미계측 유역의 유출모의를 위한 RAR 자료의 적용성 평가 연구

Assessment of Radar AWS Rainrate for Streamflow Simulation on Ungauged Basin

이 병 주* / 고 혜 영** / 장 기 호*** / 최 영 진****

Lee, Byong Ju / Ko, Hye Young / Chang, Ki Ho / Choi, Young Jean

Abstract

The objective of this study is to assess the availability of streamflow simulation using Radar-AWS Rain rate (RAR) data which is produced by KMA on real-time. Chuncheon dam upstream basin is selected as study area and total area is 4859.73 km². Mean Areal Precipitation (MAP) using AWS and RAR are calculated on 5 subbasin. The correlationship of hourly MAPs between AWS and RAR is weak on ungauged subbasins but that is relatively high on gauged ones. We evaluated the simulated discharge using the MAPs derived from two data types during flood season from 2006 to 2009. The simulated discharges using AWS on Chuncheon dam (gauged basin) are well fitted with measured ones. In some cases, however, discharges using AWS on Hwacheon dam and Pyeonghwa dam with some ungauged subbasins are overestimated on the other hand, ones using RAR in the same case are well fitted with measured ones. The hourly RAR data is useful for the real-time river forecast on the ungauged basin in view of the results.

Keywords : Radar-AWS Rain rate, streamflow simulation, mean areal precipitation, ungauged basin

요 지

본 연구는 기상청에서 실시간으로 생산하고 있는 레이더-AWS 강우강도 (RAR) 자료의 유출모의 적용성을 평가하고자 하는데 그 목적이 있다. 춘천댐 상류유역 (4859.73 km²)을 대상유역으로 선정하고 5개 소유역에 대한 시단위 AWS와 RAR 유역평균강우량을 산정하였다. 미계측 유역에서는 AWS와 RAR의 상관성이 낮고 계측유역에서는 높은 것으로 나타났다. 시단위 AWS와 RAR 유역평균강우량은 강우분포형태에 따라 차이가 크게 발생하는 것으로 나타났다. 두 자료의 유역평균 강우량을 이용하여 2006~2009년의 홍수기간에 대해 모의유량을 평가하였다. 계측유역에 해당하는 춘천댐에서는 RAR 모의유량이 AWS 결과에 비해 정확도가 낮게 나타나나 미계측유역이 존재하는 화천댐과 평화의댐에서 AWS 모의유량이 과대추정되는 경우에 한해서 RAR 모의유량은 정확하게 모의하는 것으로 나타났다. 따라서 시단위 RAR 자료는 미계측 유역의 실시간 유량예측을 위한 강우자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

* 교신저자, 선임연구원, 국립기상연구소 응용기상연구과 수문자원연구팀 (e-mail: bjlee0704@korea.kr)

Corresponding Author, Senior Researcher, Hydrometeorological Resources Research Team, Applied Meteorology Research Division, National Institute of meteorological Research, Seoul 156-720, Korea

** 연구원, 국립기상연구소 응용기상연구과 수문자원연구팀 (e-mail: kkoyang@korea.kr)

Researcher, Hydrometeorological Resources Research Team, Applied Meteorology Research Division, National Institute of meteorological Research, Seoul 156-720, Korea

*** 팀장, 국립기상연구소 응용기상연구과 수문자원연구팀 (e-mail: khchang@korea.kr)

Chief, Hydrometeorological Resources Research Team, Applied Meteorology Research Division, National Institute of meteorological Research, Seoul 156-720, Korea

**** 과장, 국립기상연구소 응용기상연구과 (e-mail: yjchoikma@korea.kr)

Manager, Applied Meteorology Research Division, National Institute of meteorological Research, Seoul 156-720, Korea

1. 서론

한반도는 지리적으로 중위도에 위치하면서 대륙성 기후와 해양성 기후를 접하는 반도로서 남북으로 가로지르는 태백산맥과 동서로 가로지르는 소백산맥 등 급격한 지형의 변화에 의하여 일기의 변화가 매우 심하게 나타난다. 이러한 이유로 현재 설치되어 있는 자동기상관측소 (Automatic Weather Station: AWS) 관측망으로는 단시간에 발생하는 집중호우 및 소나기성 강우에 대한 정확한 감시 및 예측이 어렵다. 따라서 단시간에 발달하는 강우 시스템에 대한 관측과 예측을 위해 고분해능을 가진 정량적 강우강도 자료가 요구되고 있는 실정이다 (석미경 등, 2005).

고분해능의 지상강우강도 자료를 추정하기 위한 방법으로 강수와 구름입자를 관측하는 기상레이더의 반사도 자료로부터 강우강도를 추정하는 방법이 널리 이용되고 있다. 이러한 방법 중 하나로 국립기상연구소 (2006)에서는 관측 레이더 반사도와 AWS 강우자료를 이용한 레이더-AWS 강우강도 (Radar-AWS Rain rate: RAR) 산출시스템을 개발하여 운영하고 있으며 DMZ (demilitarized zone)과 인접한 북한 일부지역과 남한 전지역에 대해 시간해상도 10분, 공간해상도 1km의 격자 강우자료를 실시간으로 생산하고 있다.

홍수기에 하천 및 댐의 안정적인 관리를 위해서는 높은 정확도의 예측강우가 필요하나 지금까지 예측강우의 불확실성으로 인해 실제 홍수관리에는 상류유역의 관측유량 및 관측강우정보에 크게 의존하고 있는 실정이다. 특히 북한강유역은 수도권 상류에 위치한 지역으로 수도권의 안정적인 수자원 관리를 위한 중요한 지역이라 할 수 있다. 그러므로 지상관측소를 고밀도로 설치하여 홍수관리에 활용하는 것이 최선이나 경제성 문제와 함께 임진강과 북한강 상류유역과 같은 남북한 공유하천은 유역의 상당부분이 북한지역에 편입되어 있어 지상관측소를 설치하지 못하는 실정이다. 따라서 이러한 지역에 대한 효율적인 홍수관리를 위해서는 레이더 강우와 같이 원격탐사 형태의 강우자료를 활용한 하천유량모의 방안이 필요하다.

홍수유출모의를 위한 레이더강우의 활용과 관련한 국내 연구로 김진훈 등 (2005)는 관악산레이더로부터 생산한 강우를 소양강댐 유역의 유출모의에 적용하였으며, 박진혁 등 (2007)은 진도레이더로부터 레이더강우를 생성하여 남강댐 유역에 대해 유출모의를 수행하였다. 또한 김

병식 등 (2010) 등은 광덕산 레이더로부터 내린천 유역에 대한 강우자료를 생산하여 유출모의를 수행하였으며 박진혁과 허영택 (2009)은 유역의 2/3가 북한지역에 편입되어 있는 임진강 유역을 대상으로 강화레이더와 유출모형을 연계하여 미계측유역의 홍수관리를 위한 레이더 강우의 활용성을 제시한 바 있다. 국외 연구사례로 Sun et al. (2000)과 Cole and Moore (2008)는 우량관측소와 레이더의 조합된 강우를 이용하여 홍수모의 적용성을 평가하였으며 Giannoni et al. (2003)은 레이더 강우와 분포형 강우-유출모형을 결합하여 극한홍수에 대한 분석과 감시에 대한 적용성을 평가하였다.

극한 호우가 발생하는 실제 상황에서 댐의 수문조작을 할 경우 현재까지의 실시간 관측수문정보의 정확도가 매우 중요하며 사후 편차보정 (bias adjustment)을 통한 강우의 정확도 개선결과를 실시간 유량예측에 반영하기는 어려운 실정이다. 본 연구에서는 현재 기상청에서 실시간으로 생산하고 있는 RAR과 AWS 자료로부터 유역평균강우량을 산정하여 적용성을 평가하고 평화댐 상류의 북한지역을 포함한 춘천댐 상류유역에 유출모형을 적용하여 홍수모의의 가능성을 평가하고자 한다.

2. RAR 산정 알고리즘

레이더 반사도 자료를 강우강도로 변환할 때는 일반적으로 Eq. (1) 형태의 Z-R 관계식을 사용한다. 기상청에서는 Marshall and Palmer (1948)가 제안한 $Z=200R^{1.6}$ 의 관계식 (이하 M-P식)을 사용하고 있으며, Eq. (1)에서 Z는 레이더 반사도 (mm^6/m^3)이며 R은 강우강도 (mm/h)를 의미한다.

$$Z = aR^b \quad (1)$$

M-P 식을 사용하는 경우에는 M-P 식이 층운형 강수에 대해 적용되는 식이므로 대류형 강수에서는 과소추정되는 문제가 있기 때문에 국립기상연구소 (2006)는 RAR 산출 알고리즘을 개발하였으며, 2009년까지 개선연구를 수행하였고 (국립기상연구소, 2009), 현재 기상청에서 현업운영되고 있다. RAR 산정 알고리즘은 Rosenfeld et al. (1993)이 제안한 WPMM (window probability matching method) 방법을 기반으로 한다. WPMM 방법은 레이더 관측반경 내에서 우량계 강우강도 자료와 반사도 자료가 시-공간적으로 일치하는 강우지점에 대해서 각 자료의 확률밀도함수의 적분값이 같다는 가정으로부터 Z-R 관계

식을 추정하는 방법이다. 레이더 관측반경 내에서 관측된 레이더 반사도와 우량계 강우강도의 관계는 Eq. (2)와 같이 무조건 확률밀도함수 (P_u)를 이용하여 표현할 수 있다 (Calheiros and Zawadzki, 1987). 식에서 P_u 는 무조건 확률함수이고 Z 와 R 은 각각 레이더 반사도와 우량계 강우강도를 의미한다. 또한 dZ 와 dR 은 각각 시간별 반사도와 강우강도의 증가분이다. 실제로 지상에서 관측되는 강우량은 관측할 수 있는 최소 분해능 (R_c)을 가지고 레이더 반사도 자료는 강우량계의 최소분해능에 대응되는 반사도의 임계값 (Z_c)을 가지게 된다. 이들 값을 Eq. (2)에 적용하면 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다 (Atlas et al., 1990). 조건부 확률 P_c 는 Eqs. (4) and (5)로부터 구해지며 $f(Z)$ 는 레이더 반사도를 강우강도로 환산하는 함수인 Z-R 관계식이다. 현재 기상청에서 적용하고 있는 WPMM 방법에서 강우강도 임계값 (R_c)은 전도형 우량계의 특성을 고려하여 0.1 mm/h로 설정하였으며 이에 대응되는 레이더 반사도 임계값은 10 dBZ로 설정하였다 (석기영 등, 2005).

$$\int_0^{\infty} P_u(Z)dZ = \int_0^{\infty} P_u(R)dR \quad (2)$$

$$\int_0^{\infty} f(Z)P_c(Z)dZ = \int_0^{\infty} RP_c(R)dR \quad (3)$$

$$P_c(R) \equiv P(R|R > R_c) \quad (4)$$

$$P_c(Z) \equiv P(Z|Z > Z_c) \quad (5)$$

RAR 산정 알고리즘에서 Z-R 관계식의 계수 a 와 b 는 현재시간에서 한 시간 이전까지 레이더 유효반경 내에서 레이더 반사도와 우량계 강우강도의 쌍 (이하 dBZ-R쌍)을 추출하고, 이에 대해 최소자승적합방법 (least square fit of power law)을 적용함으로써 추정한다. 각 레이더의 유효반경은 구덕산 (PSN)의 120 km를 제외하고는 모두 100 km로 설정되어 있다. Z-R 관계식의 계수 a 와 b 는 이중분할적합방법을 이용하여 각 레이더별로 2개씩 산출되며, 마지막으로 Eq. (6)의 편차보정인자를 이용하여 보정을 수행한다. 식에서 N 은 레이더 반경 내에서 강우가 관측된 우량계의 수, G_i 는 우량계 강우강도 (mm/h), R_i 는 레이더 강우강도 (mm/h)이다.

$$BF = \frac{\sum_{i=1}^N G_i}{\sum_{i=1}^N R_i} \quad (6)$$

이러한 과정을 통해 추정된 각 레이더 관측소의 강우강

Fig. 1. Maximum (solid line) and Threshold (dashed line) Range of the Radar Sites

은 합성과정을 통해 한반도 전체에 대한 강우강도로 만들어진다. 합성 시에 중첩영역에 대해서는 평균값을 사용하며, 합성강우강의 수평분해능은 $1 \times 1 \text{ km}^2$ 이고, 901×1051 개의 격자점으로 구성된다. 우량관측소는 전국의 AWS 642개소 (2009년 기준)가 이용되고 있다.

기상청에서 운영 중인 레이더 관측소의 위치는 Fig. 1과 같으며 각 관측소의 제원은 Table 1과 같다. 11개 관측소 중 S밴드 7개소, C밴드 4개소이며 레이더 최대반경은 인천 공항이 130 km로 가장 작으며 이외의 관측소는 240~256 km의 반경을 가지고 있다. Fig. 1에서 실선과 점선은 각 관측소별 최대반경과 유효반경을 의미한다. 관측소 중 동해 (DNH) 관측소는 2010년 4월을 끝으로 운영이 종료되었으며 이외의 10개 관측소는 2011년 현재 운영이 되고 있다.

3. 대상유역 및 자료구축

우리나라에는 남북한 공유하천으로 임진강과 북한강 상류유역 (평화의댐 상류)이 있으며 북한에 편입된 유역 내에는 지상기상관측소를 설치하지 못하므로 인해 홍수에 대한 예방 및 대응에 한계를 가지고 있다. 특히 북한강 상류유역은 한강 전체유역의 수자원 관리를 위한 댐 연계 운영과 밀접한 관련이 있기 때문에 북한지역에 대한 수문 기상정보의 파악은 한강수계의 안정적 물 관리를 위해서도 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 지상관측소가 제한적인 지역에 대해서 유출모의를 위한 RAR 자료의 적용성을 평가하기 위해 춘천댐 상류유역을 대상유역으

Table 1. Characteristics of the Radar Sites used for RAR Estimation

Site name	Band type	Longitude (degree)	Latitude (degree)	Altitude (EL.m)	Max. range (km)	Thresh. range (km)
Gwangdeoksan (GDK)	S	127.43361	38.11737	1,064	240	100
Baengnyeongdo (BRI)	C	124.63031	37.96755	187	256	-
Donghae (DNH)	C	129.12382	37.50701	59	240	-
Incheon (IIA)	C	126.36578	37.46066	146	130	100
Gwanaksan (KWK)	S	126.96399	37.44412	641	240	100
Gunsan (KSN)	S	126.78399	36.01269	234	240	100
Myeonbongsan (MYN)	C	128.99731	36.17942	1,122	200	100
Gudeoksan (PSN)	S	128.99974	35.11869	549	240	120
Jindo (JND)	S	126.32397	34.47250	500	240	100
Seongsan (SSP)	S	126.88000	33.38713	72	250	100
Gosan (GSN)	S	126.16307	33.29433	103	250	100

Fig. 2. Study Area

로 선정하였다. 춘천댐 자기유역은 모두 DMZ 이남지역에 편입되어 있고 상대적으로 우량관측소가 다수 존재하고 있으나 상류 미계측지역과의 비교를 위해 대상유역에 포함시켰다. 대상유역의 위치, 기상청 AWS 관측소 위치, 댐 위치, 소유역 분할 현황은 Fig. 2와 같다. 춘천댐 상류 유역에는 화천댐, 평화의댐, 임남댐이 위치하고 있으며 화천댐 상류, 평화의댐 중상류, 임남댐 대부분의 지역이 DMZ 이북지역에 편입되어 있다. 소유역은 댐 위치 및 하천형태를 고려하여 5개로 분할하였으며 대상유역 전체면적은 4,859.73 km²이며 소유역별 유역면적은 Table 2와

Table 2. Area on Each Subbasin

Subbasin No.	Area (1) (km ²)	Area in NK (2) (km ²)	Ratio (2)/(1)
1	2,384.69	2,379.00	0.99
2	836.50	591.36	0.71
3	103.95	0.00	0.00
4	759.70	117.69	0.15
5	774.89	0.00	0.00
Total	4,859.73	3,088.05	0.64

같다. 델타 이북지역 편입면적을 분석한 결과 입남델 (1)의 90%, 평화의델 자기유역 (2)의 71%, 화천델 자기유역 (4)의 15%가 편입되는 것으로 분석되었다. 여기서 자기유역은 상류에 소유역이 분할되어 있는 경우 이를 제외한 델 지점이 위치해 있는 단일 소유역을 의미한다.

유출모의를 위한 시간위 강수, 기온, 상대습도, 풍속, 일조자료는 기상청으로부터, 델 수문정보는 국가수자원관리종합정보시스템과 한국수력원자력(주)으로부터 수집하였다. 또한 수치표고모델과 토지피복도는 국가수자원관리종합시스템, 경밀도양도는 국립농업과학원으로부터 각각 구축하였다. 북한 미계측 유역에 대한 토지피복과 토양속성정보는 전체유역 평균값을 적용하였다.

4. AWS-RAR 강우량 분석

4.1 시간위 유역평균강우량

통상 집중형 유출모형을 이용하여 유출해석을 수행하기 위해서는 지점 강우량을 유역평균강우량으로 변환해야 한다. 유역평균강우량은 산술평균법, 티센법 (Thiessen) 등의 면적가중법이나 크리깅 (Kriging), 역거리법 등의 보간법 등을 이용하여 산정할 수 있다. 국내에서는 유출모의를 위한 유역평균강우량 산정방법으로 티센법을 가장 보편적으로 사용하고 있으므로 본 연구에서도 티센법을 이용하여 유역평균강우량을 산정하였다.

대상유역에 영향을 미치는 AWS 관측소는 13개소이며 티센망 구축현황은 Fig. 3과 같다. 1번 소유역은 유역면적이 2384.68 km²의 넓은 지역임에도 불구하고 유역내 우량

관측소가 존재하지 않으며 2번 소유역에는 하류 유역경계에 3개 관측소가 관측되어 있음을 확인할 수 있다. 이러한 조건에서 AWS 관측소로부터 유역평균강우량을 산정하거나 이로부터 유출모의를 수행할 경우 상당히 왜곡된 결과를 도출할 가능성이 높다고 하겠다.

RAR 강우량 산정에 이용된 레이더 관측소 중 광덕산 (GDK), 관악산 (KWK) 관측소는 레이더 유효반경이 대상유역을 완전히 포함하며 인천공항 (IIA)과 군산 (KSN) 관측소는 하류지역 일부를 포함하는 것으로 나타났다

Fig. 3. Thiessen Network

Fig. 4. Scatter Plots of Hourly Rainfall Acquired from AWS and RAR on Each Subbasin during 2006~2010

(Fig. 1). 두 개 이상의 레이더 강우값이 중첩된 경우의 레이더 강우량은 평균값을 적용하였으며 유역평균강우량은 각 소유역 내의 격자별 강우량을 평균하여 산정하였다.

AWS와 RAR 두 자료에 대한 강우량을 비교하기 위해 2006~2010년 동안 자료를 구축하였으며 시간위 유역평균강우량을 산정하였다. Fig. 4는 두 자료간 소유역별 시간위 유역평균강우량 대응점을 도시한 것이며 X축은 AWS, Y축은 RAR 강우량을 나타낸다. 모든 소유역에서 추세선이 대각선을 기준으로 아래부분에 위치하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 RAR 강우량이 AWS에 비해 과소하게 추정됨을 의미한다. 또한 1번과 2번 소유역과 같이 유역이 DMZ 이북지역에 편입되는 비율이 큰 유역일수록 결정계수(R^2)가 0.33과 0.38로 나타나 두 자료간 상관성이 낮고 반대인 경우는 결정계수가 0.5 이상으로 상대적으로 높은 상관성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 넓은 미계측유역을 갖는 소유역일수록 제한된 우량관측소 자료만을 이용하여 유역평균강우량을 산정한 경우 오차가 크게 발생함을 의미한다. 일반적으로 지점강우는 해당 지점의 강우 참값과 가깝고 강우의 공간분포에서는 레이더 자료가 참값에 가깝다고 할 수 있다 (Krajewski, 1987; Sinclair and Pegram, 2005; 김병식 등 2007). 따라서 유역평균강우량 산정에 이용되는 관측소가 공간적으로 균일하지 못하거나 관측밀도가 낮은 경우 이로부터 산출된 유역평균강우량은 강우의 시간분포와 강도에서 모두 잘못된 결과를 초래할 수 있다. 이러한 지역의 강우자료 구축을 위해서는 RAR 강우와 같이 레이더 자료를 기반으로 한 강우가 필요할 것이라 판단된다.

4.2 주요 호우별 유역평균강우량 분석

강우의 공간적 분포에 따라 RAR과 AWS로부터 산정된 유역평균강우량의 차이를 분석하기 위해 2006~2010년 동안 매년 시간단위 강우가 많이 발생한 시간에 대한 강우자료를 분석하였다. 분석시점에 대한 정보와 해당시간의 RAR과 AWS의 유역평균강우량은 Table 3과 같으며 RAR 강우의 공간분포와 두 방법에 대한 유역평균강우량은 Fig. 5와 같다. 그림에서 'RAR dis.'는 1km 해상도의 RAR 강우분포, 'MAP RAR'와 'MAP AWS'는 각각 RAR과 AWS 강우로부터 산정된 소유역별 유역평균강우량을 의미한다.

Fig. 5(a)는 장마전선의 영향에 의해 강우가 발생한 사례로 RAR 분포도에서 1번과 2번 유역은 약한 강우를 보이고 4번과 5번 유역은 강한 강우가 발생함을 확인할 수 있다. 1~3번 유역의 RAR 유역평균강우량은 10mm 미만으로 RAR 분포결과와 유사하게 산정되나 AWS 유역평균강우량 결과에서는 1~3번 유역의 유역평균강우량이

21.7mm, 42.1mm, 41.7mm로 매우 높게 산정됨을 확인할 수 있다. 이는 티센망 (Fig. 3)을 이용한 유역평균강우량 산정 시 1~3번 유역에 지배적인 영향을 미치는 322 (50.5mm), 680 (54.5mm), 681 (41.0mm), 682 (15.0mm)번 우량관측소의 관측강우량의 영향이라 할 수 있다. Fig. 5(b)는 저기압의 영향으로 중부지방에 많은 비가 내린 사례로서 RAR 유역평균강우량은 모든 소유역에서 10mm 이하로 나타나나 AWS의 경우는 3번과 4번 유역에서 각각 24.3mm와 16.3mm의 강우가 산정되었다. Fig. 5(c)는 장마전선의 영향으로 내린 강우로 RAR 유역평균강우량은 5번 유역에만 10mm 이상의 강한 강우가 내린 반면, AWS의 경우는 1번 유역을 제외한 모든 유역에서 10mm 이상의 강우가 산정되었다. Fig. 5(d)는 열대성압부 (Tropical Depression; TD)의 영향으로 발생한 강우이며 RAR의 경우는 전 유역에 대해서 10~20mm 이내의 유역평균강우량이 산정된 반면에 AWS의 경우는 각 유역별로 40mm 이내의 유역평균강우량이 산정되었음을 확인할 수 있다. 특히 1번 유역의 경우 RAR는 10.9mm인 반면에 AWS는 682 (34.5mm)번 관측소의 영향으로 30.4mm로 산정되어 3배 가까이 유역평균강우량이 증가한 것으로 나타났다. 마지막으로 Fig. 5(e)는 한랭전선의 영향으로 형성된 밴드형태의 강우시스템에 의해 내린 강우 사례이다. 이 사례에서 RAR의 경우 3번과 4번 유역의 유역평균강우량은 0.0mm인데 비해 AWS는 각각 14.0mm와 4.8mm의 강우가 산정되었다. 1번 유역의 경우 322번과 680번 우량관측소의 강우가 각각 27.0mm와 15.5mm로 관측되어 RAR과 AWS 유역평균강우량이 유사하게 산정되었으나 RAR 분포에서와 같은 강우분포 상황에서 높은 티센계수를 갖는 우량관측소의 강우가 0.0mm로 관측될 경우는 상당한 오차를 가질 수 있을 것으로 판단된다.

이상의 분석으로부터 우량관측소 밀도가 낮은 경우는 관측소별 면적 가중치가 커짐으로 인해 관측소에 국지성 집중호우가 내리거나 반대로 국지적으로 무강우가 영향을 줄 경우 AWS 유역평균강우량은 상당한 오차를 가질 수 있음을 확인하였다. RAR는 1km의 공간해상도를 가지므로 인해 강우의 공간분포를 상대적으로 잘 고려할 수 있으나 약정한 측면에서 정확도를 높이는 연구가 필요하다. 이를 위해 현재 레이더별 유효반경 이내의 우량관측소 강우자료로부터 일괄적으로 편차보정을 수행하기보다 우량관측소가 존재하는 소유역에 대해서는 소유역별 편차보정을 수행하고 미계측 지역에 대해서는 기존의 방법과 같이 유효반경 내 관측소를 이용하거나 인접 관측소를 이용하여 선택적 편차보정을 수행하여 RAR 강우를 산출하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

Fig. 5. RAR Distribution (RAR dis.) and MAPs from RAR (MAP RAR) and AWS (MAP AWS) on 5 Subbasins during the Specified One Hour during 2006~2010

Table 3. Mean Areal Precipitation Estimated by RAR and AWS on 5 Subbasins

	Data time (yyyy.mm.dd.hh)	RAR (mm/h)						AWS (mm/h)					
		S01	S02	S03	S04	S05	Total	S01	S02	S03	S04	S05	Total
a	2006.07.15.09	8.1	6.6	9.0	18.4	18.3	11.1	21.7	42.1	41.7	29.1	19.8	26.5
b	2007.08.08.10	5.1	9.4	8.8	9.7	10.0	7.4	10.3	6.4	24.3	16.3	6.3	10.2
c	2008.07.24.16	4.6	6.0	3.8	4.5	11.0	5.8	9.8	14.5	10.6	11.6	18.3	12.3
d	2009.08.12.04	10.9	17.9	14.6	13.8	12.1	12.8	30.4	24.7	29.3	20.3	17.9	25.8
e	2010.08.29.13	14.4	22.4	0.0	0.0	25.0	14.9	12.6	22.4	14.0	4.8	24.5	15.0

5. 유량분석

RAR과 AWS 자료를 이용하여 유출모의를 수행할 경우 관측유량과의 오차 및 두 자료에 의한 유량 차이를 분석하였다. 임남댐, 평화댐, 화천댐, 춘천댐을 평가지점으로 선정하였으며 2006.07.08~2006.07.22 (15일), 2007.08.01~2007.08.15 (15일), 2008.07.18~2008.07.27 (10일), 2009.07.08~2009.07.17 (10일)의 4개 기간에 대해서 유출모의를 수행하였다. 유출모형은 배덕효와 이병주 (2011)가 개발한 SURR 모형 (Sejong University Rainfall-Runoff model)을 이용하였으며 이 모형은 유역의 수문성분 (토양수분량, 증발산량, 지표-중간-지하수 유출량) 발생량과 지류합수를 연계

한 연속형 강우-유출모형이다.

Fig. 6은 4개 기간에 대한 유출모의 결과를 도시한 것이다. 'OBS'는 관측유량, 'SIM_LAWS'와 'SIM_RAR'는 각각 AWS와 RAR 유역평균강우량을 적용한 모의유량을 의미한다. 임남댐은 북한에 위치한 댐으로 관측유량을 확보하지 못하였으며 평화댐의 경우는 다른 댐과 같이 수문을 통한 여수로 방류가 아닌 댐체 하단에 위치한 방류구를 통해 방류하므로 관측유량의 정확도가 상대적으로 낮다고 할 수 있다.

2006년 결과에서 임남댐에서는 AWS 유량이 RAR에 비해 상당히 크게 산정되며 평화댐에서는 AWS 침투유량이 관측유량과 유사하게 모의되고 RAR은 과소하게 모

Fig. 6. Comparison of the Hourly Simulated Discharge Applied from Hourly AWS and RAR Rainfall

의되나 첨두유량 이후 유량에서는 RAR 유량이 관측유량을 더 잘 모의하는 것으로 나타났다. 또한 화천댐과 춘천댐의 경우는 AWS 유역평균강우량의 신뢰도가 높기 때문에 AWS를 이용한 모의유량이 대체로 관측유량을 잘 모의하고 RAR 유량은 다소 과소추정되지만 관측유량과 유사한 거동을 보이는 것으로 나타났다. 다만, 두 댐의 경우 모의결과가 상대적으로 우수한 것은 유출모의과정에서 화천댐은 평화의댐, 춘천댐은 화천댐의 관측방류량이 고려되었기 때문이다.

2007년 결과에서도 임남댐의 경우 AWS 유량이 RAR 유량에 비해 크게 모의되며 평화의댐에서도 AWS 유량이 크게 모의되나 두 결과 모두 관측유량과 다른 거동을 보이기 때문에 어떤 자료로부터 산정된 유역평균강우량이 타당할지를 판단하기는 어렵다. 다만, 화천댐의 경우는 AWS 유량이 관측유량에 비해 상당히 과대추정됨을 보이지만 반해, RAR 유량은 관측유량을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 춘천댐에서는 AWS 결과가 관측유량을 상당히 잘 모의하는 것으로 나타났다.

2008년에는 임남댐과 평화의댐에서 RAR 유량의 상승이 거의 없거나 적은 반면에 AWS 결과에서는 큰 유량이 발생하였다. 평화의댐에서는 관측유량의 오류로 인해 모의유량을 정확하게 평가하기가 어렵다. 화천댐에서는 RAR 유량이 관측유량에 더 근접하게 모의하며 춘천댐은 AWS 유량이 관측유량을 잘 모의하는 것으로 나타났다.

2009년에서도 관측유량이 존재하는 지점에서는 AWS

유량이 RAR 결과에 비해 관측유량을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 다만, 평화의댐의 경우 AWS 모의유량이 관측유량의 첨두치는 비슷하게 모의하나 수문곡선이 전반적으로 관측치에 비해 대략 7시간 정도 선행하여 발생하는 것으로 나타났다. 이는 관측유량이 정확하고 강우자료의 전송 및 구축과정에서 오류가 없다는 가정 하에 평화의댐 자기유역에서 실제 발생한 강우에 비해 AWS 유역평균강우량의 시간분포가 앞쪽으로 이동했기 때문으로 판단된다. 실제 이 기간의 경우는 장마전선이 북진하여 우리나라 중부지역과 북한지역에 많은 비를 내린 호우사례로 강우대가 유역의 하류에서 상류로 이동할 경우 상류 유역의 강우는 하류와 동일한 강우발생시간과 양을 가지기 때문에 강우대의 이동시간이 고려되지 못하는 것이 하나의 가능한 이유가 될 수 있다.

Table 4는 관측유량의 품질이 양호한 댐별 분석기간에 대해서 관측유량과 AWS와 RAR 강우를 이용한 모의유량의 결정계수 (R^2)를 산정한 결과이다. 평화의댐 2009년과 춘천댐 2007년 분석기간에서 RAR 유량이 AWS 유량에 비해 R^2 가 높게 나타나며 이외의 기간에서는 AWS 유량의 적합도가 비슷하거나 높게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 AWS와 RAR 모의유량은 대체로 하루지점일수록 R^2 가 높게 나타나며 이는 상류 댐의 관측방류량과 상대적으로 조밀한 우량관측소로부터 산정된 유역평균강우량이 적용되었기 때문으로 판단된다.

두 자료의 유출모의결과를 통해 RAR 유량이 AWS 결

Table 4. Coefficients of Determination (R^2) of Simulated Discharges Using AWS and RAR

Site	2006 year		2007 year		2008 year		2009 year	
	AWS	RAR	AWS	RAR	AWS	RAR	AWS	RAR
Pyeonghwa	0.83	0.71	-	-	-	-	0.43	0.75
Hwacheon	0.84	0.77	0.67	0.81	0.75	0.67	0.89	0.84
Chuncheon	0.95	0.96	0.95	0.85	0.85	0.81	0.73	0.66

과에 비해 대체로 적게 추정되며 우량관측소가 상대적으로 균등하게 분포하는 하류유역에서는 AWS 유량이 관측 유량을 더 잘 모의하는 것을 알 수 있다. 다만, 미계측유역이 넓게 분포하는 유역이나 AWS 유량이 과대추정되는 경우에 대해서 RAR 유량도 적용이 가능한 것으로 판단된다. 동일한 유출매개변수를 적용하였을 때 호우사상에 따라 정확도가 급격하게 차이가 나는 이유는 모형에 입력되는 강우자료의 불확실성 때문이다 할 수 있다. 또한 본 연구의 대상유역과 같이 상류에 미계측 유역이 존재하는 유역에서는 서해에서 넓게 발생한 강우대가 공간적으로 균등한 강우를 내리며 동진할 경우 AWS 유량의 정확도를 어느 정도 확보할 수 있으나 강우대가 북상 또는 남하하는 경우 즉, 상류와 하류의 강우패턴 또는 강우량의 차이가 클 경우는 AWS 유량도 상당한 오차를 가질 수 있을 것으로 판단된다. 다만, AWS 관측소가 균일하게 분포하고 있는 춘천댐 자기유역에서 RAR 유량이 AWS에 비해 과소모의되는 결과로부터 RAR 강우의 정확도 개선은 여전히 필요하다고 할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 북한지역의 미계측유역을 포함하는 북한강 상류유역에 대한 홍수모의 방안으로 기상청에서 실시간으로 제공하고 있는 RAR 강우자료의 적용성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 춘천댐 상류유역에 대해 시간위 AWS와 RAR 강우자료를 구축하고 유역평균강우량을 산정하여 두 자료간의 결과를 비교하였으며 강우-유출모형과의 연계를 통해 RAR 자료의 홍수모의의 가능성을 평가하였다. 도출된 주요결과는 다음과 같다.

1. 2006~2010년 동안 시간위 AWS 및 RAR 강우자료를 구축하고 각각 티센법과 격자평균법을 이용하여 유역평균강우량을 산정하였다. 모든 소유역에서 RAR 강우량이 AWS보다 적게 산정되는 것으로 나타났다. 또한 미계측지역에 가까운 1번과 2번 유역은 RAR와 AWS간의 R^2 가 각각 0.33과 0.38로 두 자료간 상관성이 매우 낮게 나타나며 상대적으로 우량계가 균등하게 분포되어 있는 4번과 5번 소유역에서는 R^2 가

0.65와 0.69로 상관성이 높은 것으로 나타났다. 따라서 RAR 강우의 공간분포에 대한 정확도가 AWS보다 높다고 볼 때 우량계의 밀도가 낮은 유역에서 AWS 유역평균강우량은 상당한 오차를 내포하고 있음을 간접적으로 확인하였다.

2. 연중 강우가 많이 내린 한 시간에 대해서 공간적인 강우분포에 따른 RAR과 AWS 유역평균강우량을 분석하였다. 호우가 공간적으로 균일한 경우는 두 자료로부터 산정된 유역평균강우량의 차이가 적으나 반대로 편중된 경우는 차이가 크게 발생하는 것으로 나타났다.
3. 2006~2009년의 주요호우사태에 대해서 SURR 모형을 적용하여 RAR과 AWS 유역평균강우량의 유출모의능력을 분석하였다. AWS 관측소의 밀도가 높은 하류지역에서는 AWS 유량의 정확도가 높으며 미계측 유역에 가까운 상류유역에서는 AWS 유량은 관측유량에 비해 과대모의된 반면 RAR 유량은 적절하게 모의하는 사례가 다수 나타났다. 따라서 이러한 미계측 유역의 홍수기 댐 운영을 위해서는 AWS와 RAR 자료를 병행하여 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

RAR 강우는 공간해상도가 1 km인 고해상도 격자형태의 강우자료로 본 연구에서와 같이 미계측 유역에도 적용이 가능하나 AWS 관측소가 저밀도로 설치되어 있는 유역이나 미세 소유역에서도 적용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 격자형태의 강우자료는 돌발홍수모의에도 유리하므로 다양한 분야에 대한 RAR 자료의 적용성을 높이기 위해서는 실시간 보정기법 개발을 통한 정확도 개선이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 재원의 국립기상연구소 주요사업 “시범지역 수문기상기술개발 연구”, “신생활·산업기상 기술개발”, “녹색성장 기상자원기술개발”과 한국연구재단 (No. 2009-0085533) 과제 및 유역별 레이더 면적강수지도 시범판 개발 (기상청 현업화) 과제의 일환으로 수행되었

습니다. 또한 레이더 강수자료를 제공해주신 기상청 레이더센터와 하천·댐 유량자료를 제공해주신 국토해양부 한강홍수통제소에 감사하 드립니다.

참고문헌

- 국립기상연구소 (2006). 연구용 도플러 기상레이더 운영 자료분석 기술 개발 (VI).
- 국립기상연구소 (2009). 관측기술 지원 및 활용 연구 (I)- 이중편파레이더 도입 및 기반연구.
- 김병식, 윤선규, 양동민, 권현안 (2010). "격자기반의 개념적 수문모형의 개발." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제7호, pp. 667-679.
- 김병식, 홍준범, 김형수, 최규현 (2007). "조근부 합성방법을 이용한 레이더 강우와 지상 강우자료의 조합." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제3B호, pp. 255-265.
- 김진훈, 이경도, 배덕효 (2005). "레이더 추정강우의 수문학적 활용 (III): 불확실성 해석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제12호, pp. 1051-1060.
- 박진혁, 강부식, 이근상, 이윤래 (2007). "레이더와 Vflo를 이용한 남강댐유역 해석." **한국지리정보학회논문집**, 한국지리정보학회, 제10권 제3호 pp. 13-21.
- 박진혁, 허영택 (2009). "물리자기반의 분포형모형을 활용한 임진강유역 홍수유출모의." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제1호, pp. 51-60.
- 배덕효, 이병주 (2011). "대유역 홍수예측을 위한 연속형 강우-유출모형 개발." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제44권, 제1호, pp. 51-64.
- 석미경, 남경업, 김영화, 오성남 (2005). "WPM을 이용한 레이더 반사도로부터 정량적 레이더 강우강도 추정." **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제41권, 제1호, pp. 123-138.
- Atlas, D., Rosenfeld, D., and Wolff, D.B. (1990). "Climatologically tuned reflectivity-rain rate rela-

- tions and links to area time integrals." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 29, pp. 1120-1139.
- Calheiros, R.V., and Zawadzki, I. (1987). "Reflectivity-rain rate relationships for radar hydrology in Brazil." *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol. 26, pp. 118-132.
- Cole, S.J., and Moore, R.J. (2008). "Hydrological modeling using raingauge- and radar-based estimated of areal rainfall." *Journal of Hydrology*, Vol. 358, pp. 159-181.
- Giannoni, F., Smith, J.A., Zhang, Y., and Roth, G. (2003). "Hydrologic modeling of extreme floods using radar rainfall estimates." *Advances in Water Resources*, Vol. 26, pp. 195-203.
- Krajewski, W.F. (1987). "Cokriging Radar-Rainfall and Rain Gage Data." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92, No. D5, pp. 9571-9580.
- Marshall, J.S., and Palmer, W.M. (1948). "The distribution of raindrops with size." *Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 5, pp. 165-166.
- Rosenfeld, D., Wolff, B.D., and Atlas, D. (1993). "General probability-matched relations between radar reflectivity and rain rate." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 32, pp. 50-72.
- Sinclair, S., and Pegram, G. (2005). "Combining radar and rain gauge rainfall estimates using conditional merging." *Atmospheric Science Letters*, Vol. 6, pp. 19-22.
- Sun, X., Mein, R.G., Keenan, T.D., and Elliott, J.F. (2000). "Flood estimation using radar raingauge data." *Journal of Hydrology*, Vol. 239, pp. 4-18.

논문번호: 11-043	접수: 2011.04.20
수정일자: 2011.06.15/08.08	심사완료: 2011.08.08