J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 53, No. 7 (2020), pp. 493-505
doi: 10.3741/JKWRA.2020.53.7.493
pISSN 1226-6280
eISSN 2287-6138

Runoff assessment using radar rainfall and precipitation runoff modeling system model

Kim, Tae-Jeong[a] · Kim, Sung-Hoon[b] · Lee, Sung-Ho[c] · Kim, Chang-Sung[d] · Kwon, Hyun-Han[e]*

[a]Associate Researcher, Research & Development Division, Korea Institute of Hydrological Survey, Goyang, Korea
[b]Principal Researcher, Research & Development Division, Korea Institute of Hydrological Survey, Goyang, Korea
[c]Associate Researcher, Research & Development Division, Korea Institute of Hydrological Survey, Goyang, Korea
[d]Senior Researcher, Research & Development Division, Korea Institute of Hydrological Survey, Goyang, Korea
[e]Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

Paper number: 20-031
Received: 7 April 2020; Revised: 13 May 2020; Accepted: 13 May 2020

Abstract

The rainfall-runoff model has been generally adopted to obtain a consistent runoff sequence with the use of the long-term ground-gauged based precipitation data. The Thiessen polygon is a commonly applied approach for estimating the mean areal rainfall from the ground-gauged precipitation by assigning weight based on the relative areas delineated by a polygon. However, spatial bias is likely to increase due to a sparse network of the rain gauge. This study aims to generate continuous runoff sequences with the mean areal rainfall obtained from radar rainfall estimates through a PRMS rainfall-runoff model. Here, the systematic error of radar rainfall is corrected by applying the G/R Ratio. The results showed that the estimated runoff using the corrected radar rainfall estimates are largely similar and comparable to that of the Thiessen. More importantly, one can expect that the mean areal rainfall obtained from the radar rainfall estimates are more desirable than that of the ground in terms of representing rainfall patterns in space, which in turn leads to significant improvement in the estimation of runoff.

Keywords: Rainfall-runoff model, Area average rainfall, Thiessen polygon, Weather radar, Runoff analysis

레이더 강수량과 PRMS 모형을 이용한 유출량 평가

김태정[a] · 김성훈[b] · 이성호[c] · 김창성[d] · 권현한[e]*

[a]한국수자원조사기술원 연구개발실 전임연구원, [b]한국수자원조사기술원 연구개발실 책임연구원, [c]한국수자원조사기술원 연구개발실 전임연구원, [d]한국수자원조사기술원 연구개발실 선임연구원, [e]세종대학교 공과대학 건설환경공학과 교수

요 지

현재 유역단위 수문해석을 목적으로 장기간 자료 확보가 용이하고 신뢰도가 확보된 지상관측소 강수량 자료를 강우-유출 모형을 활용하여 유출량을 평가하고 있다. 지상관측소 강수량 자료를 이용하여 면적평균 강수량을 산정하는데 있어 일반적으로 지상관측소의 위치 정보를 바탕으로 Thiessen 다각형법을 널리 이용하고 있으나 지상관측소의 공간적 편중으로 인해 면적평균 강수량 산정과정에서 제약이 있다. 본 연구에서는 시공간적으로 연속적인 강수량 관측이 가능한 기상레이더 자료를 이용하여 유역단위 면적평균 강수량을 산정하고 이를 PRMS 모형의 입력 자료로 활용하여 유출량을 평가하였다. 세부적으로 레이더 강수량의 편의 오차를 해결하기 위하여 G/R Ratio 기법을 적용하여 유역별로 레이더 강수량을 보정하였다. 레이더 강수량을 이용한 유출특성은 Thiessen 면적강수량을 이용한 유출의 통계적 특성을 현실적으로 재현하였다. 지상 관측소에 의존하여 생산하는 Thiessen 면적강수량에 비하여 레이더 강수량을 활용하는 것이 유역에 발생하는 강수의 공간적 특성을 효과적으로 반영하는 것으로 사료되며 향후 수문해석에서 정확도를 확보한 유출량을 제시할 것으로 판단된다.

핵심용어: 강우-유출 모형, 면적평균 강수량, Thiessen 다각형, 기상레이더, 유출해석

***Corresponding Author.** Tel: +82-2-3408-3726
E-mail: hkwon@sejong.ac.kr (H.-H. Kwon)

© 2020 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

1. 서 론

강수로부터 기인하여 일상생활에 밀접하게 영향력을 미치는 수문순환은 과거부터 현재까지 문명의 발전에 가장 중요한 요인으로 고려되고 있으며 현재까지도 수문순환을 정확하게 평가하기 위하여 강우해석 및 유출모형 최적화 등을 포함한 다양한 수문해석 기법의 개발 및 개선을 위한 노력을 하고 있다. 이러한 일련의 과정은 수문학적으로 지표에 흐르는 물의 양을 양적으로 해석하는 유출분석으로 정립되어 오고 있다. 수공구조물 설계 및 취수량 확보 등의 치수 및 이수계획을 수립하는데 있어 신뢰도 있는 장기 유출분석 체계 구축은 필수적으로 선행되어야 한다.

우리나라의 경우 국토의 70% 이상이 산지이며 6월～9월에 장마 및 태풍 등과 같은 지리적 및 기후학적 요인으로 강수량의 60% 이상이 집중된다. 이와 같은 강수의 집중현상과 도시화로 인한 불투수층의 증가와 연계되어 대부분의 수자원이 바다로 유출된다. 따라서 안정적인 용수공급 대책 등과 같은 수자원의 효율적인 이용을 위하여 일 단위 이상의 정량적인 유량자료가 필요하다.

1990년대부터 유출분석을 위하여 구조적 및 비구조적 유역조사의 기술력 유역조사의 기술력 향상을 기반으로 광범위한 수문학적 지형정보와 유역특성 인자를 규명할 수 있는 원격탐사(Remote Sensing, RS) 및 지리 정보 시스템(Geometry Information System, GIS)과 연계한 강우-유출모형을 도입이 본격화되어 유역의 수자원을 평가하고 수문순환 특성을 정량적으로 규명하는데 활용되고 있다. 수문순환 과정에서 강수로부터 시작되는 유출현상을 다각적인 관점에서 접근하기 위하여 추계학적으로 모의된 강우량을 활용하는 연구와 시공간적으로 고해상도의 강수정보를 제공하는 레이더 강수량을 활용하는 연구가 활발하게 수행되고 있다(Borga, 2002; Kwon *et al*., 2011). 덧붙여, 지상 강수량을 공간적으로 보간(interpolation)하고 레이더 강수량과 합성하는 방법들이 개발되어 수문해석에 활용되고 있다. 이러한 강수자료 합성기법은 강우의 공간적 특성이 왜곡되는 현상이 있지만 수문해석 과정에서 다양한 장점을 제공하는 것으로 알려지고 있다(Yoon *et al*., 2002; Kim *et al*., 2010; Kim *et al*., 2017).

Kim *et al*. (2016)은 불연속 Kernel-Pareto 확률분포 기반의 강우량 모의기법과 Sacramento 장기 유출모형을 연계하여 일단위 100년 기간의 강우량 시나리오를 입력 자료로 유출량을 산정하였다. 산정된 유출량으로 용수공급능력을 평가하여 물수지 분석 등과 같은 수자원계획 수립을 위한 자료로 활용가능성을 확인하였다. Kang *et al*. (2017)은 확률분포를 이용하여 생산한 앙상블 형태의 레이더 강수량을 생산하여 남강댐 유역을 대상으로 유출모의를 수행하여 지상 강수량과 레이더 강수량의 오차 및 불확실성을 정량적으로 평가하였다.

본 연구에서는 전국단위 유출해석을 목적으로 기존에 지상 관측소에 의존하여 산정된 면적평균 강수량을 개선하기 위하여 강수현상의 시공간적 특성파악에 유리한 레이더 강수량의 활용가능성을 평가하고자 한다. 이를 위하여 국내외적으로 일단위 장기 유출모의에 활용되는 PRMS (Precipitation Runoff Modeling System) 모형을 이용하여 중권역별 유출분석을 수행하고 통계학적 평가를 수행하였다. 유역의 다양한 조건을 고려할 수 있는 PRMS 모형은 국내외다수의 연구에서 유출특성을 효과적으로 모의하는 것으로 평가받고 있으며 우리나라 전국유역조사 사업의 장기 유출량 산정 모형으로 활용되고 있다(Cherkauer, 2004; Kim and Kim, 2011; Kim *et al*., 2019; Ghafouri-Azar and Bae, 2019).

본 연구의 구성은 다음과 같다. 1장에서는 유출량 평가와 관련하여 선행적으로 수행된 연구동향을 바탕으로 본 연구의 배경 및 목적을 요약하여 서술하였으며, 2장에서는 면적평균 강수량 산정 및 PRMS 강우유출 모형을 서술하였다. 3장에서는 분석을 위하여 사용된 레이더 자료 및 지상 관측소에 대하여 서술 하였다. 4장에서는 레이더 강수량을 활용한 면적평균 강수량과 유출특성을 비교하여 제시하였다. 최종적으로 5장에서는 본 연구의 결론 및 수문학적 활용방안을 서술하였다.

2. 연구방법

2.1 Thiessen 다각형을 이용한 면적평균 강수량 산정

강수는 시공간적으로 변동하는 변량이므로 총량과 분포를 얼마나 정확하게 규명하는 것이 유출해석에 성패를 좌우한다. 유역단위 유출해석을 위한 강수자료는 지점에서 관측된 강수량을 기반으로 유역면적이 반영된 면적평균 강수량으로 산정하는 것이 필수적으로 선행되어야 한다. 이에 따라, 관측된 강수자료를 활용하여 강수의 시공간적 총량과 분포를 산정하기 위한 다양한 기법이 개발되었다.

면적평균 강수량을 산정하기 위하여 산술평균법, 등우선법, 최근린법(nearest neighbor), 역거리 가중법, 스플라인(spline), Kriging, RBF (radial basis function) 및 PRISM (precipitation-elevation regressions on independent slopes model) 등의 다양한 기법이 개발되었다. Thiessen 다각형법은 GIS 모형을 통하여 실무에서 일반적으로 사용되는 방법으로 GIS 기술발전과 연계되어 면적평균 강수량 산정시 가장 보편적으로 사용된다. Fig. 1과 같이 근접한 관측소를 직선으로 연결하여 삼각형을 만든 후, 각 변의 수직이등분선을 그어 각 관측점의 주위에

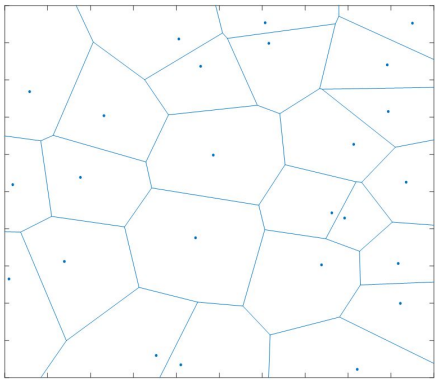

Fig. 1. Thiessen polygon method

다각형을 만듦으로써 다각형의 면적으로 가중치를 부여하는 방법이다. 즉, Thiessen 다각형법을 적용하여 산정한 면적평균 강수량(이하, Thiessen 면적강수량)은 $\overline{R}$는 Eq. (1)과 같다.

$$\overline{R} = \sum_{i=1}^{N} \frac{A_i}{A} r_i \tag{1}$$

Eq. (1)에서 A는 전체 유역의 면적이며 A_i와 r_i는 i번째 유역의 면적과 지점 강수량이다.

Thiessen 다각형법은 대상유역에서 관측소가 공간적으로 균질하게 분포되어 있는 유역에서는 합리적인 면적평균 강수량을 산정할 수 있지만 강수의 시공간적 변동성이 큰 지역이나 해안지역과 같이 관측소가 편중되어 설치된 유역에서는 적용하는데 제약이 있다.

일반적으로 Thiessen 다각형법은 사전에 GIS를 이용하여 산정한 가중치를 적용하여 면적강수량을 생산하는데 유리하지만 대상 관측소의 지점이 많은 경우 통신장비 고장 및 수수구 막힘 등과 같은 기계적인 오작동으로 인한 결측이 발생하는 경우 해당 기간의 자료를 활용할 수 없고 관측소의 이전 및 신설의 영향을 고려하여 매번 가중치를 매번 재산정해야 하는 번거로움이 있다.

2.2 PRMS 강우-유출 모형

유출량 분석은 시간적 관점에서 일반적으로 단기와 장기로 구분되며 본 연구에서는 수공구조물의 설계, 수자원의 확보 및 운영을 위한 기본 자료로서 장기 강우-유출모형을 활용하고 있다. 즉, 장기 유출모형은 유역단위 기초자료 조사관리 등을 위하여 수자원 장기종합계획 및 전국유역조사 사업 등에서 적극 활용되고 있다. 대표적인 장기 유출량 산정은 수위-유량관계, VIC, TOPMODEL, HSPF, KIMSTORM, IHACRES, TANK, NWS-PC, 가지야마(Kajiyama) 및 PRMS 모형 등이 활용되고 있다(Beven *et al*., 1984; Bicknell *et al*., 1997; Kim *et al*., 2000).

미국 지질조사국(United States Geological Survey, USGS)에서 개발한 PRMS 모형은 확정론적 준분포형(deterministic semi-distributed) 모형으로 토양층 유출거동, 지하수 거동 및 토지 이용특성 등을 연계하여 유역의 유출해석이 수행된다(Leavesley, 1984). PRMS 모형은 유역 특성인자를 기초로 물리적인 해석을 가지는 경험적 관계와 역학적 개념을 도입하여 유출량을 산정하며 PRMS 모형의 지배방정식은 Eq. (2)와 같은 물수지 방정식이다.

$$Q = P - ET \pm S \tag{2}$$

Eq. (2)에서 $Q(m^3/s)$는 유출량, $P(mm)$는 강수량, $ET(mm)$는 증발산량이며 $S(mm)$는 적설, 차단, 불투수층의 지표 저류량, 토양수분양, 지하수 저수지 및 지표하 저수지이다. 본 연구에서는 유출해석을 위하여 적용한 PRMS 모형의 개략적인 내용을 서술하였으며 PRMS 모형의 전반적인 개념과 모의과정은 Jung and Bae (2005) 및 Han *et al*. (2016)에 상세하게 서술되어 있다.

PRMS 모형은 일단위 강수량, 최대 및 최소 온도를 기반으로 융설량과 증산량을 산정하고 대상유역을 수문응답단위(Hydrologic Response Unit, 이하 HRU)로 구분하며 각 HRU의 물수지와 에너지수지를 계산한다. 수문응답단위는 경사, 식생유형 및 토지유형 등과 같은 유역특성을 기초로 유역을 구분한 것이며 각 단위는 수문응답에 대해 동질한 것으로 가정된다.

PRMS의 기본적인 입력자료는 강수 및 기온자료이다. 태양복사량 자료가 확보된 경우에는 입력자료로 활용할 수 있지만 PRMS 모형 내부에서 산정이 가능하다. 토양층(soil-zone)과 불투수층(impervious-zone)으로 구분된 지표에 도달한 강수는 기온과 태양복사량을 반영하여 증발되거나 불투수 저수지의 저류량을 초과하는 경우 지표면 유출을 발생한다.

Fig. 2는 PRMS 모형의 수문모의 과정을 도시한 것으로 토양층은 강수를 함양하는 상부층(recharge zone)과 하부층(lower zone)으로 구분되며 상부층은 침투에 의한 강수가 유입되어 증발과 증산을 고려하고 하부층은 증산만 고려하게 된다. 정리하면, 토양층에 최대 저류량을 초과하는 강수는 지하수 저수지(ground-water reservoir)나 지표하 저수지(sub-surface reservoir)로 유입된다. 지표하 저수지에서는 지표하 유출과 지하수 함양이 발생하고, 지하수 저수지에서는 지하수 유출과 지하수 싱크(ground-water sink)가 발생한다. 최종적으로 지표면 유출과 지표하 유출 및 지하수 유출의 합이 HRU에서의 유출량으로 산정된다.

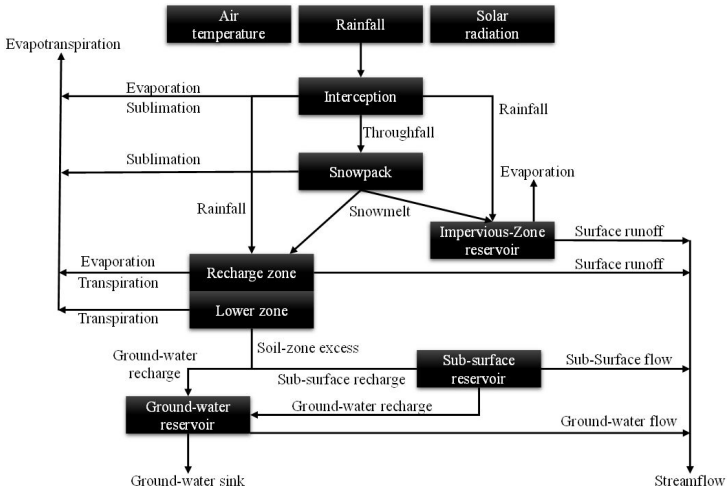

Fig. 2. Hydrological processes simulated by the PRMS model (Leavesley, 1984)

3. 분석자료

3.1 지상관측소 및 기상레이더 강수자료

우리나라에서는 다양한 부처에서 수문자료를 생산 및 배포하고 있다. 수문자료를 생산하는 환경부(Ministry of Environment, ME), 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA), 한국수자원공사(K-water) 및 한국수력원자력(Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd., KHNP)은 수문자료 공인시스템을 통하여 객관성 및 신뢰성을 확보한 수문자료를 배포하고 있으며 본 연구에서는 수문자료공인심의에서 검증받은 공인된 수문자료를 활용하였다.

Fig. 3은 지상관측소 자료를 바탕으로 구성한 Thiessen 네트워크와 한국수문조사연보 강수량을 이용하여 산정된 Thiessen 면적강수량을 도시한 결과이다. Thiessen 네트워크 구축과정에서 해안지역이나 북한 인접지역 등은 강수량관측소의 개소수가 적어 정확한 Thiessen 네트워크 구축이 어렵기 때문에 사용상에 주의가 필요할 것으로 사료된다. 또한, 영동지역과 영서지역은 태백산맥의 영향으로 지역별 강수량의 편차가 크게 발생하기 때문에 권역을 구분하여 별도의 Thiessen 네트워크를 구축하였고, 제주도권역도 별도로 구축하였다. 추가적으로 낙동강 권역의 울릉도와 독도는 유출해석을 위한 유역면적 산정시 제외하였다.

면적평균 강수량 산정과정에서 지상관측소의 의존도가 높은 경우 정확도 높은 장기 유출분석을 수행하기 위해서는 가능한 많은 강수량 관측소에서 장기간에 걸쳐 관측된 강수량자료를 사용한 면적평균 강수량 산정이 필요하다. 하지만 지상관측소의 강수량은 관측소가 위치하고 있는 지점(point)의 강수량을 나타내므로 인접한 공간에서의 강수량을 산정하는 경

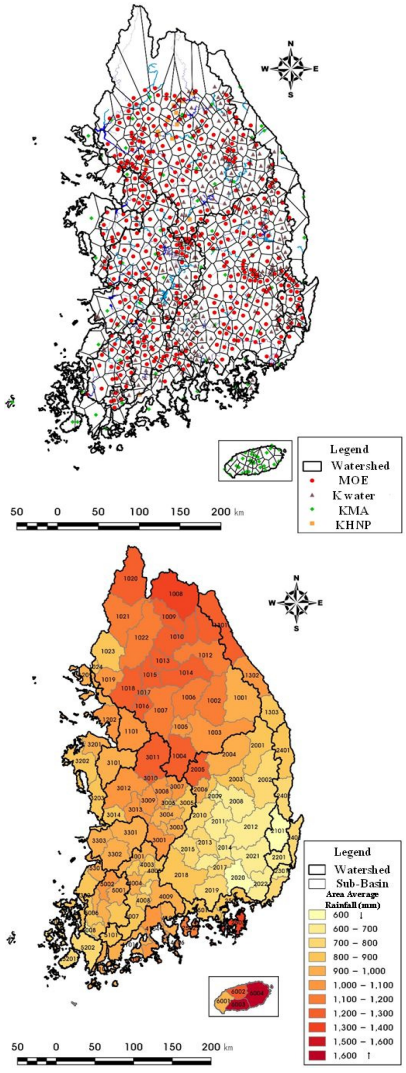

Fig. 3. Thiessen network and area average rainfall

우 한정된 지점 강수량을 바탕으로 면적평균 강수량을 산정하는 경우 왜곡이 발생할 수 있다. 즉, 시공간적으로 연속성이 존재하는 강수현상을 인위적으로 유역을 분할하여 가중치를 산정하고 이를 면적평균 강수량 추정을 위해 사용하는 과정은 여러 가지 문제를 야기할 수 있다. 시공간적 강수현상의 변동성이 증가함에 따라 연속된 강수장의 공간적 특성 규명과 강우의 실시간 모니터링은 수자원관리 및 방재 능력확보를 위하여 중요성이 높아지고 있다. 이를 뒷받침하고자 고성능 기상관측 장비인 기상레이더를 사용하여 강수관측이 수행되고 있다(Smith *et al*., 2012).

Table 1과 Fig. 4는 GIS를 기반으로 효율적인 유역관리를 위하여 하천 흐름특성, 연결 관계, 위상 관계 등을 고려하여 구

Table 1. Sub-basins and their areas used in this study

No.	Basin Code	Area (km^2)	No.	Basin Code	Area (km^2)	No.	Basin Code	Area (km^2)
1	1001	2,447.85	40	2010	1,005.33	79	3201	685.06
2	1002	1,773.39	41	2011	1,109.84	80	3202	1,336.04
3	1003	2,483.82	42	2012	2,092.42	81	3203	954.14
4	1004	1,614.36	43	2013	781.7	82	3301	1,405.60
5	1005	524.42	44	2014	532.16	83	3302	1,117.53
6	1006	1,491.01	45	2015	928.94	84	3303	844.05
7	1007	2,072.72	46	2016	402.96	85	4001	763.47
8	1008	2,384.68	47	2017	473.26	86	4002	237.08
9	1009	940.45	48	2018	2,281.72	87	4003	370.89
10	1010	1,587.45	49	2019	1,185.08	88	4004	431.24
11	1011	931.22	50	2020	1,004.68	89	4005	486.67
12	1012	1,852.04	51	2021	1,422.30	90	4006	183.24
13	1013	721.7	52	2022	915.84	91	4007	1,029.52
14	1014	1,566.05	53	2101	1,139.99	92	4008	283.78
15	1015	760.61	54	2201	660.86	93	4009	1,128.43
16	1016	561.12	55	2301	324.16	94	4101	1,074.40
17	1017	43.87	56	2302	541.28	95	4102	384.61
18	1018	1,537.22	57	2401	1,332.77	96	4103	124.07
19	1019	848.42	58	2402	905.65	97	4104	1,048.40
20	1020	2,195.20	59	2403	656.59	98	4105	612.71
21	1021	2,072.71	60	2501	797.26	99	4106	140.6
22	1022	2,452.18	61	2502	358.7	100	5001	714.8
23	1023	1,419.21	62	2503	533.83	101	5002	565.04
24	1024	146.4	63	2504	770.55	102	5003	663.98
25	1101	1,658.66	64	3001	930.43	103	5004	408.13
26	1201	1,009.55	65	3002	127.72	104	5005	218.95
27	1202	961.26	66	3003	464.08	105	5006	483.63
28	1301	1,852.93	67	3004	705.51	106	5007	264.34
29	1302	1,050.11	68	3005	664.62	107	5008	150.71
30	1303	986.64	69	3006	120.42	108	5101	505.52
31	2001	1,628.68	70	3007	553.56	109	5201	437.43
32	2002	1,975.77	71	3008	667.48	110	5202	1,069.31
33	2003	980.41	72	3009	648.99	111	5301	511.11
34	2004	1,816.06	73	3010	129.82	112	5302	1,097.99
35	2005	914.43	74	3011	1,854.98	113	5303	514
36	2006	433.11	75	3012	1,843.73	114	6001	378.5
37	2007	224.13	76	3013	666.1	115	6002	348.36
38	2008	1,405.99	77	3014	536.58	116	6003	363.56
39	2009	175.51	78	3101	1,668.39	117	6004	761.8

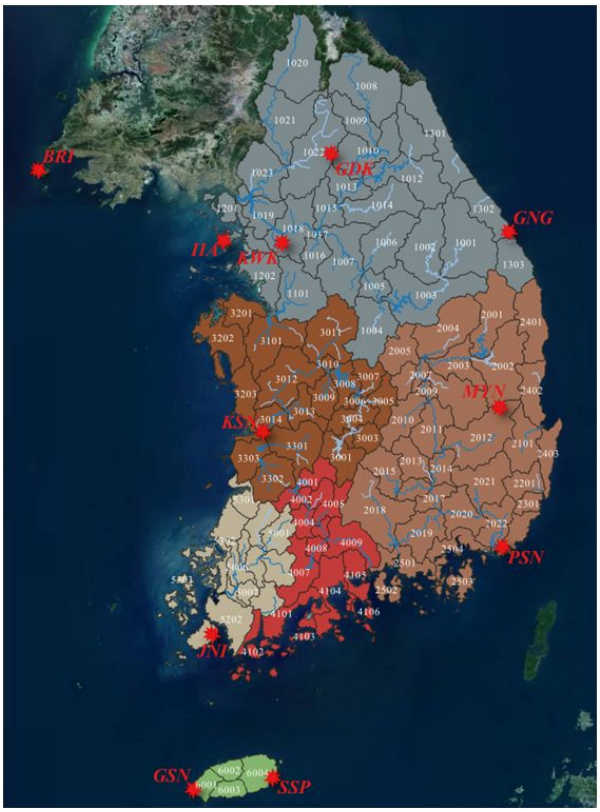

Fig. 4. Sub-basin and weather radar site location

분된 중권역(Sub-basin)과 기상레이 위치이다. 세부적으로 한강권역 30개, 낙동강권역 33개, 금강권역 21개, 영산강권역 15개, 섬진강권역 14개 및 제주도권역 4개의 중권역으로 분할되어 있다. 본 연구에서 유출모의를 위한 사용된 강수량 자료의 시간범위는 전국의 레이더 강수량의 확보가 가능한 2011년부터 2018년의 자료를 활용하였다. 레이더 강수량은 강수입자로부터 부딪혀 되돌아온 반사도(reflectivity)를 이용하며 레이더 반사도-강우강도 관계식을 활용하여 강우량으로 환산되며 강수유형 및 지역에 따라서 다양한 관계식들이 제시되고 있다. 본 연구에서는 국내외적으로 레이더 강수량 산정에 대표적으로 사용되는 Marshall and Palmer (1948)이 제시한 레이더 반사도-강수강도 관계식을 사용하여 레이더 강수량을 추정하였다(Hasan *et al*., 2016).

4. 연구결과

4.1 면적평균 강수량 산정 및 통계분석

유출해석을 수행함에 있어 가장 지배적인 변수는 강수량이다. 즉, 신뢰도 높은 장기 유출해석을 위하여 시공간적으로

Table 2. Different goodness-of-fit measures used for evaluation of rainfall

Correlation Coefficient	$CC=\dfrac{\sum_{n=1}^{N}(T_n-\overline{T})(R_n-\overline{R})}{\sqrt{(\sum_{n=1}^{N}(T_n-\overline{T})^2)(\sum_{n=1}^{N}(R_n-\overline{R})^2)}}$
Nash-Sutcliffe Efficiency	$NSE=1-\dfrac{\sum_{n=1}^{N}(T_n-R_n)^2}{\sum_{n=1}^{N}(T_n-\overline{R})}$
Index of Agreement	$IoA=1-\dfrac{\sum_{n=1}^{N}(T_n-R_n)^2}{\sum_{n=1}^{N}(\lvert T_n-\overline{T}\rvert+\lvert R_n-\overline{T}\rvert)^2}$
Root Mean Square Error	$RMSE=\sqrt{\dfrac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}(T_n-R_n)^2}$
Mean Absolute Error	$MAE=\dfrac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\lvert R_n-T_n\rvert$
Bias	$Bias=\dfrac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}(T_n-R_n)$

광범위한 지상관측소의 자료를 활용하여 Thiessen 가중치를 산정해야 한다. 본 연구에서는 제주도에서 운용되는 종관기상관측장비는 해안지역에 위치하고 있어 면적평균 강수량을 산정하는 경우 왜곡이 발생될 것으로 사료되어 자동기상관측장비 30개소를 추가적으로 반영하여 면적평균 강수량을 산정하였다.

Thiessen 방법 기반의 면적강수량과 레이더 강수량의 통계적 적합도(goodness of fit)를 평가하기 위하여 총 6개의 검증지표를 활용하였다. Table 2에서 T는 Thiessen 강수량, R은 레이더 강수량이며 $\overline{T}$와 $\overline{R}$는 Thiessen 강수량과 레이더 강수량의 평균값이다. 상관계수(Correlation Coefficient, CC), NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency) 및 일치계수(Index of Agreement, IoA)는 무차원 지표로 최적 값은 1이다. 추가적으로 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE), 평균 절대 오차(Mean Absolute Error, MAE) 및 편의(Bias)를 평가하였으며 RMSE, MAE 및 Bias의 최적 값은 0이며 단위는 mm/day이다.

해당 유역경계를 기준으로 유역에 포함되는 레이더 격자의 강수량을 추출하여 Thiessen 면적강수량과 레이더 강수량을 기반으로 각 권역별로 산정된 면적평균 강수량의 기초 통계분석을 수행하였다. Thiessen 면적강수량과 레이더 강수량의 상관계수는 한강권역 0.73, 낙동강권역 0.84, 금강권역 0.86, 영산강권역 0.84, 섬진강권역 0.88 및 제주도권역 0.73 으로 전반적으로 우수한 상관성을 나타내고 있다.

Thiessen 면적강수량과 레이더 강수량의 정량적인 편의(bias)를 산정한 결과 한강권역 1.16 mm/day, 낙동강권역 1.08

mm/day, 금강권역 0.24 mm/day, 영산강권역 0.68 mm/day, 섬진강권역 0.29 mm/day 및 제주도권역 1.34 mm/day으로 레이더 강수량의 관측특성상 필연적으로 발생하는 계통 오차(systematic error)가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 다른 권역에 비하여 금강권역, 영산강권역 및 섬진강 권역의 편의 오차가 상대적으로 작은 것을 확인하였다.

레이더 강수량에 포함된 계통 오차의 문제점이 지속적으로 제기되었으며 편의를 보정하기 위한 다양한 연구가 수행되었다(Na *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2018; Rui *et al.*, 2019). 본 연구에서는 레이더 편의를 보정하기 위하여 Thiessen 면적강수량과 레이더 강수량의 보정비율(correction factor)을 레이더 강수량에 일괄적으로 적용하여 보정하는 G/R Ratio 보정기법을 적용하여 레이더 강수량을 보정하였다.

Table 3은 G/R Ratio 보정기법을 적용하여 산정한 통계적 적합도이다. Thiessen 면적강수량과 레이더 강수량은 0.73～0.88의 높은 상관성을 보이며 Fig. 5는 6개의 전체 권역의 강수

Table 3. Comparison of the goodness-of-fit measures between Thiessen-based and radar-based areal rainfall (raw and corrected radar rainfalls)

Watershed	*CC*	Raw Radar Rainfall				Adjusted Radar Rainfall			
		NSE	*IoA*	*MAE* (mm/day)	*RMSE* (mm/day)	*NSE*	*IoA*	*MAE* (mm/day)	*RMSE* (mm/day)
Han	0.73	0.47	0.74	2.29	9.12	0.49	0.83	2.18	8.80
Nakdong	0.84	0.57	0.80	2.13	7.56	0.70	0.90	2.02	6.29
Guem	0.86	0.70	0.89	2.03	6.13	0.73	0.90	2.03	5.89
Yeongsan	0.84	0.65	0.85	2.28	7.81	0.70	0.89	2.27	7.21
Seomjin	0.88	0.73	0.90	1.98	6.01	0.75	0.91	1.96	5.69
Jeju	0.73	0.36	0.76	3.23	12.25	0.48	0.83	3.15	10.85

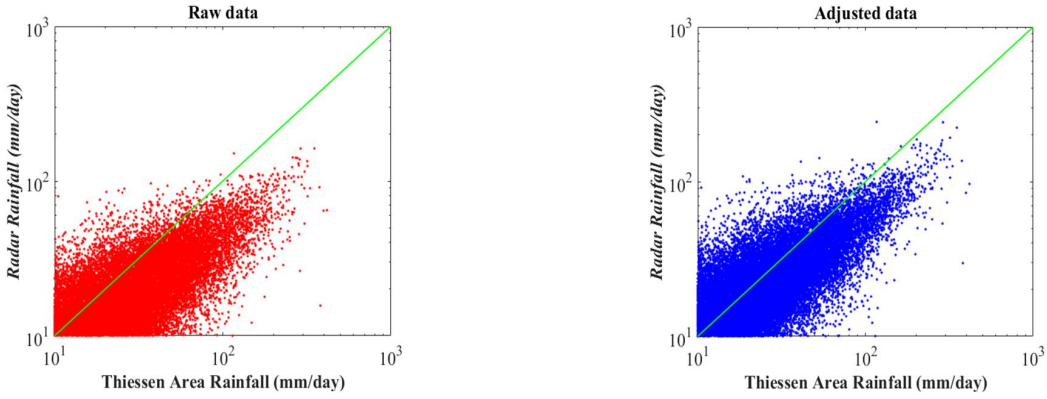

Fig. 5. Scatter plot of weather radar rainfall by G/R ratio method before correction and after correction against the Thiessen area rainfall

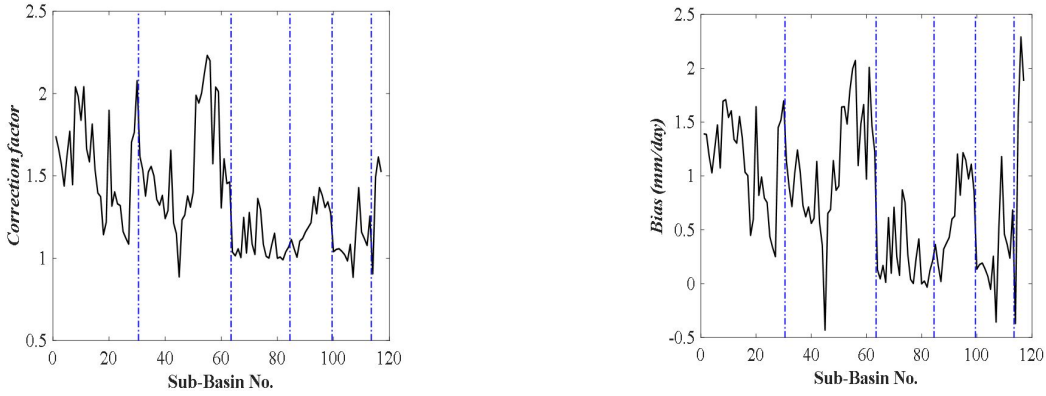

Fig. 6. Comparison of correction factor and bias (mm/day) over all of the sub-basin

량 자료를 이용하여 도시한 산점도이다. 원시(raw) 레이더 강수량의 경우 Thiessen 면적강수량과 비교하여 무게중심이 하향되어 있지만 G/R Ratio 보정기법을 이용하여 보정된 레이더 강수량의 경우 하향된 무게중심을 복원하는 것을 확인하였다. 상관계수는 단순하게 변량의 경향성만 판단할 수 있으므로 하나의 변수에 일정한 상수변환을 하더라도 상관계수는 일정하므로 추가적으로 NSE, IoA, MAE 및 RMSE의 통계적 적합도를 평가하였으며 전체 유역에서 개선되는 것을 확인하였다.

추가적으로 Fig. 6은 Thiessen 면적강수량과 레이더 강수량의 편의와 G/R Ratio 보정기법을 이용하여 산정한 중권역의 레이더 강수량 보정계수이다. 파란색 점선은 권역을 구분한 것으로 왼쪽부터 한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강 및 제주 순서이다. 권역별 레이더 강수량 보정계수 평균값으로 한강권역 1.57, 낙동강권역 1.55, 금강권역 1.09, 영산강권역 1.22, 섬진강권역 1.10 및 제주도권역 1.38이다. 앞서 산정한 권역별 편의(bias)는 한강권역 1.16, 낙동강권역 1.08, 금강권역 0.24, 영산강권역 0.68, 섬진강권역 0.29 및 제주도권역 1.38로 레이더 강수량 보정계수와 상관성은 0.92로 MAE와 RMSE에 비하여 높은 상관성을 확인하였다.

4.2 PRMS 강우-유출 모형을 이용한 유출분석

PRMS 강우-유출 모형은 유역의 임상도, 토양도, 토지피복도 및 수치표고모델 등과 같이 지형학적 자료를 활용하여 결정되는 매개변수와 최적화 기법을 통하여 산정되는 매개변수로 구성된다. 본 연구에서는 수문자료가 확보된 유역을 선정하여 매개변수를 검정 및 검증하고 이를 미계측유역으로 매개변수를 전이하기 위하여 지역화 된 매개변수를 활용하였다. 본 연구에서는 전국유역조사 과업에서 Rosenbrock 기법으로 산정된 매개변수를 적용하였다(Rosenbrock, 1960).

유출량은 일반적으로 유역의 하류단에서 실측을 통하여 획득할 수 있지만 제한된 수위관측소 및 자동유량측정장비로 인하여 강우-유출 모형을 통하여 다양한 강우조건에 따른 유출특성을 평가하게 된다. 본 연구에서는 Radar 강수량을 활용하여 산정한 유역별 유출량 검토를 위하여 Thiessen 면적강수량을 이용하여 산정된 국가수자원관리종합정보시스템(Water Management Information System, WAMIS)의 수문기상학적 장기유출량을 활용하였다.

Tables 4 and 5는 통계적 적합도와 통계적 모멘트를 산정한 결과이다. 편의는 0.65～1.76(m^3/s), 상관계수의 경우 0.69

Table 4. Comparisons of efficiency criteria between the runoff using Thiessen and radar rainfall

Watershed	*CC*	*NSE*	*IoA*	*MAE* (m^3/s)	*RMSE* (m^3/s)	*Bias* (m^3/s)
Han	0.75	0.54	0.81	10.20	41.72	0.66
Nakdong	0.69	0.44	0.75	5.91	30.54	0.65
Guem	0.74	0.51	0.80	11.47	39.95	1.79
Yeongsan	0.75	0.53	0.80	12.50	46.92	1.30
Seomjin	0.77	0.56	0.81	6.70	22.58	0.65
Jeju	0.82	0.65	0.86	7.64	26.31	1.79

Table 5. Comparisons of statistical Results between the runoff using Thiessen and radar rainfall (m^3/s)

Watershed	Area Rainfall	Mean	Standard deviation	Skewness	Kurtosis
Han	Thiessen	17.65	58.76	11.02	191.84
	Radar	16.99	40.80	8.96	176.01
Nakdong	Thiessen	8.95	40.06	16.25	402.60
	Radar	9.31	25.78	13.34	350.57
Guem	Thiessen	19.14	57.52	9.79	154.05
	Radar	17.35	39.99	8.133	114.31
Yeongsan	Thiessen	20.79	8.60	13.08	269.40
	Radar	19.49	42.90	9.11	172.400
Seomjin	Thiessen	11.58	34.02	9.65	143.49
	Radar	10.92	21.62	5.98	55.42
Jeju	Thiessen	16.26	44.92	9.56	155.43
	Radar	14.48	30.54	7.22	87.04

~0.82을 나타내고 있으며, IoA의 경우 0.75~0.86로 기존의 장기유출량과 유사성을 확인하였다. 강수조건에 따라 산정된 유출량 자료를 이용하여 1차 통계적 모멘트인 평균값과 4차 통계적 모멘트인 첨도까지 산정하였다. Radar 강수량을 이용하여 산정된 유출량은 Thiessen 면적강수량을 이용하여 산정된 유출량의 통계적 특성을 유사하게 재현하는 것을 확인하였다. 세부적으로 평균값의 경우 Thiessen 면적강수량에 비하여 과소추정을 확인하였다. 이러한 사유는 레이더 강수량의 과소추정의 문제가 연쇄적으로 유출량 산정에 반영된 결과로 사료된다. 추후에 레이더 강수량의 편의보정의 고도화 및 유출모형 매개변수 최적화를 통하여 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 6은 2017년도 실측 유량자료를 확보할 수 있는 중권

Table 6. Comparison of annual average discharge between observed and simulated (m^3/s)

Basin Code	Obs	Radar	Thie ssen	Basin Code	Obs	Radar	Thie ssen	Basin Code	Obs	Radar	Thie ssen
1001	44.770	58.978	44.535	2009	-	1.158	0.630	3014	-	7.646	5.970
1002	31.470	72.983	36.170	2010	5.930	9.573	6.583	3101	34.070	32.496	27.369
1003	47.640	65.021	47.421	2011	-	6.051	2.905	3201	-	12.687	9.139
1004	42.010	51.156	40.649	2012	20.070	13.195	8.529	3202	-	20.303	15.452
1005	-	11.460	8.488	2013	5.080	9.060	6.517	3203	-	15.680	11.003
1006	25.990	36.842	29.291	2014	-	3.325	2.263	3301	21.340	25.005	17.787
1007	37.070	50.382	39.275	2015	6.110	3.780	7.913	3302	13.850	16.769	12.965
1008	21.480	38.541	69.087	2016	-	5.174	2.918	3303	-	13.578	11.075
1009	8.470	29.056	28.299	2017	3.360	6.561	3.554	4001	9.600	14.576	9.571
1010	-	45.902	45.310	2018	24.550	42.505	25.192	4002	3.180	3.891	2.445
1011	15.820	27.417	27.445	2019	16.930	14.697	8.932	4003	4.390	4.981	3.056
1012	47.760	51.675	50.561	2020	-	6.206	3.252	4004	4.940	7.138	5.335
1013	-	20.747	18.707	2021	5.840	14.309	6.988	4005	4.180	6.648	5.786
1014	-	47.855	40.102	2022	-	9.184	5.093	4006	-	2.736	1.774
1015	14.660	25.057	18.962	2101	4.690	10.503	4.808	4007	-	19.546	11.949
1016	14.330	16.702	14.014	2201	2.780	4.957	3.062	4008	3.110	6.757	3.701
1017	-	1.323	0.961	2301	-	3.387	2.078	4009	15.880	22.814	14.975
1018	28.810	42.370	39.180	2302	-	10.850	5.632	4101	-	16.968	14.382
1019	-	14.750	16.314	2401	-	24.900	18.690	4102	-	5.180	5.572
1020	35.570	36.191	52.798	2402	-	13.183	10.929	4103	-	2.349	2.472
1021	35.620	40.678	40.065	2403	-	7.821	5.787	4104	12.000	20.006	14.834
1022	58.660	51.504	51.106	2501	-	11.898	10.148	4105	10.940	9.603	8.620
1023	-	20.456	17.854	2502	-	9.879	7.254	4106	-	2.437	2.344
1024	-	2.302	2.185	2503	-	14.327	14.806	5001	8.550	12.006	9.970
1101	40.940	35.204	31.599	2504	-	11.401	9.551	5002	5.740	8.861	7.388
1201	-	18.639	15.366	3001	12.440	19.891	18.392	5003	7.290	9.382	7.041
1202	-	19.839	20.005	3002	-	2.706	2.358	5004	3.840	4.725	4.919
1301	-	35.423	44.153	3003	4.280	8.616	7.264	5005	3.190	2.554	2.541
1302	12.390	14.067	18.432	3004	8.920	12.689	9.372	5006	-	4.194	4.924
1303	-	14.495	13.775	3005	6.230	11.665	7.797	5007	-	2.451	2.900
2001	17.670	31.935	23.759	3006	-	1.866	1.238	5008	-	0.896	0.989
2002	12.330	29.632	21.144	3007	8.530	11.878	9.214	5101	4.460	6.007	4.657
2003	13.770	13.200	11.608	3008	-	13.720	12.488	5201	-	3.326	4.077
2004	20.690	39.983	25.966	3009	16.750	13.840	11.671	5202	-	9.477	9.829
2005	22.390	29.702	22.603	3010	3.630	2.843	2.726	5301	-	7.175	7.267
2006	3.200	7.442	5.119	3011	44.430	46.929	42.822	5302	-	12.172	12.534
2007	-	2.797	2.035	3012	46.780	36.445	29.987	5303	-	2.855	3.613
2008	5.850	12.517	8.580	3013	-	12.837	10.917				

역을 대상으로 Thiessen 면적강수량과 레이더 강수량을 활용하여 산정한 유출량의 연평균유출량 특성을 분석한 결과이다. 전반적으로 레이더 강수량을 활용하여 산정된 유출량이 Thiessen 면적강수량에 비하여 유출량에 크게 산정되는 현상이 나타나는 것을 확인하였다. 이는 레이더 강수량을 활용하는 것은 유역에 발생하는 강수의 공간적 분포를 지상 관측소에 비하여 효과적으로 유지하는 원인으로 사료된다. 추가적으로 댐 및 다기능보 등과 같은 수리구조물에 의해 통제가 발생되는 유역과 용수이용량이 높은 유역에서는 자연유량과의 차이를 확인하였다. 자연유량과 강우-유출모형으로 추정된 유량의 차이를 감소시키기 위하여 자연유량의 품질관리, 강우-유출모형 매개변수 검정 및 보정을 위한 유역 확대와 더불어 매개변수 추정의 정확도를 높이는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 7은 논문의 지면관계상 각 권역의 유역을 추출하여 일단위 수문곡선과 산점도를 도시한 결과이다. 전반적으로 Thiessen 면적강수량에 의하여 발생하는 유출특성 및 홍수사상을 유사하게 재현하는 것을 확인하였다. 향후 레이더 강수량의 편의보정과 강우-유출모형의 매개변수 추정과정에서 확률분포를 도입한 시나리오 형태의 강수정보를 생산한다면 강우조건과 강우-유출모형의 불확실성을 정량적으로 고려할 수 있는 수문시나리오 생산이 가능할 것으로 사료된다.

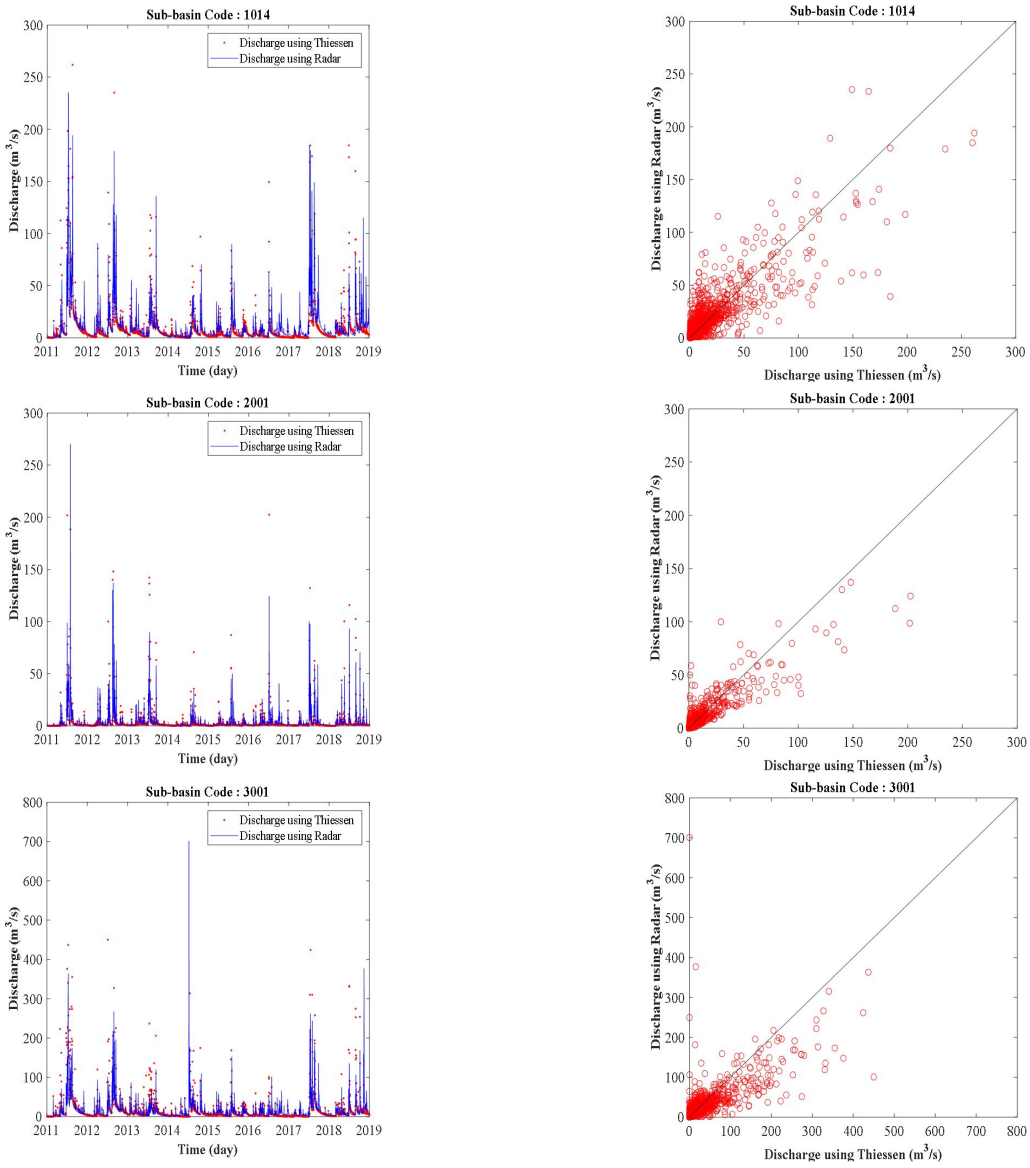

Fig. 7. Hydrographs and scatter plot of discharge using Thiessen and radar rainfall

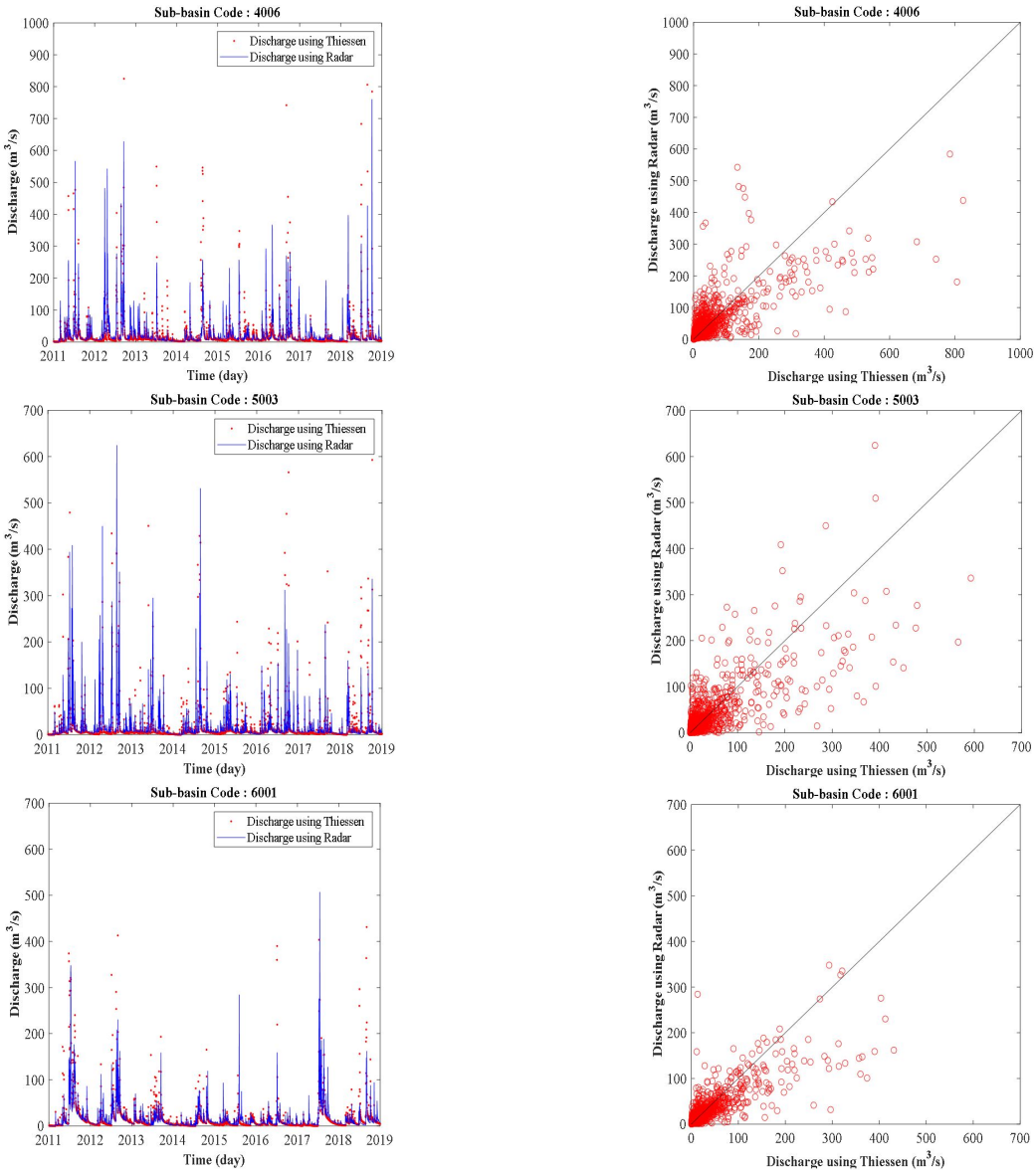

Fig. 7. Hydrographs and scatter plot of discharge using Thiessen and radar rainfall (Continue)

5. 결 론

유출해석은 하천의 효율적인 관리 및 국토개발계획에 필수적으로 요구되는 수자원 정보로 유출해석의 성패를 좌우하는 것은 정확한 강수자료의 확보이다. 현재까지 수행되고 있는 수리 및 수문학적 해석에서 지점 강수량의 의존도는 매우 높은 실정이지만 지점 강수량만으로 유출해석을 하는 경우 관측소 공백지역의 강수를 현실적으로 고려하는데 문제점이 있다. 유출해석을 위하여 유역면적을 고려한 면적강수량을 산정하기 위하여 널리 사용되고 있는 Thiessen 면적강수량은 우리나라와 같이 지형학적으로 산악지형이 존재하는 경우에서 고정된 가중치를 기반으로 면적평균 강수량을 산정하기 때문에 강수장의 이동특성을 효과적으로 반영하지 못하는 제약이 있다.

정리하면, 효율적인 수자원 관리를 위하여 필수적으로 수행되는 유출량 분석은 정확한 면적 강수량 산정이 선행되어야 한다. 면적 강수량 산정을 위하여 사용되고 있는 기존의 방법론은 지상 관측소의 의존도가 매우 높았다. 이러한 점에서 지상관측소의 결측을 포함하여 시공간적인 불균형성으로 인해 강수자료의 연속성을 확보하는데 제약이 있다. 반면에, 레이

더 강수량은 관측반경에서 시공간적으로 연속적인 강수량 자료를 확보할 수 있으며 강수의 발달 및 이동 등과 같은 강수의 변동성을 파악하는데 유리하다. 분포형 강우-유출 모형과 실시간 홍수예보 등과 같이 고도화되는 수문모형을 뒷받침하기 위하여 첨단 기상관측 장비인 기상레이더로 관측된 강수량의 활용은 신뢰도를 확보한 해석결과를 제시하고 지상 관측소의 제약사항을 상당부분 개선할 수 있을 것으로 사료된다.

기존 수문학 분야에서 레이더 강수량의 활용은 지상 관측소 위치의 레이더 강수량을 격자형태의 레이더 자료에서 추출하여 활용하였다. 이러한 접근은 'Ground True' 개념으로 레이더 강수량 보정 및 매개변수 산정을 위한 방법론으로 활용되었다. 본 연구에서는 강수의 공간분포를 파악할 수 있는 레이더 강수량 활용성을 극대화하고자 'Ground True' 개념을 연계하여 레이더 강수량을 활용한 장기 유출량 평가를 수행하였으며 본 연구를 통하여 도출한 결론은 다음과 같다.

1) 'Ground True' 개념으로 기상레이더 자료를 활용한 수문학적 연구는 대부분 정량적 강수량 예측 및 추정의 관점에서 수행되었다. 본 연구에서는 강수의 공간적 특성을 현실성 있게 반영할 수 있도록 격자형태의 기상레이더 자료에서 강수량을 직접 추출하였다. 추출된 레이더 강수량은 지상 강수량과 높은 상관성을 확보하고 있다. 따라서 레이더 강수량을 활용하여 강수의 공간적 특성을 반영한 공간적 가뭄전이 해석 및 수자원 변동성 평가에 활용하는 경우 지점 강수량에 비하여 공간적 변동성을 효과적으로 고려할 수 있을 것으로 판단된다.
2) 유역의 지리정보와 레이더 격자정보를 중첩하여 유역별로 레이더 강수량을 추출하였다. 장기 유출모형을 통하여 레이더 강수량을 활용한 유출특성 평가결과는 기존 Thiessen 면적강수량을 활용한 유출특성을 효과적으로 재현하는 것을 확인하였다. 홍수예보 관점에서 유역별로 산정된 레이더 강수량 보정계수를 적용하여 단기 유출모형 및 분포형 유출모형과 연계한다면 시공간적으로 변동하는 강수장의 특성을 반영한 홍수예보가 가능할 것으로 판단된다.
3) 10년 미만의 레이더 강수량 자료를 활용하여 유출분석을 수행하였다. 최근 레이더 관측주기 단축과 산출물 제공이 과거에 비하여 용이해지고 있으며 수자원, 농업, 해양 및 방재 등의 응용분야에서 레이더 자료가 광범위하게 사용될 수 있는 관점에서 레이더 강수량을 장기적으로 구축하여 고해상도 강수자료를 활용한 분포형 유출해석 및 수리해석을 수행한다면 고도화된 유역단위 수자원해석 정확도 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 추가적으로 레이더 강수량뿐만 아니라 TRMM 및 GPM 등과 같은 다양한 강수정보를 합성하여 각각의 강수정보의 특성을 반영한 응용연구가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 지원(과제번호 20AWMP-B121100-05)으로 수행되었습니다.

References

Beven, K.J., Kirkby, M.J., Schofield, N., and Tagg, A.F. (1984). "Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three UK catchments." *Journal of Hydrology*, Vol. 69, No. 1-4, pp. 119-143.

Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle Jr, J.L., Jobes, T.H., and Donigian Jr, A.S. (1997). "Hydrological simulation program-FORTRAN." User's manual for version 11.

Borga, M. (2002). "Accuracy of radar rainfall estimates for streamflow simulation." *Journal of Hydrology*, Vol. 267, No. 1-2, pp. 26-39.

Cherkauer, D.S. (2004). "Quantifying ground water recharge at multiple scales using PRMS and GIS." *Ground Water*, Vol. 42, No. 1, pp. 97-110.

Ghafouri-Azar, M., and Bae, D.H. (2019). "Analyzing the variability in low-flow projections under GCM CMIP5 scenarios." *Water Resources Management*, Vol. 33, No. 15, pp. 5035-5050.

Han, J.H., Ryu, T.S., Lim, K.J., and Jung, Y.H. (2016). "A review of baseflow analysis techniques of watershed-scale runoff models." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 58, No. 4, pp. 75-83.

Hasan, M.M., Sharma, A., Mariethoz, G., Johnson, F., and Seed, A. (2016). "Improving radar rainfall estimation by merging point rainfall measurements within a model combination framework." *Advances in Water Resources*, Vol. 97, pp. 205-218.

Jung, I.W., and Bae, D.H. (2005). "A study in PRMS applicability for Korean river basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 9, pp. 20-27.

Kang, N.R., Joo, H.J., Lee, M.J., and Kim, H.S. (2017). "Generation of radar rainfall ensemble using probabilistic approach." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 3, pp. 155-167.

Kim, B.S., Kim, H.S., and Yang, D.M. (2010). "Comparison of spatial distributions of rainfall derived from rain gages and a radar." *Journal of Wetlands*, Vol. 12, No. 1, pp. 63-73.

Kim, J.P., and Kim, G.S. (2011). "The impact of climate change on the trends of precipitation effectiveness ratio and runoff data in South Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*,

Vol. 44, No. 8, pp. 683-694.

Kim, S.H., Nam, W.S., and Bae, D.H. (2019). "An analysis of effects of seasonal weather forecasting on dam reservoir inflow prediction." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 7, pp. 451-461.

Kim, S.J., Kim, S.J., and Chae, H.S. (2000). "Application of grid-based kinematic wave storm runoff model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 33, No. S1, pp. 20-27.

Kim, T.J., Kwon, H.H., and Lima, C. (2018). "A Bayesian partial pooling approach to mean field bias correction of weather radar rainfall estimates: Application to Osungsan weather radar in South Korea." *Journal of Hydrology*, Vol. 565, pp. 14-26.

Kim, T.J., Lee, D.R., and Kwon, H.H. (2017). "Assessment of merging weather radar precipitation data and ground precipitation data according to various interpolation method." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 12, pp. 849-862.

Kim, T.J., So, B.J., Ryou, M.S., and Kwon, H.H. (2016). "Development of dam inflow simulation technique coupled with rainfall simulation and rainfall-runoff model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 4, pp. 315-325.

Kwon, H.H., Sivakumar, B., Moon, Y.I., and Kim, B.S. (2011). "Assessment of change in design flood frequency under climate change using a multivariate downscaling model and a precipitation-runoff model." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 25, No. 4, pp. 567-581.

Leavesley, G.H. (1984). "Precipitation-runoff modeling system: User's manual." *US Department of the Interior*, Vol. 83, No. 4238.

Marshall, J.S., and Palmer, W. Mc K. (1948). "The distribution of raindrops with size." *Journal of Meteorology*, Vol. 5, pp. 165-166.

Na, U.Y., Cho, E.S., Lee, J.W., and Yoo, C.S. (2017). "Mean-field-bias correction of the rainfall forecasts using backward storm tracking." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 17, No. 1, pp. 253-263.

Rui, X.P., Qu, X.K., Yu, X.T., Lei, Q.L., and Fan, Y.L. (2019). "Quantitative rainfall estimation using weather radar based on the improved kalman filter method." *Applied Ecology and Environmental Research*, Vol. 17, No. 1, pp. 369-381.

Rosenbrock, H. (1960). "An automatic method for finding the greatest or least value of a function." *The Computer Journal*, Vol. 3, No. 3, pp. 175-184.

Smith, J.A., Baeck, M.L., Villarini, G., Welty, C., Miller, A.J., and Krajewski, W.F. (2012). "Analyses of a long-term, high-resolution radar rainfall data set for the Baltimore metropolitan region." *Water Resources Research*, Vol. 48, No. 4.

Yoon, Y.N, Kim, J.H., Yoo, C.S., and Kim, S.D. (2002). "A runoff parameter estimation using spatially distributed rainfall and an analysis of the effect of rainfall errors on runoff computation." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 35, No. 2, pp. 1-12.