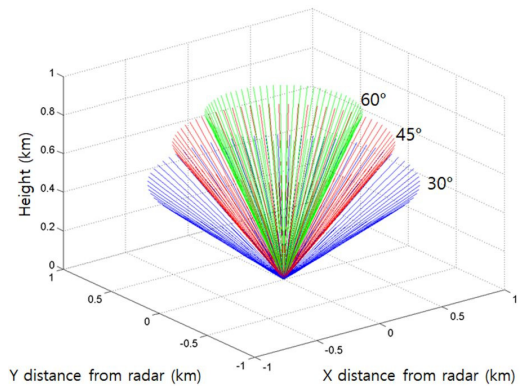


Fig. 3. Scan strategy of the EWRG

위해 지면 가까이 설치한다. 강우 과정의 복잡성과 레이더 변수의 수직 변동성을 고려할 때, 낮은 고도 관측은 강우 불확실성을 줄이기 위해 매우 중요하다(Wang and Chandrasekar, 2010). 그러나 지면 가까이 설치하면 건물이나 산등의 지형 지물에 의해 자료가 영향을 받을 수 있다. 따라서, 지상 클러터 영향을 최소화하고 낮은 고도의 강우 관측을 고려해 특정 스

캔 전략을 필요로 한다. 현재 면적 평균 강우 추정을 위해서 30, 45, 60도 고도의 스캔을 사용한다. Fig. 3은 1차 시제품을 이용한 면적 강우 추정 방법을 적용하기 위해 사용된 스캔 전략을 보여준다.

3. 전파강수계 면적강우량 산정 기법

초단거리를 관측하는 이중 편파 전파강수계의 다중 고도 관측 데이터를 이용한 면적 평균 강우량 추정 방법은 3 단계로 구성된다. (i) 초단거리 이중 편파 레이더의 다중고도 관측자료 중 수평반사도 및 비차등위상차를 고도각 별로 입력받는 단계, (ii) 입력된 수평반사도와 비차등위상차(차등위상차를 이용하여 후 처리하여 계산)의 볼륨 평균을 산출하는 단계, (iii) 마지막으로 산출된 수평반사도의 볼륨 평균 및 비차등위상차의 볼륨 평균 중 적어도 하나를 이용하여 강우강도를 추정하는 단계이다. 면적 평균 강우 추정 방법의 상세한 과정은 Fig. 4에서 설명된다. 입력받는 스캔 관측자료는 30도, 45도 및 60도의 고도각에서 획득된 관측변수로서, $Z_h(30)$, $Z_h(45)$, $Z_h(60)$, $K_{dp}(30)$, $K_{dp}(45)$ 및 $K_{dp}(60)$ 이다. 그리고 $\langle Z_h(30) \rangle$ 은 30도 스캔에서 획득된 Z_h 들의 평균값, $\langle K_{dp}(30) \rangle$ 은 30도 스캔에서 획득된 K_{dp} 들의 평균값을 나타낸다. $\mu(Z_h)$ 와 $\mu(K_{dp})$ 각 관측 고도각 별 평균 변수들의 다중고도 평균을 말한다. 수평반사도의 다중고도 평균을 이용하여 1차 강우강도를 추정하고 추정된 1차 강우강도 및 산출되는 비차등위상차의 다중고도 평균 각각에 대해 설정된 임계값보다 크면, 비차등위상차의 다중고도 평균으로부터 강우강도를 추정하고 조건에 맞지 않으며 추정된 1차 강우강도를 최종 강우강도로서 추정한다. 본 연구에서는 강우강도 10 mm/hr와 평균 K_{dp} 1°/km

를 임계값으로 사용하였다. 반사도와 비차등위상차를 이용한 강우 추정식은 다음과 같다.

$$R(\mu(Z_h)) = a(\mu(Z_h))^b \tag{1}$$

$$R(\mu(K_{dp})) = c(\mu(K_{dp})) \tag{2}$$

여기서, a, b, c는 시뮬레이션을 통해 얻은 이론적인 값으로서, 주파수 24GHz와 관측고도 45도에 대해 a = 0.001, b = 0.78, c = 21.4가 사용되었다.

근거리의 짧은 시간 동안 다중 고도각으로 레이더 스캔하여 관측된 레이더 자료를 이용함으로써, 레이더 자료를 오염시킬 수 있는 각종 에코들에 대한 문제점을 해소할 수 있으며, 정확한 강우추정을 통해 집중호우 및 홍수를 예방할 수 있다. 초단거리로서 1 km를 예로 들었으나, 제안된 방법은 이에 한 정되지 않으며, 1 km 이상의 거리에 대해서도 평균 강우추정에 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

4. 전파강수계 시험관측 및 면적 평균 강우 비교 검증

전파강수계 검증을 위해 여러 지역에서 약한 강우에서부터 강한 강우까지 다양한 강우 사상에 대한 시험관측을 수행하였다. 본 논문에서는 2019년 7월 17-20일 동안 경상남도 거제에서 관측한 자료와 2019년 7월 26일 경기도 연천에서 수행한 두 사상에 대한 자료를 이용하였다. 또한 면적 평균 강우 추정 결과를 평가하기 위해 일반 전도형 우량계와의 비교, 파시벨우량계 자료와의 비교, 핏 우량계와의 비교 등 다양한 방법으로 비교 검증을 수행하였다.

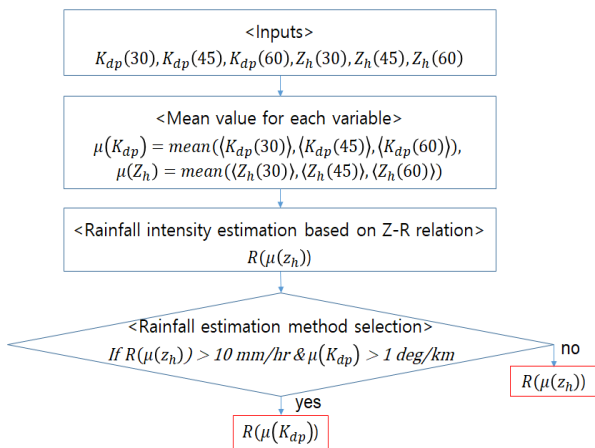


Fig. 4. Flowchart of average area rainfall estimation for the EWRG

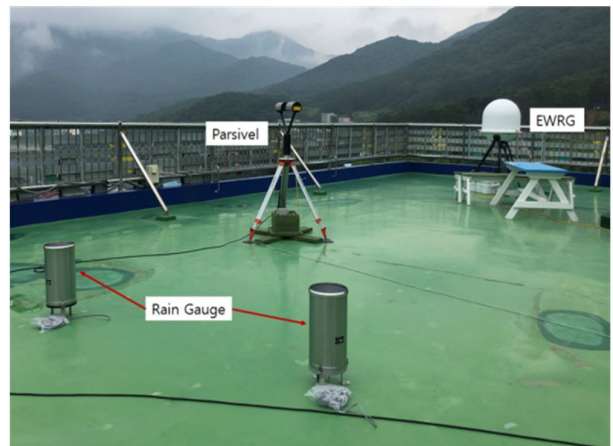


Fig. 5. Configuration of EWRG testbed at Geoje

4.1 전파강수계 시험 관측(거제)

2019년 7월 17-20일 사상은 태풍 다나스의 영향으로 많은 양의 수증기가 유입되어 남부지방에 많은 비가 내렸던 경우이다. 전파강수계 면적 평균 강우 추정치를 평가하기 위해 두 개의 전도형 우량계와 하나의 파시벨우적계를 전파강수계 근처

에 설치하였다. Fig. 5는 전파강수계와 전도형 우량계, 그리고 파시벨우적계의 배치 전경이다.

2019년 7월 17-20일 동안의 강우사상을 보다 다양하게 분석하기 위해 시간대별로 4개의 경우로 분류하여 비교 분석하였다. Fig. 6는 전파강수계 관측 자료의 하나의 예시로 2019년

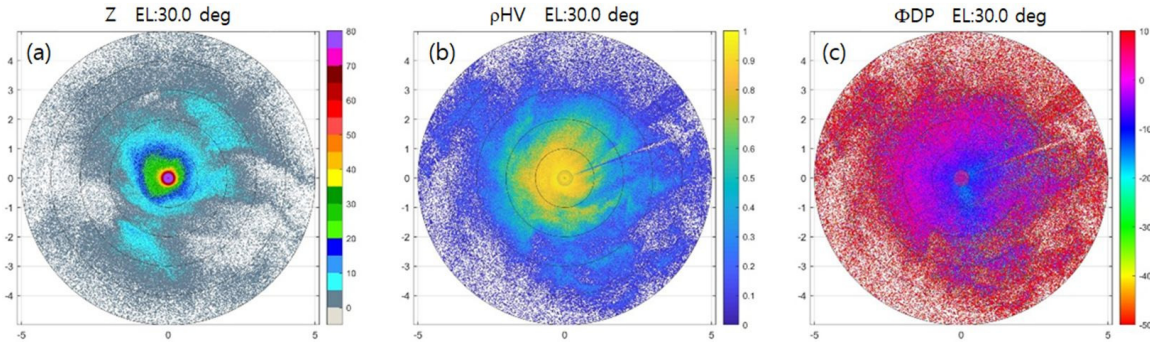


Fig. 6. Rainfall observation image by EWRG (2019/07/19 07:00, Geoje), (a) reflectivity (Z) (b) correlation coefficient (ρ_{HV}) (c) Differential propagation phase shift (Φ_{DP})

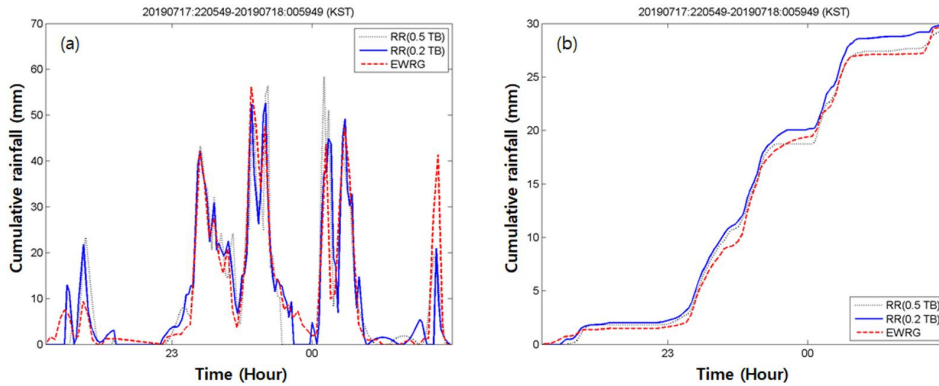


Fig. 7. Comparison result of 2019/07/17:220549-2019/07/18:005949(LST) case1. (a) EWRG areal average rainfall (mm/hr) and rain gauge rainfall (mm/hr), (b) cumulative EWRG areal average rainfall (mm) and rain gauge rainfall (mm)

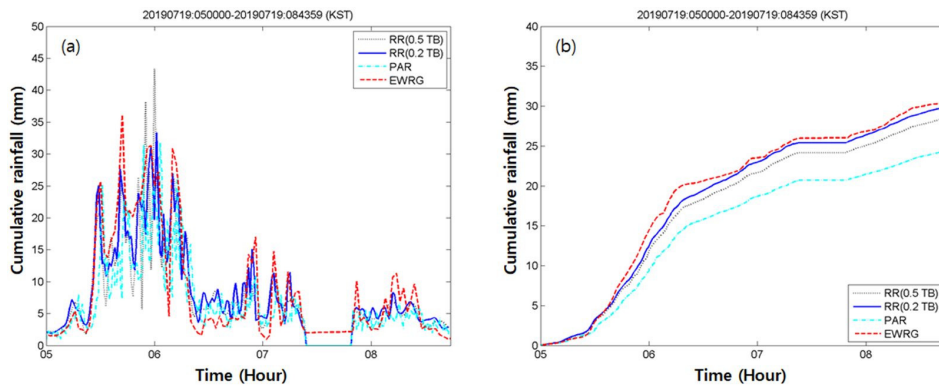


Fig. 8. Comparison result of 2019/07/19:050000-084359(LST) case2. (a) EWRG areal average rainfall (mm/hr) and rain gauge rainfall (mm/hr), (b) cumulative EWRG areal average rainfall (mm) and rain gauge rainfall (mm)

7월 19일 7시에 관측된 자료이다. 왼쪽부터 차례로 반사도, 상관계수, 차등위상차를 나타낸다.

본 사상에 대해서는 전파강수계 관측치로부터 추정된 면적 평균 강우량과 두 개의 우량계, 그리고 파시벨 우적계의 강우량을 비교하였다. Fig. 7은 각각 2019년 7월 17일 2205 LST 부터 18일 0059 LST 까지 약 3시간 동안의 아주 강한 강우 사상(case 1)에 대한 비교분석 결과이다. Fig. 7(a)는 전파강수계에 의해 추정된 순간 면적 평균 강우강도 (mm/hr)와 우량계 강우강도를 나타내고 Fig. 7(b)는 누적 강우량 (mm)을 각각 비교한 것이다. 그림에서 빨간색 점선은 전파강수계 시제품의 면적 평균 강우이고 파란색 실선과 검은색 점선은 각각 비교 관측된 전도형 우량계의 강우이다. Fig. 8은 2019년 7월 19일 5시부터 8시 45분까지 약 4시간 동안의 강우 사상(case 2)으로 Fig. 8(a)는 전파강수계에 의해 추정된 순간 면적 평균 강우강도 (mm/hr)와 우량계 강우강도를 나타내고 Fig. 8(b)는 누적 강우량 (mm)을 각각 비교한 것이다. 그림에서 빨간색 점선

은 전파강수계 시제품의 면적 평균 강우이고 파란색 실선과 검은색 점선은 비교 관측된 전도형 우량계의 강우이다. 하늘색 점선은 파시벨우적계 강우를 나타낸다. Figs. 9 and 10은 2019년 7월 20일 사상(case 3, case 4)이다. 여기서 유의할 점은 전파강수계의 강우량은 면적 평균 강우량이고 우량계 강우량은 포인트 강우량이라는 것이다. Figs. 7 and 8의 두 경우에는 전파강수계 강우량과 우량계 강우량과 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 그러나 Figs. 9 and 10의 20일 사상에서는 전파강수계 강우량과 우량계 강우량 사이에 약 20%의 오차가 존재한다. 이러한 오차는 전파강수계의 시스템적 한계 및 강우의 시공간적 변동성에 따른 면적 우량의 차이에 의한 것으로 여겨진다.

4.2 전파강수계 시험 관측(연천)

2019년 7월 26일 강우는 한반도 중북부에 걸친 장마전선에 의한 강한 강우가 내린 사상(case 5)이다. 전파강수계 성능 검증 위해 한국건설기술연구원 연천SOC실증연구센터에 강

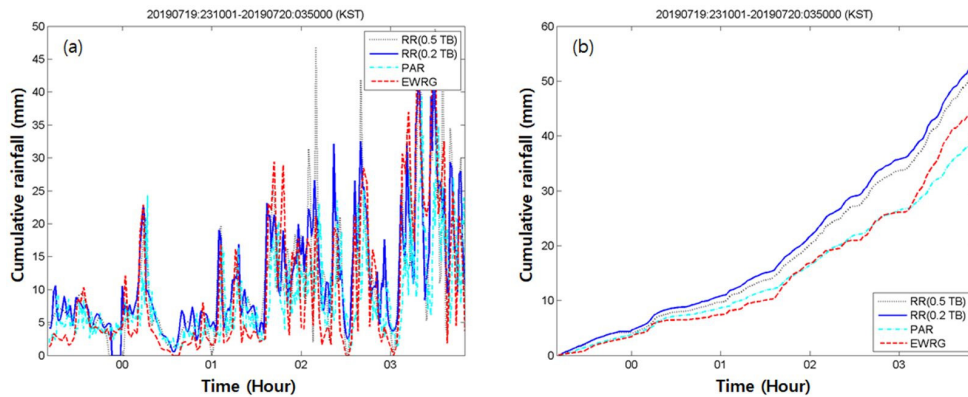


Fig. 9. Comparison result of 2019/07/19:231001-2019/07/20:035000(LST) case3. (a) EWRG areal average rainfall (mm/hr) and rain gauge rainfall (mm/hr), (b) cumulative EWRG areal average rainfall (mm) and rain gauge rainfall (mm)

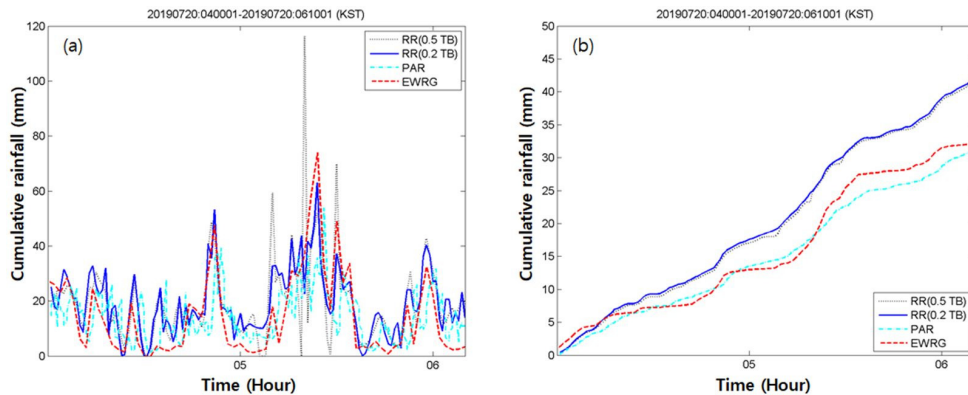


Fig. 10. Comparison result of 2019/07/20:040001-061001(LST) case4. (a) EWRG areal average rainfall (mm/hr) and rain gauge rainfall (mm/hr), (b) cumulative EWRG areal average rainfall (mm) and rain gauge rainfall (mm)



(a) Layout of EWRG (radius 1 km) and rain gauge network - Yeoncheon SOC center



(b) EWRG installation



(c) Pit-Gauge Installation

Fig. 11. Configuration of EWRG testbed at Yeoncheon

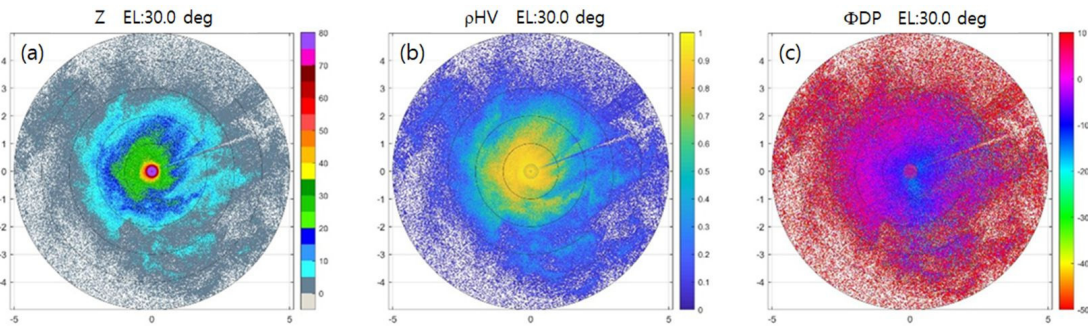


Fig. 12. Rainfall observation image by EWRG(2019/07/26 05:35, Yeoncheon), (a) reflectivity (Z) (b) correlation coefficient (ρ_{HV}) (c) Differential propagation phase shift (Φ_{DP})

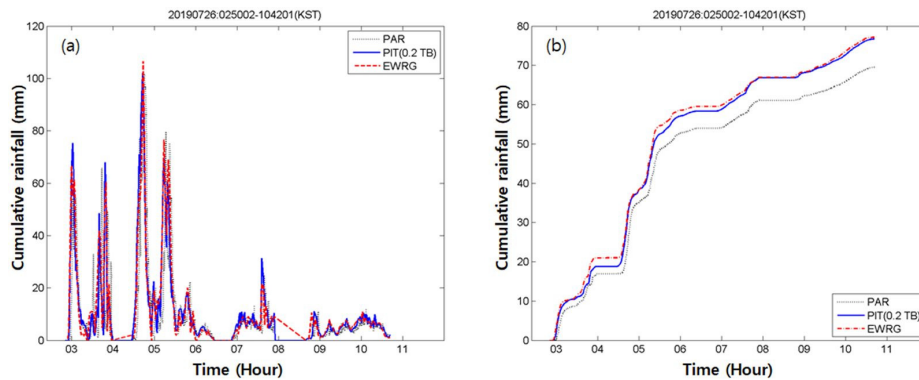


Fig. 13. Comparison result of 2019/07/26:025002-104201(LST) case 5. (a) EWRG areal average rainfall (mm/hr) and rain gauge rainfall (mm/hr), (b) cumulative EWRG areal average rainfall (mm) and rain gauge rainfall (mm)

우 측정 성능 검증 사이트를 마련하였다. 검증 사이트에는 일반적인 전도형 우량계와 파시벨우적계 외에 보다 정확한 지상 강우 관측을 위한 빗 우량계 등이 설치되었다. Fig. 11은 연천 SOC실증연구센터 내에 설치된 지상 비교 관측장비들의 설치 위치 및 전경을 보여준다.

2019년 7월 26일(경기도 연천 SOC 센터) 강우 사상에 대한 비교 분석 결과는 다음과 같다. Fig. 12는 전파강수계에 의해 관측된 2019년 7월 26일 0535 LST 관측 자료를 도시한 것이다. 왼쪽부터 차례로 반사도, 상관계수, 차등위상차를 나타낸다. Fig. 13은 2019년 7월 26일 0250 LST부터 1042 LST까지 약 8시간 동안 자료로 순간 강우강도 100 mm/hr 이상이 발생했던 매우 강한 강우 사상에 대한 비교분석 결과이다. Fig. 13(a)는 전파강수계에 의해 추정된 순간 면적 평균 강우강도(mm/hr)와 지상관측장비 강우강도를 나타내고 Fig. 13(b)는 누적 강우량(mm)을 각각 비교한 것이다. 그림에서 빨간색 점선은 전파강수계의 면적 평균 강우이고 파란색 실선과 검은색 점선은 각각 비교 관측된 빗우량계와 파시벨우적계의 강우를 나타낸다. 전파강수계로부터 약 600 m 정도 떨어진 위치에 설치된 빗우량계와 비교 결과는 전파강수계의 면적 평균강우 추정이 이 강우사례의 경우 거의 일치함을 보여준다. 거제 사상에서와 마찬가지로 본 사상에 대한 관측 결과로부터 파시벨우적계의 강우강도 추정이 약간 과소추정되는 경향이 있음을 알 수 있다.

4.3 시험관측 종합 분석

전파강수계 면적 평균 강우 추정치와 여러 지상 관측장비들의 실측자료와 비교 분석을 수행하였다. 본 논문에서 분석된 두 사상은 모두 순간 강우 강도가 30-100 mm/hr의 강한 강우 사상이므로 전파강수계의 목적인 수재해 예방을 위한 전파강수계의 성능 분석에 적합한 경우이다. 전파강수계와 지상 실측값과의 오차 분석을 위해 전파강수계 일누적 면적 평균 강우량과 우량계 일누적 관측값과의 오차율을 사상별(case 1-5)로 정리하여 Table 2에 제시하였다.

분석에 사용된 오차율(Error)은 아래식과 같다.

$$Error(\%) = \frac{(ER - GR)}{GR} \times 100 \quad (3)$$

여기서 ER은 전파강수계 누적 강우이고, GR은 우량계 누적 강우를 말한다.

또한 다섯 사상에 대해 우량계 일누적 관측값과 전파강수계 면적 평균 강우량의 NB (Normalized Bias)와 NAE (Normalized Absolute Error)를 Eqs. (4) and (5)와 같이 산정하여 비교하였다.

Table 2. Error comparison of total cumulative rainfall rate between EWRG and ground equipments (Pit-Gauge, Tipping gauge, Parsivel)

Case	Pit-Gauge (mm)	Tipping gauge (0.2) (mm)	EWRG (mm)	Error (%)
1	-	29.8	29.6	-0.67
2	-	29.8	30.4	2.0
3	-	52.9	44.2	-16.4
4	-	41.8	32.1	-23.2
5	76.7	-	77.2	0.7

$$NB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{(ER_i - GR_i)}{GR_i} \times 100 \quad (4)$$

$$NAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{|ER_i - GR_i|}{GR_i} \times 100 \quad (5)$$

분석 결과 5 사상에 대한 총 누적강우에 대한 NB는 약 -7.5%이고 NAE는 8.6%이다.

5. 결론

본 연구에서 개발한 전파강수계는 정확도 면에서는 기존의 전통적 우량계 및 우적 입자 측정장치의 성능을 가지며, 지상에 근접한 고도에서 높은 공간 해상도로 강수를 측정할 뿐만 아니라 반경 1 km (3.14 km²)의 공간 범위를 포괄함으로써 면적 대표성을 높인 효율적인 측정이 가능한 측정장치이다. 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 개발된 전파강수계를 기존 우량계, 파시벨 등과 비교하여 국내 여러 지점에서 비교 관측한 결과 넓은 면적에 대한 면적 강우량의 동시 측정이 가능한 것으로 나타났다.
- 2) 본 연구에서는 다중 고도 관측 데이터를 이용한 면적 평균 강우 추정 방법을 새롭게 개발하였다. 전파강수계의 관측 거리와 관측 시간이 매우 짧아 시공간적으로 강우량의 변동이 작다는 가정을 기반으로 개발된 이 방법을 지상 우량계와 비교한 결과 평균 10% 이내의 차이를 보여 우량 측정을 위해 활용 가능한 것으로 나타났다.
- 3) 본 연구에서 개발된 전파강수계와 강우 추정 방법을 적용할 경우 기존 우량계로 측정할 수 없는 넓은 면적에 대한 우량을 정확도 높게 측정 가능한 것으로 나타났으며 향후

새로운 강우량 측정 방법으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 R&D(수재해 피해 저감을 위한 전파강수계 및 측정 시스템 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Bringi, V., and Chandrasekar, V. (2001). *Polarimetric doppler weather radar: Principles and applications*. Cambridge University Press, Cambridge, p.635.
- 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.
- Lee, G., Lim, S., Jang, B., and Lee, D. (2015). "Quantitative rainfall estimation for S-band dual polarization radar using distributed specific differential phase." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 48, No. 1, pp. 57-67.
- Hunter, S.M. (1996) "WSR-88D Radar rainfall estimation: Capabilities, limitations and potential improvements." *National Weather Digest*, Vol. 20, No. 4, pp. 26-36.
- Jang, B., Kim, W., Lim, S., and Choi, J. (2018). "Analysis of rainfall cases and their observed signal from prototype of electromagnetic wave rain gauge." *The Institute of Electronics and Information Engineers Conference*.
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT). (2014) *Development of ultra-small radar rain gauge and rainfall analysis technology*. Research Report, Ministry of Land, Infrastructure, and Transport.
- Lim, S., Cifelli, R., Chandrasekar, V., and Matrosov, S.Y. (2013). "Precipitation classification and quantification using X-band dual-polarization weather radar: Application in the hydro-meteorology testbed." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 30, No. 9, pp. 2108-2120.
- Ryzhkov, A.V., Giangrande, S.E., and Schurr, T.J. (2005). "Rainfall estimation with a polarimetric prototype of WSR-88D." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 44, No. 4, pp. 502-515.
- Wang, Y., and Chandrasekar, V. (2010). "Quantitative precipitation estimation in the CASA X-band dual-polarization radar network." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 27, No. 10, pp. 1665-1676.