J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 53, No. 7 (2020), pp. 469-480
doi: 10.3741/JKWRA.2020.53.7.469

pISSN 1226-6280
eISSN 2287-6138

The analysis of differences of mean basin precipitation between TM and radar using correlation with basin characteristics and rainfall patterns

Park, Jaeheyon[a]* · Sung, Janghyun[b] · Cho, Yohan[c] · Heo, Jun-Haeng[d]

[a]Director general, Ministry of Environment, Sejong, Korea
[b]Researcher, Han river Flood Control Office, Seoul, Korea
[c]Researcher, Han river Flood Control Office, Seoul, Korea
[d]Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea

Paper number: 20-026
Received: 22 March 2020; Revised: 13 May 2020; Accepted: 13 May 2020

Abstract

This study analyzed the differences of mean basin precipitation between TM and radar based on the 51 standard basins in Han river and Nakdong river when large scale of heavy rains occurred in 2018. The result shows that the differences between radar and TM are −65.05 ~ 26.09% and −82.00 ~ 3.80% for accumulated and 10 min. maximum mean basin precipitation, respectively. The correlation analysis between the differences of estimated mean basin precipitation and basin characteristics such as average altitude of basin, area of basin, and shape factor of basin presents that there is no clear correlation between them. And the differences of point precipitation also shows the similar tendency with those of mean basin precipitation. In order to find out the correlation between them and meteorological conditions such as rainfall patterns, the reflectivity of radars according to the observation angles is analyzed at the selected basins, and then it is found that the differences of mean basin precipitation between TM and radar is more dominated by the meteorological conditions than by the topographic conditions such as basin characteristics.

Keywords: TM, Radar, Mean basin precipitation, Point precipitation, Basin characteristics, Rainfall patterns, Correlation analysis

TM과 레이더를 이용한 유역평균강수량 차이와 유역특성 및 강우형태와의 상관성 분석

박재현[a]* · 성장현[b] · 조요한[c] · 허준행[d]

[a]환경부 국장, [b]한강홍수통제소 연구사, [c]한강홍수통제소 연구사, [d]연세대학교 건설환경공학과 교수

요 지

본 연구는 레이더와 TM간 유역평균강수량 측정의 차이를 2018년 발생한 상당 규모의 호우시 한강과 낙동강의 51개 표준유역을 대상으로 분석하였다. 그 결과 레이더와 TM간의 유역평균강수량 값이 누적강수량은 -65.05~26.09%, 10분최대 강수량은 -82.00~3.80%의 차이가 발생하였다. 이러한 차이를 유역의 특성인 유역면적, 유역평균고도, 유역형상계수 등과 비교하였으나 뚜렷한 상관성을 찾기가 어려웠으며, 지점강수량도 유역평균강수량과 비슷한 경향을 보이는 것을 확인하였다. 따라서 강우형태와 같은 기상학적 조건과의 상관성을 확인하기 위해 고도별 레이더 반사도 값을 분석하였으며 이를 통해 레이더와 TM간 유역평균강수량 측정값의 차이는 유역특성과 같은 지형적 조건 보다는 기상학적 조건과 더 상관성이 있는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어: TM, 레이더, 유역평균강수량, 지점강수량, 유역특성, 강우형태, 상관성분석

***Corresponding Author.** Tel: +82-2-494-5739
E-mail: trusspark@gmail.com (J. Park)

© 2020 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

1. 서 론

환경부 4대강 홍수통제소에서는 수자원관리 및 홍수예경보 등을 위하여 강수량을 측정하고 있으며 전국 425개 지점에 강수량계를 설치하고 실시간 원격전송 장치를 이용하여 매10분마다 데이터를 전송 및 저장하고 있다(본 연구에서는 이러한 자료를 TM이라 한다). 또한 1990년대 말 임진강유역 대홍수를 계기로 2000년대 초부터 레이더를 이용하여 강수량 관측을 시작하였고 현재 임진강·비슬산·소백산·모후산·서대산·가리산 등 6개의 레이더 관측소를 운영하고 있으며, 예봉산 관측소와 울진·삼척 관측소(X밴드의 소형 레이더)를 최근 완공하여 현재 시험운영을 하고 있다(레이더 자료는 매 2.5분마다 전송 및 저장되며 최근에는 1분단위로 단축을 추진하고 있다).

환경부 4대강 홍수통제소는 이와 같이 관측된 강수량 자료를 이용하여 실시간으로 홍수예경보 업무를 수행하고 있으며, 홍수예경보에 이용되는 강수량 자료는 TM자료와 레이더 자료 둘 다 사용하고 있다. TM자료는 티센망을 이용하여 유역평균강수량으로 환산한 자료를 사용하며, 레이더 자료는 레이더에서 관측된 원시자료(이하 레이더 1 이라 한다)와 이를 TM자료를 이용하여 보정한 보정된 레이더 자료 (이하 레이더 2 라 한다)를 함께 사용한다. 이러한 실제 관측된 자료 외에도 홍수예측을 위해서는 예측 강수량 자료를 사용하고 있는데 이는 기상청에서 제공하는 레이더를 이용한 Maple자료와 수치모델을 이용한 KLAPS 또는 UM자료를 이용하고 있다.

4대강 홍수통제소에서는 동일한 홍수예보모델을 사용하고 있으며 수문학적 및 수리학적 모델을 함께 사용하고 있다. 유역유출계산은 저류함수법 또는 단위도법을 이용하며 하도유출계산은 저류함수법 또는 Muskingum법을 이용하고 있다. 실무에서 가장 많이 사용되고 있는 수문학적 홍수예측방법은 강수로 인해 하천의 수위가 상승하는 일정 시점에서 실제 관측된 강수량자료(TM 또는 레이더)를 이용하여 저류함수법을 이용한 수문학적 모델 계산을 수행한 후 나온 특정 지점의 수문곡선을 실제 동 지점에서 자동 관측한 수문곡선과 비교 한 후 계산된 수문곡선과 실제 관측된 수문곡선을 최대한 일치 시키는 보정작업(이러한 보정작업을 위해 수문학적 모델 계산에 사용되는 다양한 함수 값을 조정한다)을 거치게 되며, 보정이 끝난 후 예측강수량 자료를 이용하여 다시 모델 계산을 수행하여 미래의 수문곡선을 생성하게 된다.

이와 같은 과정에서 실제 관측된 강수량 자료는 홍수예측에 매우 중요한 요소 중 하나가 되며, 이의 정확도를 얼마나 확보하는 지가 홍수예측의 정확도 향상에 영향을 미치게 된다. 이와 관련하여 현재 실무에서는 레이더 자료 보다는 TM자료를 많이 이용하고 있으며, 이는 균등하지 않은 VPR (Cluckie *et al*., 2000), 하층의 산악효과(Kitchen *et al*., 1994), 강한 대류성 호우시 Z-R변환식의 불확실성(Illingworth *et al*., 2000) 및 레이더 절대보정 오차 등 레이더 자료가 가지고 있는 오차에 기인하기도 하지만, 지난 수 십 년간 홍수예측 실무에서 TM자료를 이용해 왔으므로 이에 대한 신뢰가 레이더 자료 보다 더 높기 때문인 것으로 판단된다. 이와 관련하여 한국과는 달리 외국의 경우 레이더 자료를 홍수예측에 직접적으로 이용하는 사례가 많이 있으며, 특히 100 ~ 10,000 km^2의 하천유역에서 실시간 레이더 자료를 이용한 수문학적 모델이 매우 효과적이며(Kouwen, 1988), 레이더 자료를 이용시 보다 정확한 평균강수량 자료 제공과 강우의 공간적 분포의 개선 등으로 홍수예측이 개선되었다(Pessoa *et al*., 1993). 또한 호주 Finniss river 유역을 대상으로 한 연구에서는 레이더 자료를 이용한 홍수예측이 강수량계 자료를 이용한 것보다 더 우수했으며 레이더와 강수량계 자료를 함께 Cokriging했을 경우에는 홍수예측 에러가 가장 적은 것으로 나타났다(Sun *et al*., 2000).

TM과 레이더값과의 차이에 대한 연구는 지금까지 주로 지점 강우에 대해 이루어졌으며 비슬산강우레이더의 2012년 ~ 2014년의 15개 강우사상에 대한 분석결과 상대적으로 레이더값이 과소 추정되며 공간적 변동성이 큰 것으로 나타났다(HRFCO, 2016). 미국 오클라호마 지역을 대상으로 한 레이더와 강수량계와의 비교에서는 레이더와 강수량계와의 비(Gauge/Radar)의 평균이 0.99 및 1.04로 나타났다(Krajewski *et al*., 2010; Wilson and Brandes, 1979). 하지만 홍수예측에서는 지점 강수가 아닌 유역평균강수량이 이용되며 레이더를 도입한 목적중 하나가 호우의 공간적 분포를 보다 정확히 관측하기 위한 것이므로 본 연구에서는 지점 강우가 아닌 TM과 레이더를 이용하여 산정된 유역평균강수량 값을 서로 비교한 후 두 값 간의 차이와 이러한 차이가 여러 가지 요소들과 어떠한 연관성이 있는지 여부를 분석하였다.

2. 대상유역 및 호우사상

본 연구의 대상유역과 호우사상을 선정하기 위해 여러 가지 요소들을 고려하였다. 우선 TM에 비해 레이더는 그 관측기간이 길지 않고 레이더 관측기술이 최근에 많은 진전을 이루었으므로 2018년 관측자료를 연구에 이용하였다. 호우사상은 홍수와 관련이 있는 상당한 크기의 강우사상을 대상으로 하기 위하여 2018년에 발령된 홍수주의보 및 홍수경보를 참조하여 호우사상을 선정하였으며 대상유역은 홍수주의보 및 홍수경보 발령과 관련된 한강 및 낙동강의 일부 유역을 대상으로 하였다.

2.1 한강유역

한강유역은 2018년 Table 1과 같이 총 6개 지점(평창교, 경안교, 중랑교, 진관교, 사랑교, 비룡대교)에서 홍수특보가 발령되었으며 시점으로는 5월18일, 7월2일, 8월28일, 8월29일, 8월30일 등 총 5일이다. 하지만 8월말의 레이더 자료는 당시 가리산레이더가 기존 2.5분 관측주기에서 1분 관측주기로 변경하여 시험적으로 운영하고 있는 상황이었으므로 8월말 자료를 연구에 이용하는 데는 제한이 있다고 판단하여 이를 제외한 5월18일과 7월2일 홍수특보와 관련된 강우사상만을 이용하였다. 대상유역은 Fig. 1(a)와 같이 평창교 및 경안교 홍수특보지점 상류의 표준유역을 대상으로 하였다.

평창교 지점은 2018.5.17. 12:00 ~ 2018.5.19 00:00 간 36시간의 강우량자료를 이용하였으며 상류의 홍정천, 평창강상류, 대화천, 계촌천 및 평창수위표 등 5개의 표준유역을 대상으로 하였다. 경안교 지점은 2018.7.1 00:00 ~ 2018.7.3 00:00 간 48시간의 강우량 자료를 이용하였으며 상류의 경안천상류, 경안천중류 및 경안수위표 등 3개의 표준유역을 대상으로 하였다.

2.2 낙동강유역(형산강 유역을 포함)

낙동강유역은 2018년 Table 2와 같이 총 8개지점(점촌, 김천, 안강, 밀양, 정암, 포항, 삼랑진, 진동)에서 홍수특보가 발령되었으며 시점으로는 9월4일, 10월6일, 10월7일, 10월8일 등 총 4일이다. 8개 지점중 낙동강의 최하류는 상류의 표준유역수가 너무 많으므로 이들을 제외하고 본 연구에서는 Fig. 1(b)와 같이 점촌·김천·밀양·정암·안강 등 5개의 홍수특보지점 상류의 표준유역을 대상으로 하였다.

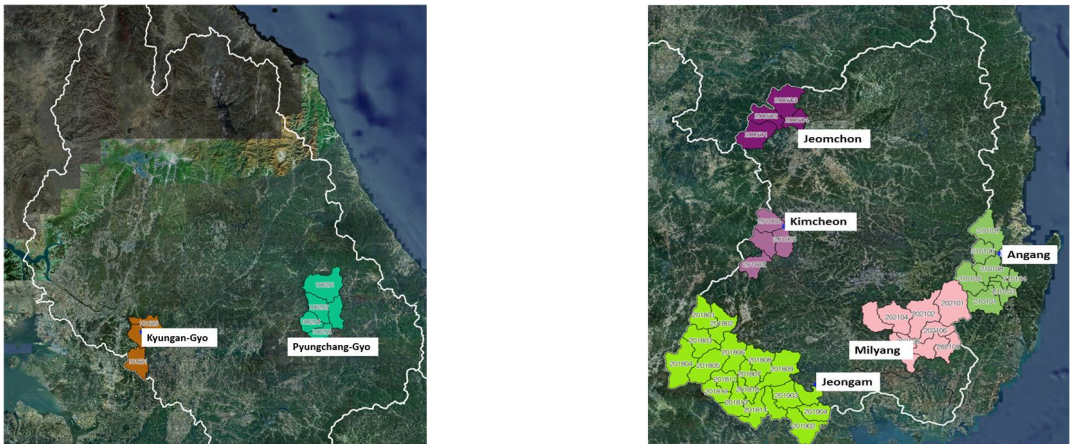
점촌 지점은 2018.9.3 12:00 ~ 2018.9.4 12:00 간 24시간의 강수량자료를 이용하였으며 상류의 영강상류·영강중류·조령천·점촌수위표 등 4개의 표준유역을 대상으로 하였다. 김천지점은 2018.10.5 00:00 ~ 2018.10.7 00:00 간 48시간의 강수량자료를 이용하였으며 상류의 감천상류·감천중류·직지사천·김천수위표 등 4개의 표준 유역을 대상으로 하였다. 밀양지점은 2018.10.4 20:00 ~ 2018.10.6 20:00 간 48시간의 강수량자료를 이용하였으며 상류의 운문댐·동창천·청도천상류·청도천하류·밀양댐·동천·단장천·밀양수위표 등 8개의 표준유역을 대상으로 하였다. 정암지점은 2018.10.4 20:00 ~ 2018.10.6 20:00간 48시간의 강수량자료를 이용하였으며 상류의 남강상류·함양위천합류점·함양위천·람천·임천·산청수위표·양천합류점·신등천·양천·남강댐상류·덕천강상류·시천천·덕천강하류·남강댐·영천강합류점·영천강·반성천합류점·반성천·정암수위표 등 19개의 표준유역을 대상으로 하였다. 안강지점은 2018.10.4 20:00 ~ 10.6 20:00간 48시간의 강수량자료를 이용하였으며 상류의 형산강상류·대천·남천·덕동댐·북천·칠평천·기계천·안강수위표 등 8개의 표준유역을 대상으로 하였다.

Table 1. Flood alarming in Han river during 2018 (ME, 2019)

Station	Flood alert	Flood warning	Maximum water level (m)	Time of maximum water level
Pyungchang-Gyo	2018.5.18 04:10	-	3.31	2018.5.18 04:30
Kyungan-Gyo	2018.7.2 18:00	-	3.50	2018.7.2 18:20
Jungnang-Gyo	2018.8.28 20:30	-	4.26	2018.8.28 21:00
Jingyan-Gyo	2018.8.28 20:40	-	2.14	2018.8.28 21:50
Sarang-Gyo	2018.8.29 12:10	-	8.17	2018.8.29 17:50
Biryong-Daegyo	2018.8.29 13:20	2018.8.29 14:50	11.41	2018.8.29 16:20
Jingyan-Gyo	2018.8.29 18:40	2018.8.30 00:10	3.26	2018.8.30 01:10
Jungnang-Gyo	2018.8.30 00:20	-	5.42	2018.8.30 01:00

Table 2. Flood alarming in Nakdong river during 2018 (ME, 2019)

Station	Flood alert	Flood warning	Maximum water level (m)	Time of maximum water level
Jeomchon	2018.9.4 03:30	-	4.89	2018.9.4 04:50
Kimcheon	2018.10.6 07:30		2.09	2018.10.6 09:50
Angang	2018.10.6 11:10	2018.10.6 13:20	7.47	2018.10.6 13:40
Milyang	2018.10.6 11:10	-	3.88	2018.10.6 12:40
Jeongam	2018.10.6 11:40	-	7.49	2018.10.6 17:30
Pohang	2018.10.6 11:40	2018.10.6 13:30	2.74	2018.10.6 14:50
Samrangjin	2018.10.6 14:20		6.51	2018.10.7 01:10
Jindong	2018.10.6 19:50	-	7.21	2018.10.7 02:30



(a) Han river (b) Nakdong river

Fig. 1. Location map of standard basins in this study

3. TM과 레이더간 강수량 분석

3.1 자료획득

본 연구에 사용되는 유역평균강수량 및 지점강수량 자료는 환경부 강우레이더 종합관제시스템에서 획득하였다. 유역평균강수량 자료는 호우사상동안 각 표준유역별로 10분단위의 TM자료와 레이더자료를 획득하였으며, 특히 강우레이더 자료의 경우 종합관제시스템에는 반사도(RZ), 차등반사도(RZDR) 및 위상차(RKDP)를 이용한 3가지 종류의 자료가 생성된다. 이중 본 연구에서는 실무에서 가장 많이 사용되는 RKDP자료를 이용하였으며 레이더자료는 원시자료인 레이더 1과 강수량계 자료를 이용하여 보정한 레이더 2자료를 함께 이용하였다. 보정과정은 레이더 합성장의 각 격자에 대해 수행하며, 보정하고자 하는 격자를 중심으로 반경 30 km 이내의 TM자료를 이용하여 TM과 레이더 간의 비율 R을 산정하며 이때 해당 시점으로부터 이전 1시간의 누적 강수량 자료를 이용한다. 30 km 반경 내 여러 개의 TM이 존재하는 경우 역거리 가중을 하여 Eq. (1)로부터 R을 구한다.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{m} \frac{R_i}{G_i} \times \frac{1}{r_i^2}}{\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{r_i^2}} \tag{1}$$

여기서 G_i는 TM 강수량을 말하며, R_i는 TM지점에 해당하는 레이더 격자의 강수량, r_i는 보정하고자 하는 격자로부터 TM까지의 거리, 그리고 m은 반경 30 km 내에 존재하는 TM의 숫자이다.

3.2 TM과 레이더간 유역평균강수량 비교

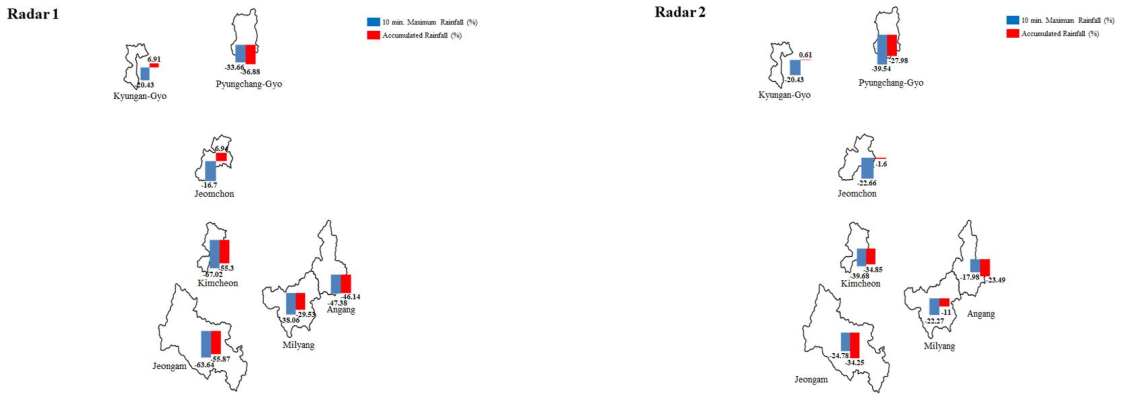
한강과 낙동강 유역내 51개 표준유역에 대한 TM과 레이더 1 및 레이더 2의 유역평균강수량을 10분 최대강수량과 누적강수량으로 구분하여 비교하였으며 51개 표준유역에 대한 값들을 7개 홍수예경보지점 기준으로 정리한 평균값은 Table 3 및 Fig. 2와 같다.

10분 최대강수량을 비교해 보면 모든 지점에서 레이더 강수량이 TM보다 작은 것으로 나타났다. 이는 레이더의 누적강수량이 TM보다 크게 나타난 경안교와 점촌지점에서도 10분 최대강수량은 레이더가 TM보다 작게 나타났다(점촌 지점의 경우 누적강수량은 레이더 1이 TM보다 6.94%컸으나 10분 최대강수량은 16.70% 작음). 레이더 1과 레이더 2 간의 비교 시 레이더 2가 레이더 1과 TM간의 인위적인 보정을 거친 자료이므로 김천, 안강, 밀양, 정암지점에서는 레이더 2가 레이더 1보다 TM에 가까운 값을 보였으나, 평창교와 점촌지점에서는 반대 현상이 발생하였으며, 경안교지점은 거의 변화가 없는 것으로 나타났다.

누적강수량에 대한 비교결과 TM과 레이더 1 및 레이더 2 간의 유역평균강수량 값들은 일관된 경향성을 보이기보다는 호우사상에 따라 다른 결과를 보였다. 동일한 한강유역의 경우에도 2018.5.17 ~ 5.19 발생한 호우사상에서 평창교지점은 레이더가 TM보다 매우 작게 나온 반면 2018.7.1 ~ 2018.7.3 발생한 호우사상에서 경안교지점은 레이더가 TM보다 조금 크게 나왔다. 이는 낙동강 유역의 경우에도 마찬가지이며 2018.9.3 ~ 2018.9.4 발생한 호우사상에서 점촌지점은 레이더 1이 TM보다 조금 크게 나온 반면, 2018.10.4 ~ 2018.10.6 발생한 호우사상에서 김천, 안강 등 모든 지점에서 레이더가 TM보다 매우 작게 나왔다.

Table 3. 10 min. maximum and accumulated rainfalls from Radar 1, 2 and TM

River basin	Station		10 min. Maximum Rainfall			Accumulated Rainfall		
			Rainfall	Radar-TM	(%)	Rainfall	Radar-TM	(%)
Han river	Pyungchang-Gyo	Radar 1	8.12	-4.12	-33.66	66.68	-38.96	-36.88
		Radar 2	7.4	-4.84	-39.54	76.08	-29.56	-27.98
		TM	12.24			105.64		
	Kyungan-Gyo	Radar 1	7.40	-1.90	-20.43	238.73	15.43	6.91
		Radar 2	7.40	-1.90	-20.43	224.67	1.37	0.61
		TM	9.30			223.30		
Nakdong river	Jeomchon	Radar 1	7.98	-1.60	-16.70	113.30	7.35	6.94
		Radar 2	6.93	-2.65	-27.66	104.25	-1.70	-1.60
		TM	9.58			105.95		
	Kimcheon	Radar 1	1.23	-2.50	-67.02	79.20	-98.00	-55.30
		Radar 2	2.25	-1.48	-39.68	115.45	-61.75	-34.85
		TM	3.73			177.20		
	Milyang	Radar 1	4.59	-2.82	-38.06	143.83	-60.27	-29.53
		Radar 2	5.76	-1.65	-22.27	181.65	-22.45	-11.00
		TM	7.41			204.10		
	Jeongam	Radar 1	2.04	-3.57	-63.64	103.07	-130.51	-55.87
		Radar 2	4.22	-1.39	-24.78	153.59	-79.99	-34.25
		TM	5.61			233.58		
	Angang	Radar 1	2.81	-2.53	-47.38	108.46	-92.90	-46.14
		Radar 2	4.38	-0.96	-17.98	154.06	-47.30	-23.49
		TM	5.34			201.36		



(a) Differences between Radar 1 and TM (b) Differences between Radar 2 and TM

Fig. 2. Map of the differences between Radar 1,2 and TM

레이더 1과 레이더 2 간의 비교시 대부분의 표준유역에서 레이더 2의 누적강수량은 레이더 1과 TM 사이 값을 가졌다. 다만, 점촌지점은 레이더 1이 TM값 보다 컸으나 레이더 2는 오히려 TM보다 작은 값을 나타냈다. 또한 전반적으로 레이더 2가 보정을 통해 레이더 1과 TM과의 차이를 줄여 주기는 하였으나 보정 후에도 TM과 상당한 차이를 보였으며 김천지점에서는 누적강수량이 최대 34.85% 차이가 발생하였다.

51개 표준유역별로 살펴보면 10분 최대강수량의 경우 레이더1과 TM은 -82.00(함양위천) ~ 3.80%(경안천중류), 레이더2와 TM은 -69.39(감천상류) ~ 31.03%(영천강)의 차이를 보였으며, 일부 표준유역에서 레이더가 TM보다 큰 값을 보이기도 하였다. 누적강수량의 경우 레이더1과 TM은 -65.05(임

천) ~ 26.09%(점촌수위표), 레이더2와 TM은 -50.03(함양위천합류점) ~ 17.91%(청도천하류)의 차이가 발생하였다.

3.3 유역특성과 TM과 레이더간 유역평균강수량 차이와의 상관성 분석

TM과 레이더를 이용한 유역평균강수량 측정값의 차이가 유역의 특성과 어떠한 상관성을 가지는 지를 알아보기 위하여 각 표준유역의 평균고도, 유역면적 및 유역형상계수와 TM과 레이더 1의 10분단위 최대 강수량 및 누적강수량 차이의 백분율을 가지고 회귀분석을 실시하였다.

3.3.1 유역평균고도와의 상관성 분석

51개 표준유역의 유역평균고도와 TM과 레이더 1의 10분단위 최대강수량 및 누적강수량 차의 백분율((레이더 1-TM)/TM)을 비교한 결과 Fig. 3에서 보듯이 유역평균고도와의 뚜렷한 상관성을 찾을 수 없었으며 비슷한 고도에서도 강수량 차의 백분율이 매우 큰 차이를 보이고 있다. 또한 회귀분석을 실시한 결과 10분단위 최대강수량의 R^2는 0.0179, 누적강수량의 R^2는 0.0309로 서로 상관성을 찾을 수 없었다.

3.3.2 유역면적과의 상관성 분석

51개 표준유역의 유역면적과 TM과 레이더 1의 10분단위 최대강수량 및 누적강수량 차의 백분율을 비교한 결과 Fig. 4에서 보듯이 유역면적과의 뚜렷한 상관성을 찾을 수 없었으며 비슷한 유역면적에서도 강수량 차의 백분율이 매우 큰 차이를 보이고 있다. 또한 회귀분석을 실시한 결과 10분단위 최대강수량은 R^2는 0.0423, 누적강수량의 R^2는 0.0330으로 서로 상관성을 찾을 수 없었다.

아울러 유역내 티센망의 밀도에 따른 상관성을 함께 살펴보기 위하여 각 표준유역의 티센다각형 평균면적과 TM과 레이더 1의 10분단위 최대강수량 및 누적강수량 차의 백분율을 비교한 결과 Fig. 5에서 보듯이 티센다각형 평균면적과의 뚜렷한 상관성을 찾을 수 없었으며 비슷한 티센다각형 평균면적에서도 강수량 차의 백분율이 매우 큰 차이를 보이고 있다. 또한 회귀분석을 실시한 결과 10분단위 최대강수량은 R^2가 0.0092였으며, 누적강수량은 R^2가 0.0187로 서로 상관성을 찾을 수 없었다.

3.3.3 유역형상계수와의 상관성 분석

51개 표준유역의 유역형상계수와 TM과 레이더 1의 10분단위 최대강수량 및 누적강수량 차의 백분율을 비교한 결과 Fig. 6에서 보듯이 유역형상계수와의 뚜렷한 상관성을 찾을 수 없었으며 비슷한 형상계수에서도 강수량 차의 백분율이 매우 큰 차이를 보이고 있다. 또한 회귀분석을 실시한 결과

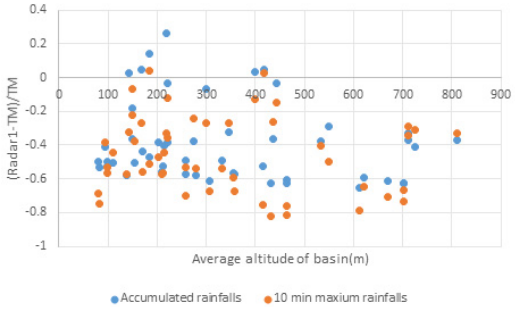


Fig. 3. Average altitude of baisn vs (Radar 1-TM)/TM

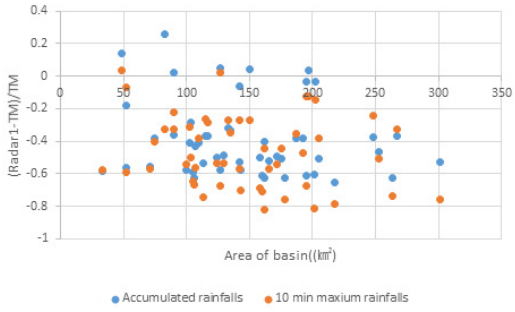


Fig. 4. Area of basin vs (Radar 1-TM)/TM

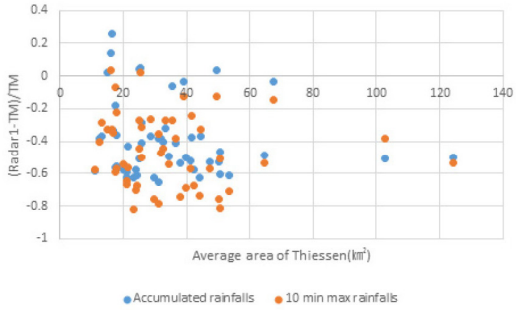


Fig. 5. Average area of thiessen vs (Radar 1-TM)/TM

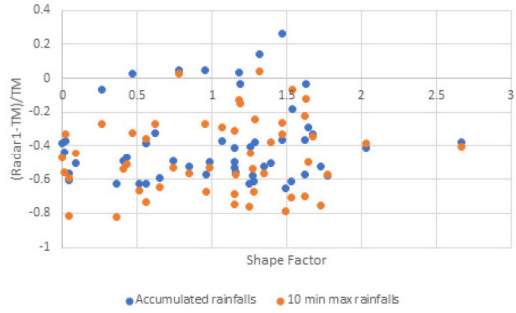


Fig. 6. Shape factor vs (Radar-TM)/TM

10분단위 최대강수량의 R^2는 0.02137, 누적강수량의 R^2는 0.0087로 서로 상관성을 찾을 수 없었다.

3.4 TM과 레이더간 지점강수량 분석

TM과 레이더간의 차이가 지점 강수량에서도 같은 경향인지를 확인하기 위해 TM과 레이더1간 지점강수량 값을 분석하였다. 레이더는 TM과는 달리 모든 자료가 격자로 형성되기 때문에 지점 강수량 분석을 위하여 51개 표준유역별로 1개의 TM관측소를 선정한 후 해당 관측소의 위치에 해당하는 레이더1의 격자값을 레이더의 지점강수량으로 간주하였다.

지점강수량의 측정시간은 10분단위와 1시간단위로 구분하였으며, 각 표준유역의 10분단위 TM 유역평균강수량이 최대가 되는 시점을 기준으로 해당 시점의 강수량값과 해당시점으로부터 이전 1시간 누적 강수량값을 구하였다. 다만, 지점강수량 분석에 있어 TM과 레이더는 관측높이가 다르므로 동일 시점에서 10분단위 강수량을 직접 비교하는 것은 큰 의미를 가지기 어렵다고 판단되어 1시간 단위의 지점강수량만 비교분석하였으며 그 결과는 Table 4와 같다.

한강유역 평창교지점의 5개 표준유역 TM과 레이더 1간의 1시간누적 지점강수량을 비교한 결과 레이더 1이 TM보다 작게 나왔으며(-23.3% ~ -14.6%), 경안교지점의 3개 표준유역은 레이더 1이 TM보다 작거나 크게 나왔다(-45.0% ~ 12.9%).

낙동강유역 점촌지점의 4개 표준유역은 레이더 1이 TM보다 조금 작거나 크게 나왔으며(-5.3% ~ 13.5%), 김천지점의 4개 표준유역은 레이더 1이 TM보다 작았다(-79.6% ~ -65.0%). 또한 안강지점의 8개 표준유역은 레이더 1이 TM보다 작았으며(-65.8% ~ -44.4%), 밀양지점의 8개 표준유역은 레이더 1이 TM보다 작았다(-45.2% ~ -15.9%). 마지막으로 정암지점의 19개 표준유역은 레이더 1이 TM보다 작은 것으로 나타났다(-74.7% ~ -38.6%).

Table 4. 1 hour point precipitation from Radar 1 and TM

Station	Standard basin	Precipitation (1 hour)		Differences between TM and Radar 1	
		TM	Radar 1	Radar 1-TM	(Radar 1-TM)/TM (%)
Pyungchang-Gyo	Pyungchang satation	42	32.2	-9.8	-23.3
	Geochonchen	33	28.2	-4.8	-14.5
	Daehoachen	30	24.3	-5.7	-19.0
	Pyungchang upstream	36	28.1	-7.9	-21.9
	Hyungjeongchen	25	20.5	-4.5	-18.0
Kyungan-Gyo	Kyungan satation	40	34.8	-5.2	-13.0
	Kyungan middle stream	16	8.8	-7.2	-45.0
	Kyungan upstream	21	23.7	2.7	12.9
Jeomchon	Jeomchon station	66	62.5	-3.5	-5.3
	Joryongchen	25	26.1	1.1	4.4
	younggang middle stream	34	38.6	4.6	13.5
	younggang upstream	15	15.8	0.8	5.3
Kimcheon	Kimcheon station	12	3.4	-8.6	-71.7
	Jikjisachen	17	4.4	-12.6	-74.1
	Gamchen middle stream	16	5.6	-10.4	-65.0
	Gamchen upstream	24	4.9	-19.1	-79.6
Milyang	Milyang station	37	26.3	-10.7	-28.9
	Danjangchen	29	24.4	-4.6	-15.9
	Dongchen	32	26.1	-5.9	-18.4
	Milyang dam	45	27.6	-17.4	-38.7
	Cheongdochen downstream	23	12.6	-10.4	-45.2
	Cheongdochen upstream	38	30.0	-8.0	-21.1
	Dongchangchen	23	18.1	-4.9	-21.3
	Unmoon dam	37	21.2	-15.8	-42.7

Table 4. 1 hour point precipitation from Radar 1 and TM (Continue)

Station	Standard basin	Precipitation (1 hour)		Differences between TM and Radar 1	
		TM	Radar 1	Radar 1-TM	(Radar 1-TM)/TM (%)
Jeongam	Jeongam station	31	12.6	-18.4	-59.4
	Bansungchen	14	8.6	-5.4	-38.6
	Bansungchen junction	17	5.6	-11.4	-67.1
	Youngchengang	22	6.6	-15.4	-70.0
	Youngchengang junction	16	5.8	-10.2	-63.8
	Namgang dam	28	10.0	-18.0	-64.3
	Dukchengang downstream	22	9.0	-13.0	-59.1
	Sichenchen	20	10.1	-9.9	-49.5
	Dukchengang upstream	25	9.0	-16.0	-64.0
	Namgang dam upstream	19	9.7	-9.3	-48.9
	Yangchen	10	4.0	-6.0	-60.0
	Shindungchen	14	6.2	-7.8	-55.7
	Yangchen junction	18	5.5	-12.5	-69.4
	Sancheng station	16	4.6	-11.4	-71.3
	Yimchen	33	10.5	-22.5	-68.2
	Ramchen	14	5.2	-8.8	-62.9
	Hamyangwichen	10	4.0	-6.0	-60.0
	Hamyangwichen junction	10	3.2	-6.8	-68.0
	Namgang upstream	15	3.8	-11.2	-74.7
Angang	Angang station	23	12.8	-10.2	-44.3
	Gigyochen	27	13.6	-13.4	-49.6
	ChilPyongchen	14	5.0	-9.0	-64.3
	Bukchen	16	6.1	-9.9	-61.9
	Dekdong dam	31	10.6	-20.4	-65.8
	Namchen	18	9.6	-8.4	-46.7
	Daechen	34	16.1	-17.9	-52.6
	Hyongsangang upstream	28	11.5	-16.5	-58.9

TM과 레이더 1간의 지점강수량을 분석한 결과 유역평균강수량(누적)과 비슷한 경향을 보였다. 평창교, 김천 등 유역평균강수량이 레이더 1이 TM보다 작게 나온 유역은 지점 강수량 또한 같은 경향을 보였으며, 레이더 1이 TM보다 조금 크게 나온 경안교와 점촌지점은 총 7개의 표준유역중 4개의 표준유역에서 레이더 1이 TM보다 조금 크게 나왔다.

3.5 강우형태와의 상관성 분석

TM과 레이더 1 간의 유역평균강수량 차이가 유역특성과는 뚜렷한 상관성을 찾을 수 없었다. 따라서 레이더 관측의 정확도에 영향을 주는 또 다른 요소인 강우형태와 같은 기상학적 조건과의 상관성을 살펴보았다. 이를 위해 우선 동일한 호우기간동안 본 연구에서 선정된 유역을 포함한 보다 상위의 유역 또는 그 외의 유역에서도 TM과 레이더 1간의 유역평균강수량의 차이가 같은 경향을 보이고 있는지를 분석하였다.

평창교지점(2018.5.17 ~ 5.19)에 대한 비교를 위해 동일 기간 동안 한강유역 전체(임진강유역은 제외)에 대한 TM 및 레이더 1간의 누적강수량을 산정한 결과 레이더 1이 TM보다 평균 39.52% 작게 나왔다. 경안교지점(2018.7.1 ~ 2018.7.3)은 한강유역 전체(임진강유역은 제외)에 대한 TM 및 레이더 1간의 누적강수량을 산정한 결과 레이더 1이 TM보다 평균 9.9% 작게 나왔다. 점촌지점(2018.9.3 ~ 2018.9.4)은 낙동강 유역 전체에 대한 TM 및 레이더 1간의 누적강수량을 산정한 결과 레이더 1이 TM보다 평균 27.75% 크게 나왔다. 김천, 안강 등 나머지 지점(2018.10.4 ~ 2018.10.6)은 낙동강 유역 전체에 대한 TM 및 레이더 1간의 누적강수량을 산정한 결과 레이더 1이 TM보다 평균 32.09% 작게 나왔으며, 동일기간 동안의 호우사상에서 낙동강 외 타 유역도 비슷한 경향을 보이는

지를 살펴보기 위해 한강유역에 대한 누적강우량을 산정한 결과 레이더 1이 TM보다 16.17%작게 나왔다. 이와 같은 결과들을 종합해 보면 동일 호우사상에서는 TM과 레이더 1과의 유역평균강수량 측정값의 차이가 유역의 위치라는 공간적 요소와 무관하게 비슷한 경향을 보이고 있음을 확인하였다.

TM과 레이더 1간의 유역평균강수량 차이와 강우형태와 같은 기상학적 조건과의 상관성을 보다 객관적으로 살펴보기 위하여 주요 호우사상 별로 레이더 관측 결과를 수직분포로 나누어 비교해 보았다. 금번 연구에서 이용된 주요 호우사상은 2018.5.17 ~ 2018.5.19(평창교지점, 집중호우), 2018.7.1 ~ 2018.7.3(경안교지점, 장마전선), 2018.9.3 ~ 2018.9.4(점촌지점, 집중호우) 및 2018.10.4 ~ 2018.10.6(김천지점 등, 태풍) 등 4개로 구분된다. 따라서 평창교, 경안교, 점촌 및 김천지점에서 관측된 레이더 관측값을 6개의 관측 고도별로 구분한 결

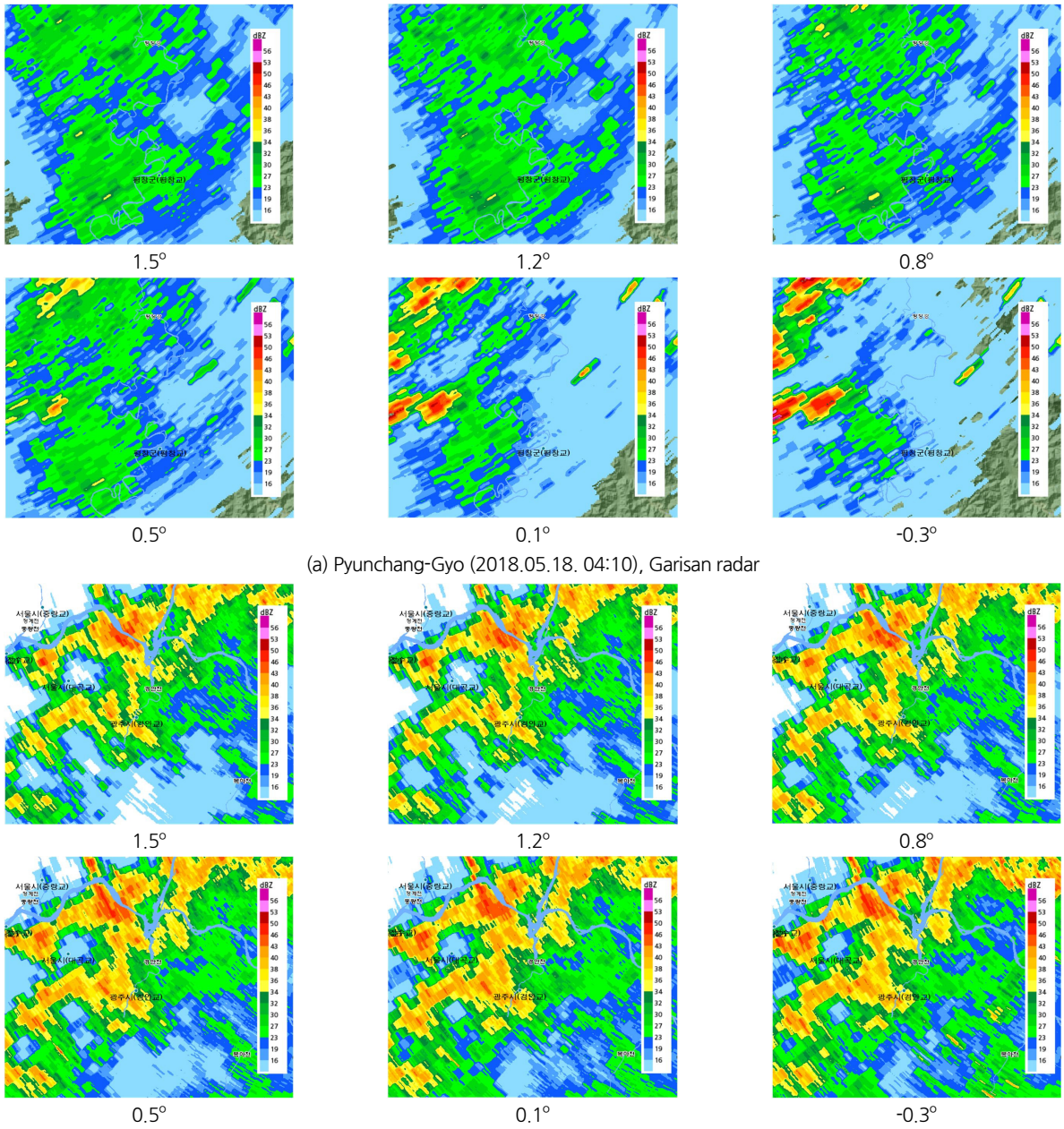
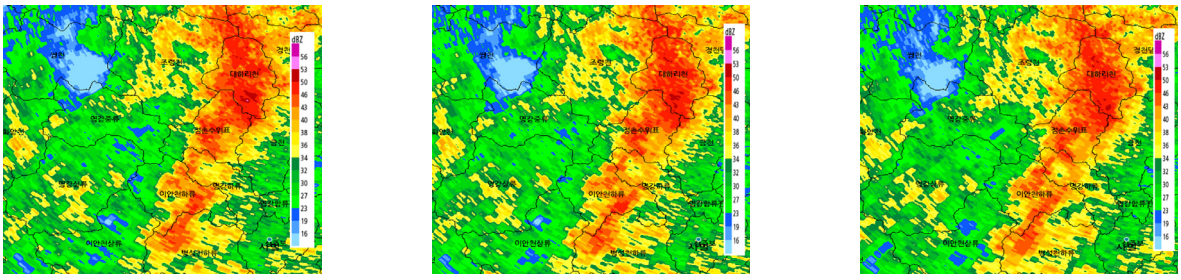
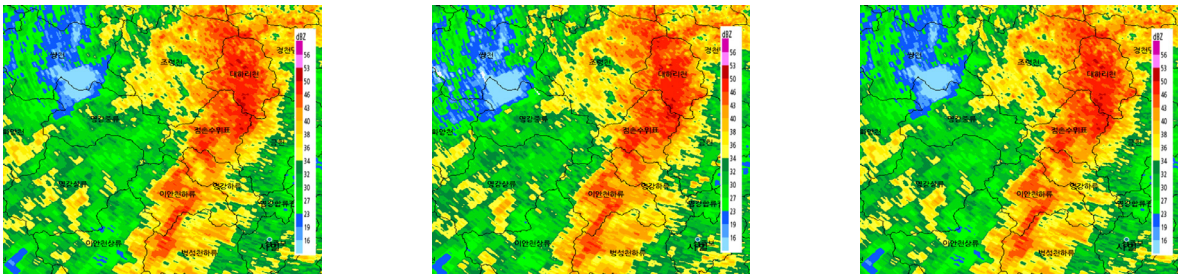


Fig. 7. Image of radar reflectivity by six observation angles

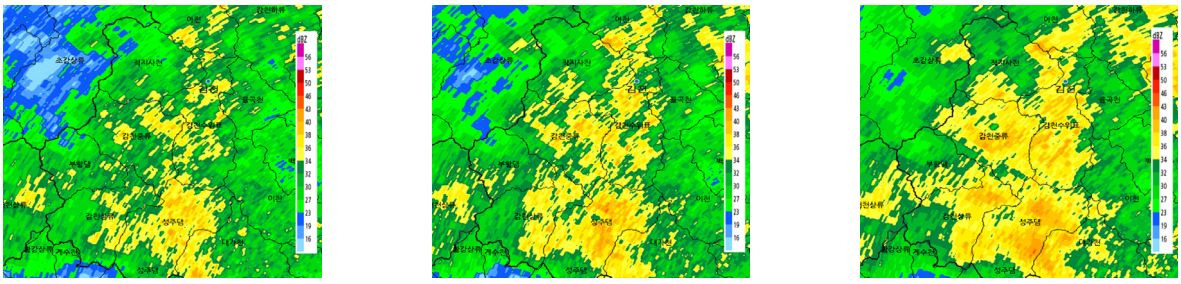


1.3° 1.0° 0.7°

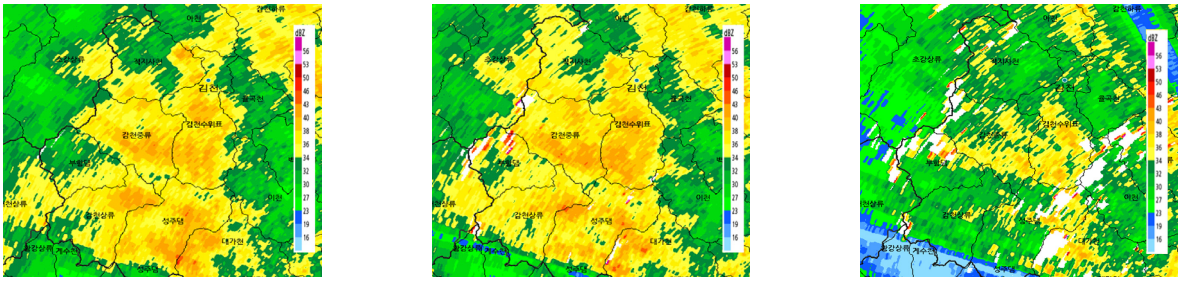


0.3° -0.1° -0.5°

(c) Jeomchon (2018.09.04. 01:00), Sobaeksan radar



1.6° 1.2° 0.8°



0.5° 0.0° -0.5°

(d) Kimcheon (2018.10.06. 07:00), Bisulsan radar

Fig. 7. Image of radar reflectivity by six observation angles (Continue)

과 Fig. 7과 같은 형태를 보였다. 레이더 1이 TM보다 작았던 평창교와 김천지점은 상층에서 하층으로 갈수록 레이더 반사도가 커지는 것을 볼 수 있었으며(가장 낮은 고도각의 경우 지형에 따른 부분 차폐로 강수영역은 줄어든 것으로 추정된다.), 반대로 레이더 1이 TM보다 컸던 경안교와 점촌지점은 레이더 반사도가 상층과 하층이 큰 차이 없이 골고루 높은 반사도를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과들을 종합해 보면 상층에서 하층으로 갈수록 발달하는 강우의 경우 레이더가 TM보다 유역평균강수량을 과소 추정하였으며, 상층과 하층이 골고루 발달한 강한 강도의 강우의 경우 레이더가 TM보다 유역평균강수량을 조금 과다하게 추정하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 TM과 레이더 간의 강수량 측정값의 차이를 기존의 지점 강수량 비교가 아닌 유역평균강수량 비교를 통하여 살펴보았으며, 두 값의 차이가 유역의 특성 및 강우형태와 상관성이 있는지를 분석하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 본 연구에서 이용된 51개 표준유역에서 TM과 레이더 간 유역평균강수량 차는 누적강수량은 -65.05 ~ 26.09%, 10분최대 강수량은 -82.00 ~ 3.80%의 차이를 보였으며 호우사상에 따라 상반된 경향을 보였다.
2) TM과 레이더 간의 강수량 차이와 유역평균고도, 유역면적, 티센다각형 평균면적 및 유역형상계수 등 유역특성과의 상관성을 분석한 결과, R^2 값이 10분최대 강수량은 0.01079, 0.0423, 0.0092 및 0.02137였으며, 누적강수량은 0.0309, 0.0330, 0.0187 및 0.0087로 뚜렷한 상관성을 찾을 수 없었다.
3) 지점강수량에서도 같은 경향을 보이는지 확인하기 위하여 각 표준유역별로 1개의 지점을 선정하여 지점강수량을 비교한 결과 유역평균강수량(누적)과 비슷한 경향을 보였다.
4) TM과 레이더 간의 강수량 차이와 강우유형과의 연관성을 분석하기 위하여 강우형태별로 4개 지점에 대해 관측고도별 레이더 관측값의 수직분포를 검토하였으며 그 결과 상층에서 하층으로 발달하는 강우의 경우 레이더가 TM보다 강수량을 과소 추정한 반면 상하층이 골고루 발달한 강한 강도의 강우의 경우 레이더가 TM보다 조금 과다 추정한 것으로 나타났다.

이와 같은 연구결과를 토대로 TM과 레이더간의 유역평균강수량 측정값의 차이는 유역특성과 같은 공간적 조건 보다는 강우형태와 같은 기상적 조건에 보다 더 연관성이 있다는 결론을 도출하였다.

홍수예경보와 수자원관리에 이용되는 강수량값은 지점 강수량 보다는 유역평균강수량이 많이 사용되므로 레이더 관측값의 활용도는 앞으로 더욱 늘어나게 될 것이며 레이더 관측값에 대한 정확도 향상이 전반적인 홍수예경보 및 수자원관리의 정확도 향상에 크게 기여할 것이다. 금번 연구에서 살펴본 바와 같이 레이더 관측값이 TM보다 항상 작게 나오는 것은 아니며 강우형태에 따라 크거나 작게 나온다는 것을 확인할 수 있었다. 현재 레이더 관측의 정확도를 향상시키기 위하여 지상강수량계를 이용한 보정을 하고 있으며 이는 모든 종류의 레이더 오차를 한번의 보정 절차로 해결한다는 장점은 있으나 지상강수량계가 가지고 있는 대표성에 대한 문제와 레이더 반사도 수직분포의 불균등성의 문제가 있다(Kitchen *et al*., 1994). 금번 연구에서 살펴본바와 같이 상층에서 하층으로 갈수록 강우가 발달하는 형태의 강우시 레이더의 강수량 과소추정 문제가 발생하여 이를 해결하기 위하여 향후 장기적인 연직관측 자료를 이용하여 레이더로 부터의 거리와 관측고도에 따른 최적화된 반사도 계수 프로파일을 한국의 지형 및 기상조건에 맞게 만드는 연구가 필요하다고 판단된다. 아울러 레이더와 TM관측은 측정 높이가 다르며, 레이더를 이용한 수문해석시 낮은 고도의 스캔 자료가 높은 고도의 스캔 자료보다 효용성이 높으므로(Borga, 2002) 하층으로 갈수록 성장하는 강우를 정확히 측정하기 위해서는 현재의 S밴드 레이더를 보완해 줄 수 있는 X밴드 레이더의 설치에 대해 논의도 필요하다고 판단된다.

전국 강우레이더 설치가 완료된 지 많은 시간이 지나지 않았으며, 최근 몇 년간 홍수주의 및 경보를 발령할 만큼의 상당 규모의 호우가 자주 발생하지 않았다는 문제로 인하여 본 연구에서는 하나의 표준유역에 대한 다양한 호우사상시의 관측값을 이용하지 못하였다는 한계를 가지고 있다. 따라서 앞으로 이러한 관측 값들이 더욱 축척된다면 보다 과학적이고 객관성 있는 연구가 이루어 질수 있을 것으로 기대한다.

References

Borga, M. (2002). “Accuracy of radar rainfall estimates for streamflow simulation.” *Journal of Hydrology*, Vol. 267, pp. 26-39.

Cluckie, I.D., Griffith, R.J., Lane, A., and Tilford, K.A. (2000). “Radar hydrometeorology using a vertically pointing radar.” *Hydrology and Earth System Science*, Vol. 4, pp. 565-580.

Han River Flood Control Office (HRFCO) (2016). *The hydrological usability evaluation study of rainfall radar*. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, pp. 15-26.

Illingworth, A.J., Blackman, T.M., and Goddard, J.W.F. (2000). “Improved rainfall estimates in convective storms using polarisation diversity radar.” *Hydrology and Earth System Science*, Vol. 4, pp. 555-563.

Kitchen, M., Brown, R., and Davies, A.G. (1994). “Real time correction of weather radar for the effects of bright band, range and orographic growth in widespread precipitation.” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 120, pp. 1231-1254.

Kouwen, N. (1988). “Watflood: A micro-computer based flood forecasting system based on real-time weather radar.” *Canadian Water Resources Journal*, Vol. 13, No. 1, pp. 62-67.

Krajewski, W.F., Villarini, G., and Smith, J.A. (2010). “Radar-

rainfall uncertainties: Where are we after thirty years of efforts?" *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 91, No. 1, pp. 87-94.

Ministry of Environment (ME) (2019). *Han river forecasting yearbook in 2018*, p. 151

Ministry of Environment (ME) (2019). *Nakdong river forecasting yearbook in 2018*, pp. 179-180.

Pessoa, M.L., Bras, R.L., and Williams, E.R. (1993). "Use of weather radar for flood forecasting in the Sieve river basin: A sensitivity analysis." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 32, pp. 462-475.

Sun, X., Mein, R.G., Keenan, T.D., and Elliott, J.F. (2000). "Flood estimation using radar and raingauge data." *Journal of Hydrology*, Vol. 239, pp. 4-18.

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. 1048-1058.