한국습지학회지 제14권 제2호, 2012년 5월 (243 - 254)

통계적 객관 분석법에 의한 레이더강우 보정 및 Vflo를 이용한 홍수모의

노 희 성* / 강 나 래** / 김 병 식***+ / 김 형 수****

Flood Simulation using Vflo and Radar Rainfall Adjustment Data by Statistical Objective Analysis

Noh, Hui seong* / Kang, Na Rae** / Kim, Byung Sik***+ / Kim, Hung Soo****

요약 : 최근 강우의 공간분포와 이동 및 발달상황을 파악할 수 있는 레이더강우 자료의 활용이 수문학분야에서 주목받고 있지만, 레이더 강우자료는 지상강우자료와 비교하여 자료의 신뢰성 확보가 되지 않아 실제 자료의 운용 및 적용에 어려움이 있다. 따라서 수문해석 분야에서는 레이더 강우를 활용하기 위해 레이더강우를 지상강우와 합성하여 보정하고 있다. 본 연구에서는 MFB(Mean-Field Bias)보정기법과 SOA(Statistical Objective Analysis)보정기법을 이용해 2010년 8월의 강우사상에 대하여 시공간 분포를 적절하게 표현할 수 있는 격자형 레이더 강우시계열자료를 생성하였다. 또한, 기존의 집중형 수문모형보다 유역내의 공간적인 유량변동을 보다 상세하게 고려할 수 있는 격자기반의 분포형모형(Vflo)을 국내 유역(낙동강권역 : 감천유역(1005km2))에 적용하여, 모의유출량과 관측유출량의 비교를 통해 레이더강우자료의 활용성 및 보정방법의 정확도를 평가하고자 하였다. 각 보정방법에 의한 첨두유량 오차는 20% 내외, 모델효율은 60~80% 수준으로 나타났으며, 특히 SOA방법을 통해 보정된 격자형 레이더 강우자료는 유출모형의 입력 자료로서 수문학적 활용성이 있음을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 레이더강우, Mean-Field Bias, Statistical Objective Analysis, Vflo, 홍수모의

Abstract : Recently, the use of radar rainfall data that can help tracking of the development and movement of rainfall's spatial distribution is drawing much attention in hydrology. The reliability of existing radar rainfall compared to gauge rainfall data on the ground has not yet been confirmed and so we have difficulties to apply the radar rainfall in hydrology. The radar rainfall for the applications in hydrology are adjusted merging method derived from gage. This study uses the Mean-Field Bias (MFB) and Statistical Objective Analysis (SOA) as correction methods to create adjusted grid-based radar rainfall data which can represent the temporal and spatial distribution of rainfall. This study used a storm event occurred in August 2010 for the adjustment of radar rainfall. In addition, the grid-based distributed rainfall-runoff model (Vflo), which enables more detailed examinations of spatial flux changes in the basin rather than the lumped hydrological models, has been applied to Gamcheon river basin which is a tributary of Nakdong River located in south-eastern part of the Korean peninsular and the basin area is 1005km2. The simulated runoff was compared with the observed runoff in an attempt to evaluate the usability of radar rainfall data and the reliability of the correction methods. The error range of peak discharge using each correction method was within 20 percent and the efficiency of the model was between 60 and 80 percent. In particular, the SOA method showed better results than MFB method. Therefore, the SOA method could be used for the adjustment of grid-based radar rainfall and the adjusted radar rainfall can be used as an input data of rainfall-runoff models.

keywords *: Radar rainfall, MFB, SOA, Vflo, flood Simulation*

+ Corresponding author : hydrokbs@kangwon.ac.kr
* 정회원・인하대학교 사회기반시스템공학부 박사과정・E-mail : rohhs80@inha.edu
** 정회원・인하대학교 사회기반시스템공학부 박사과정・E-mail : naraeme@naver
*** 정회원・강원대학교 방재전문대학원 도사환경방재전공 조교수・E-mail : hydrokbs@kangwon.ac.kr
**** 정회원・인하대학교 사회기반시스템공학부 교수・E-mail : sookim@inha.ac.kr

1. 서 론

최근 집중호우나 돌발홍수에 따른 자연재해가 크게 증가하고 있다. 이로 인한 피해를 줄이기 위해서는 수문학적 중요인자인 강우를 정확히 관측 및 예측하는 것이 중요하며, 이에 따라 강우의 공간분포 및 발달상황을 파악할 수 있는 레이더강우자료의 활용측면이 주목받고 있다. 하지만, 현재 레이더 강우자료는 지상강우자료와 비교하여 자료의 신뢰성측면에서 검증이 되지 않아 실제 자료의 운용 및 적용에 어려움 있어 레이더 강우자료의 신뢰성을 확보하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 수문분야에서는 레이더강우 자료를 활용하기 위해 레이더로 관측된 강우량을 보정계수를 이용하여 레이더 강우에서의 편의를 조정(Brandes, 1975)하는 방법 및 지상강우와의 합성을 통하여 레이더 강우를 보정하고 있다.

더불어, 최근 GIS 및 위성영상 등의 기술이 발전하여, 유역 수문 모델링에 있어 더 정확하고 상세한 각종 수문매개변수 수집이 가능하게 되었다. 따라서 기존의 집중형 수문모형보다 유역내의 공간적인 유량변동을 보다 상세하게 고려할 수 있는 격자기반의 분포형 수문모형의 활용도가 높아지고 있다(박진혁 등, 2008). 특히, 관측주기가 짧은 강우자료를 생성·보정·예측할 수 있는 레이더강우자료와 GIS를 이용한 물리적 기반의 분포형 유출모형 활용이 확대되고 있으며, 이는 수문분야에서 미계측유역의 유량산정측면에서 매우 유용할 것으로 기대된다.

물리적 기반의 분포형 모형은 Freeze와 Harlan(1969)에 의해 처음 소개되었으며, 본 연구에서 이용한 Vflo모형의 개발자인 Vieux, B. E. 등(2004)은 돌발홍수 적용을 위한 물리적 기반의 모형에 대해 평가 하고, 또한 Vieux,B. E와 Koehler. E.(2005)는 GIS를 이용한 Vflo 모형에 대하여 연구하였다. 국내에서는 안상진 등(2005)이 크리깅을 적용한 격자강우를 가 분포형 모형인 Modclark 모형에 적용하였고, 홍준범 등(2006)은 강우-유출 모형의 정확성을 평가하기 위하여 HEC-HMS와 Vflo 모형의 유출 비교를 통하여 모형의 정확성을 평가하고자 하였다. 배영혜 등(2007)은 칼만필터 기법을 적용하여 레이더강우의 보정하고 Vflo 모형을 안성천유역에 적용하여 홍수모의를 실시하였으며, 김병식 등(2007)은 분포형모형과 조건부합성기법으로 보정한 레이더 강우를 연계한 홍수량 산정방법을 제시하였다. 홍승진 등(2010)은 지상강우계와 레이더를 이용한 강우의 시공간적인 활용측면을 연구하였으며, 최근 국토해양부의 전국단위의 레이더구축사업과 더불어 레이더강우에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문은 이와 같은 선행연구 결과를 바탕으로 레이더 연구 초기부터 지금까지 폭넓게 이용되어 있는 MFB(Mean-Field Bias)보정기법과 새롭게 적용된 SOA(Statistical Objective Analysis) 보정기법을 통해 강우장을 생성하고, 유역의 특성을 반영하기 위한 각종 수문매개변수들을 GIS 상에서 생성하여, 물리적기반의 분포형모형인 Vflo 모형을 이용한 유출량 비교를 통해 레이더강우자료의 활용성 및 보정방법의 정확도를 평가하고자 하였다.

2. 연구방법 및 이론적 배경

본 연구는 비슬산 강우레이더에서 관측된 2010년 8월 15일 ~ 8월 17일 동안의 관측자료를 Z-R관계식을 이용하여 생성된 자료(raw-radar data)와 MFB(Mean Field Bias)방법으로 보정된 레이더강우, SOA(Statistical Objective Analysis) 방법으로 보정된 레이더강우를 이용하여, 보정 전·후의 유출모의를 통하여 보정 레이더강우 자료의 정확도를 평가하고자 하였다. 유출모의를 위해서 분포형 수문모형인 Vflo 모형을 사용하였으며 토양, 토지피복 및 지형 특성을 나타내는 매개변수를 입력하기 위하여 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 지형공간 자료(공간해상도 30m ×30m, 1:5000 수치지형도)를 사용하였다.

대상유역으로 설정한 감천유역의 하천망과 각 격자에서의 경사를 구하기 위하여 250m 격자 크기의 DEM으로 토양, 토지피복 및 지형 특성자료를 재구축 하였으며, 각 강우장별 유출량을 산정하여 관측(실측)유출량과 비교함으로써 보정 레이더강우 자료의 적용성 검토를 실시하였다(Fig. 1).

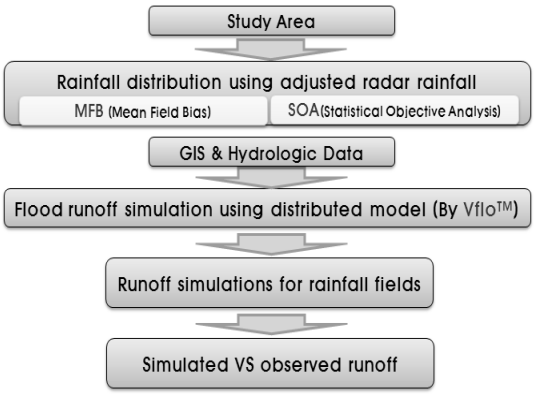


Fig. 1 연구 흐름도

2.1 지상강우를 이용한 레이더 강우 보정 기법

레이더를 이용한 강우관측은 강우의 공간적 변동성을 비교적 잘 측정할 수 있으나, 그 정확도 확보를 위하여 지상강우를 이용한 보정이 필요하다. 지상강우를 이용한 레이더강우의 보정(adjustment) 기법은 크게 “Gauge to Radar(G/R)비” 기법과 “정밀(sophisticated)"기법으로 구분할 수 있다(Barbosa,1994). G/R 기법은 레이더연구 초기에 개발된 것으로 현재까지 이용되고 있으며, 정밀 기법은 Co-Kriging 기법, 칼만필터(Kalman filter) 등 여러가지 형태로 연구되고 있다. 본 논문에서는 MFB(G/R) 방법과 통계적 객관 분석법(SOA)을 이용하여 레이더 강우의 보정을 실시하였으며, 두 방법에 대하여 간단히 살펴보면 다음과 같다.

2.1.1 MFB (Mean Field Bias)

G/R 방법은 MFB 방법이라고 하며, 가장 보편적으로 쓰이고 있는 방법이다(김병식 등, 2007). MFB 방법은 지상강우량과 레이더강우량과의 비교를 통해 산출된 보정계수(correction factor)를 레이더 강우량을 추정하는 전체 영역에 균일하게 적용하여 레이더 강우를 보정하는 방법으로, 크게 단일 매개변수 우량계 보정 방법과 다중 매개변수 우량계 보정방법으로 구분 할 수 있다. 본 연구에서는 지점에 대한 보정계수의 평균을 적용하는 일반적인 단일 매개변수 우량계 보정기법을 변형하여 Fig. 2와 같은 절차로 적용하였으며, 기본식은 다음과 같다.

$$R_c = f \times R_r \quad (f = R_g / R_r)$$

여기서, f : 각 그리드 보정계수, R_g : 지상강우 그리드 포인트 우량, R_r : 레이더 그리드 포인트 우량, R_c : 보정레이더 셀 우량을 나타낸다.

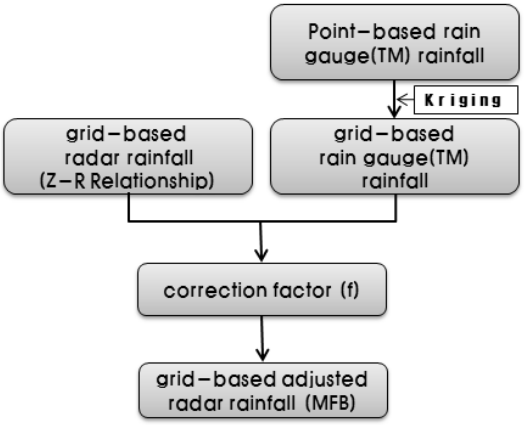


Fig. 2 MFB(Mean Field Bias) 절차

2.1.2 통계적 객관 분석법 (SOA)

통계적 객관 분석법(SOA)은 Gandin’s의 (1963) 최적보간법을 기반으로 Pereira 등(1998)이 제안한 기법으로, 지상관측자료와 레이더강우자료를 이용하여 지상관측자료가 없는 지역의 강우를 보다 정확하게 추정하는 방법으로서 관측자

료와 레이더 자료를 각각의 오차 정도로부터 계산된 가중치를 이용하여 합산하게 된다.

Pereira Fo and Crawford (1999)는 시·공간적으로 고분해능의 레이더 데이터와 조밀한 지상우량계 네트워크를 사용하여, 실시간 강우량 결정에 대한 기술을 제안한 바 있다. 또한, Anthony Kalinga and hian Yew Gan(2006)는 WSR-88D Stage III 레이더 데이터를 준분포형 모델에 적용하여 미국 오클라호마의 Blue River 유역에 대한 유출을 모의하였다. 통계적 객관 분석법(SOA)의 기본 분석 방정식 및 가중치 w_{ik}를 구하는 방정식은 다음과 같다.

$$P_a(x_i, y_i) = P_r(x_i, y_i) + \sum_{k=1}^{K} w_{ik}[P_g(x_k, y_k) - P_r(x_k, y_k)]$$

$$w_{ik} = \frac{f(d_{ik})}{\sum_{k=1}^{K} f(d_{ik})} \quad (f(d_{ik}) = \frac{1}{d_{ik}^a})$$

여기서, $P_a(x_i, y_i)$: 그리드 포인트(i)의 보정된 강우량, $P_r(x_i, y_i)$: 그리드 포인트(i)의 레이더 강우량, $P_g(x_k, y_k)$: 우량관측소 k의 관측강우량, $P_r(x_k, y_k)$: 우량관측소 k지점에 해당하는 그리드 포인트의 레이더 강우량, w_{ik} : 가중치, K : 우량관측소의 수, (x, y) : 좌표, d_{ik} : 그리드 포인트(i,k) 사이의 거리를 나타낸다.

SOA방법의 핵심 아이디어는 우량관측소 사이의 상관함수를 사용한 최적 가중치 w_{ik}를 도출하는 것이다. 즉, 최적 가중치를 이용하여 보정 배경 필드(field)를 생성하고 raw-radar 강우장을 배경필드와 결합하여 보정레이더 강우장을 생성하는 것이며, 최적 가중치 도출을 위해 IDW(Inverse Distance Weighting method)방법을 이용하였다.

2.2 Vflo 모형의 개념 및 이론

본 연구에서 이용한 Vflo는 레이더강우 시스템, GIS를 이용한 수리수문모델 솔루션을 제공하는 물리적인 개념 기반의 분포형 모형(PBDM)이다. 이 모형은 각종 수리수문 매개변수들을 GIS와 연계하여 추출된 수리수문 매개변수들을 일괄 처리할 수 있도록 고안되었으며, 이는 매개변수 산정에서 문제가 되는 경험적 요인을 제거한 것이라 할 수 있다(오경두 등, 2009).

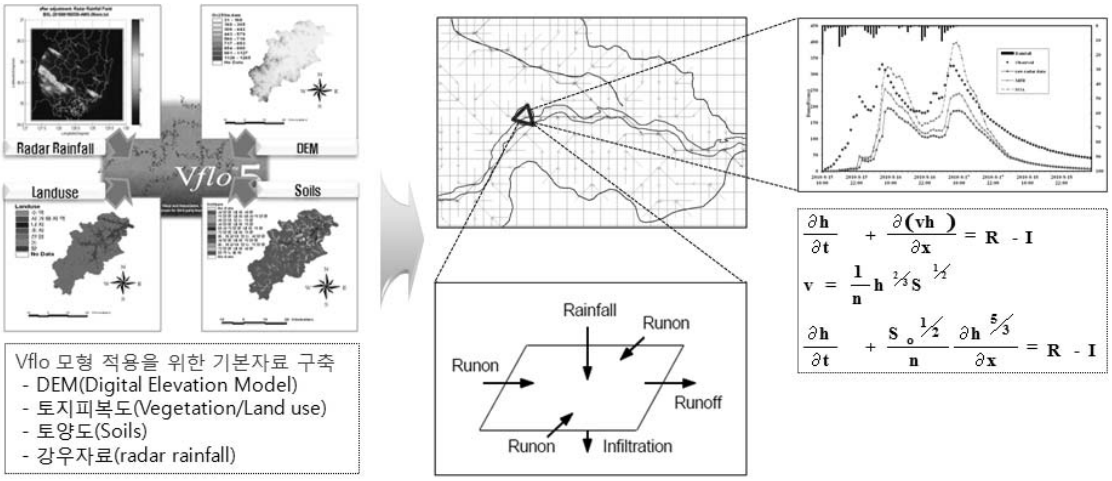


Fig. 3 Vflo 모형의 구성 및 개념

Vflo 모형 구축과정 및 개념을 살펴보면, 먼저 DEM을 이용하여 격자기반으로 지형정보를 구축하고, 동일한 격자크기의 토양 및 토지피복에 대한 매개변수를 GIS를 이용하여 생성하며, 실제 유역에서의 유사한 지표면흐름과 하도흐름의 추적을 위해 운동파방정식(Kinematic Wave Equation)을 사용한다. Vflo 모형에서 하도망은 지형정보로부터 추출된 유하방향도로부터 형성되며, 하도망의 지형학적 특성은 유역과 수문곡선의 형태와 반응특성을 결정한다. 완경사의 하도 및 하천 외 저류는 Modified Puls 및 Jones방정식을 이용하고, 지표격자로부터 발생하는 유출은 하도추적과 연결된다. 하도추적은 실제단면, 사다리꼴 단면, 수위-유량곡선 등을 이용하여 수행된다(홍준범 등, 2006). 또한, 침투량 산정은 Darcy의 법칙을 이용한 Green-Ampt 침투능 모형을 적용하고 있다.

2.3 Vflo 모형의 지배방정식

Vflo모형은 유역내 하도흐름을 운동파 방정식(kinematic wave equation)을 이용하여 지배 방정식으로 표현된다. 이 개념은 단순화된 운동량방정식과 연속방정식으로 구성되며, 초과우량에 의해 발생되는 지표유출을 1차원 연속방정식의 형태로 표현한다. 또한, 하천에서의 흐름계산에 있어 직접유출의 흐름은 등류라 가정되고, 격자기반의 수치지지도 형태로 생성한 토양도, 토지피복도, 지형도, 강우자료를 입력자료로 하여 유한요소법(Finite element method)으로 계산된다. 운동파가정은 매우 평평한 지역을 제외하고 기본적 기울기를 가지고 있기 때문에, 배수가 중요하지 않은 유역의 어느 곳에서든지 이용될 수 있지만, 배수위효과(backwater)과 뚜렷한 구간에 대해서는 적용에 제한을 받는다. 다음 식은 지표면 흐름과 하도흐름을 추적하는 지배방정식을 나타낸다.

$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial(vh)}{\partial x}=R-I$: 지표면 흐름의 1차원 연속방정식

$v=\frac{1}{n}h^{2/3}S_o^{1/2}$: 지표면흐름을 등류로 가정한 Manning의 경험공식

$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{S_o^{1/2}}{n}+\frac{\partial h^{5/3}}{\partial x}=R-I$: 지표면 흐름을 추적하기위한 지배방정식

여기서, x : 상류단으로부터의 거리(m), h : 수심(m), v : 지표면 흐름의 유속(m/s), R : 강우량(㎜), I : 침투량(㎜), S_o : 지표면 경사로 표현된다.

3. 대상 레이더 및 유역 입력자료

3.1 대상 레이더 및 유역의 현황

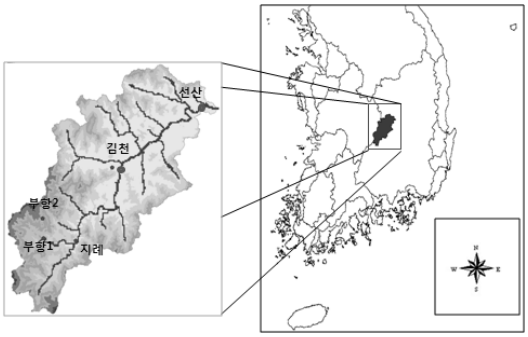
본 논문의 연구대상 레이더 관측소인 비슬산 강우레이더 관측소는 2009년 8월 30일 준공되어 우리나라 최초의 이중편파 레이더 자료를 생산하고 있으며, 비슬산 강우레이더 관측소의 제원은 Table 1과 같다.

Table 1. 비슬산 강우레이더 관측소 제원

위치 (위도/경도)		경북 청도군 각북면 (35° 42’ 54” / 128° 32’ 12”)
안테나 해발고도		1,085 m
주파수		2,795 MHz (S 밴드)
송출방법		Simultaneous H/V
송신최대출력		750 KW
산출변수		Z, Vr, SW, ZDR, ΦDP, KDP, ρHV
관측전략 (강우레이더)	관측주기	2.5분
	관측반경	100 km
	관측고도	-0.5°~1.6°(저고도 5개 고도각)
관측소 개소일		2009년 6월 10일

대상유역으로는 비슬산 강우레이더의 관측영역 내에 위치하고, 강우-유출 해석에 이용할 수 있는 양질의 지형공간자료와 수문자료가 확보 및 배수위효과의 영향이 적은 낙동강권역의 감천유역(중

권역)을 선정하였다. 감천유역은 유역면적이 1005.33㎢, 유로연장 74.27㎞이고, 유역 내 국가하천 1개소(감천)와 17개의 지방하천이 위치하고 있으며, 7개의 표준유역을 가지고 있다. 현재 감천유역 내에는 국토해양부에서 관할하고 있는 5개의 우량관측소(김천·부항1·부항2·선산·지례) 및 2개의 수위관측소(김천·선산)가 운영 중이다(Fig. 4).



감천유역의 지상관측소	
강우관측소	수위관측소
김천, 지례, 부항1, 부항2, 선산(5개소)	김천, 선산(2개소)

Fig. 4 감천 유역도 및 관측소 현황

3.2 레이더강우 입력자료 생성 및 지점 분석

레이더강우 자료는 2010년 8월 15일 10:30 ~ 2010년 8월 17일 09:00 (47hr)의 비슬산 강우레이더의 초기 UF data를 다음의 Z-R 관계식을 적용하여 산출된 보정 전 레이더 강우장(raw-radar data)을 이용하고자 하였다.

$$Z = 231R^{1.6}$$

위 Z-R 관계식으로부터 강우강도 형태로 산출된 보정 전 레이더 강우장(raw-radar data)을 30분 누가강우량 값으로 변환하고, 비슬산강우레이더의 관측영역에 위치한 182개소의 지상 우량관측소 자료를 이용하여, 앞서 설명한 MFB방법과 SOA방법을 적용하였다. 즉, 지상강우자료와 보정 전 레이더강우장(raw-radar data)을 이용하여 보정계수(f) 및 가중치(w_{ik})를 도출하고, 도출된 보정계수(f) 및 가중치(w_{ik})를 보정 전 레이더 강우장에 적용하여 MFB보정 레이더 강우장과 SOA보정 레이더 강우장을 생성하였다(Fig. 5). 또한, 보정된 각 강우장은 Vflo 모형의 입력자료로 활용하기 위하여 격자간격 250m의 ASCII 파일로 변환하였다.

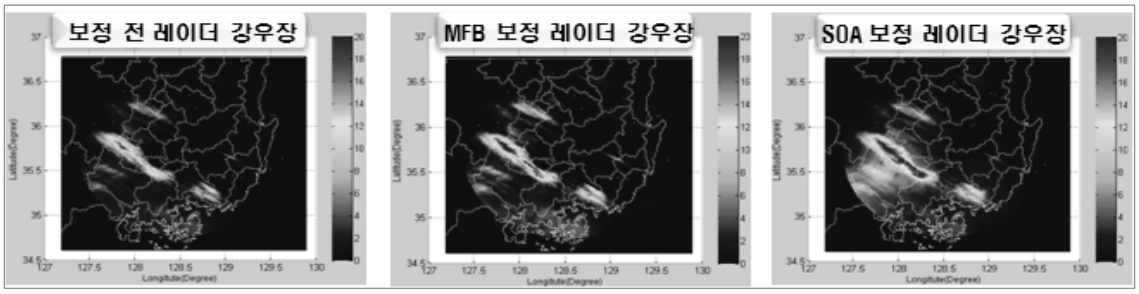
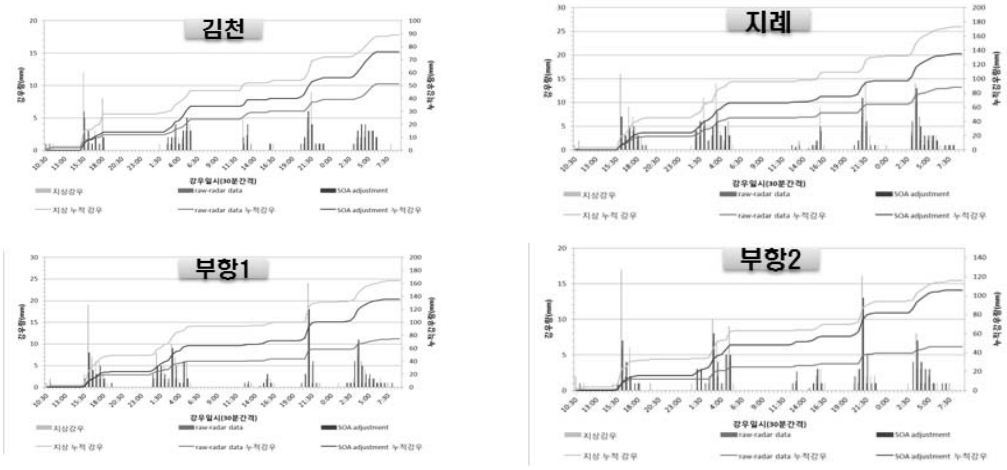


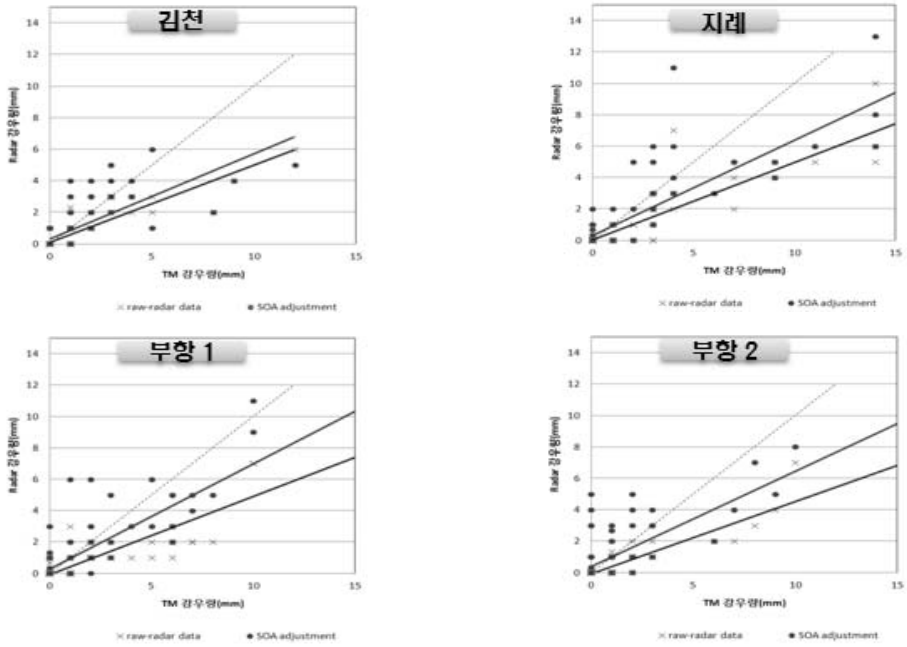
Fig. 5 각 레이더 강우장 (2010.08.15.04:30_30분 누가강우)

Fig. 6(a)은 감천유역의 각 관측소 지점과 이에 해당하는 보정레이더 강우장의 그리드 포인트와의 전체 강우에 대한 누적강우를 30분 누가우량을 비교한 것으로, raw-radar data는 강우량의 참값으로 가정하는 지상관측 강우량에 대하여 40~60% 정도의 값을 나타내고 있지만, SOA방법을 이용한 보정 강우량 값은 지상관측 강우량 값의 70~90% 수준을 나타내고 있다. 또한, 지점별 보정 전·후의 Q-Q plot은 각각의 30분 누적강우량에 대한 SOA 보정 강우량과 지상관측 강우량 값과 관계를 파악하기 위한 것으로, 30분 단위의 누적강우량이 참값인 지상강우량 값과 비슷해 짐

에 따라 그래프 기울기가 1 :1 선형에 더 근접한 양상을 보이고 있다. 이는 SOA보정 방법을 이용한 보정 후 레이더 강우량 값의 정확도가 향상되는 것을 의미한다고 할 수 있다.



(a) 지점별 누가강우량 비교



(b) 지점별 Q-Q plot 비교

Fig. 6 지점별 누가강우량(30분) 및 Q-Q plot 비교

3.3 GIS를 이용한 수문매개변수 입력자료 생성

유역의 수문학적인 특성은 지형, 토지피복, 토양 등에 의해 크게 좌우된다. 본 연구에서는 토양, 토지피복 및 지형 특성을 나타내는 매개변수자료를 생성하고자 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 지형공간 자료를 GIS프로그램을 이용하여, 250m × 250m 격자 크기로

Vflo 모형의 입력자료로 활용할 수 있는 공간분포형 수문매개변수들을 생성 하였다. 즉, 유역특성과 관련된 DEM(Digital Elevation Model), 토지피복도(Landuse), 토양도(Soils)의 3가지 기본 지형공간자료 및 Vieux가 제시한 토지피복분류에 대한 전형적인 조도계수(Table 2)와 Green-Ampt 침투매개변수(Table 3) 등을 적용하여 생성된 여러 Vflo 모형의 입력자료들을 바탕으로 Vflo 모형의 격자망을 구성하였다(Fig. 7).

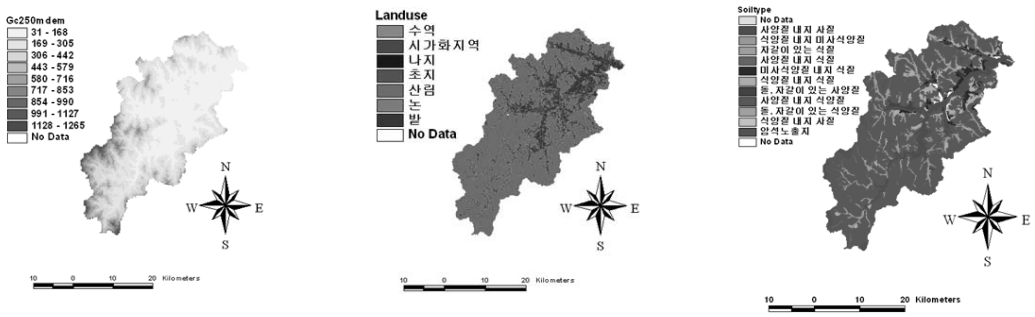
홍수유출 모의 시모형의 지형학적 매개변수의 조정에 의한 강우입력 자료의 왜곡을 배제하기 위하여 Vflo 모형의 매개변수 보정은 실시하지 않았다.

Table 2. 조도계수 분류 (Vieux, 2004)

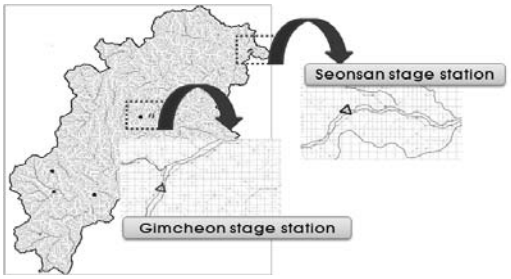
class	Landuse	Roughness
1	Water Area	0.03
2	Urbanization	0.015
3	Eroded Land	0.035
4	Marsh	0.05
5	Grassland	0.13
6	Forest	0.1
7	Paddy Field	0.05
8	Cropland	0.035

Table 3. Green-Ampt매개변수(Vieux, 2004)

Value	Description	Effective Porosity	Wetting Front	Saturated Hydraulic Conductivity
0	No data	0.361	15.945	0.595
1	Sandy Loam/Sands	0.415	7.908	6.435
2	Clay Loam/Silty Clay Loam	0.371	24.090	0.100
3	Sandy Loam (with gravels)	0.412	11.010	1.090
4	Sandy Loam/Clay	0.399	21.320	0.560
6	Silty Clay Loam/Clay	0.409	29.465	0.065
7	Clay Loam/Clay	0.347	26.255	0.065
8	Sandy Loam (with gravels)	0.412	11.010	1.090
14	Sandy Loam/Clay Loam	0.361	15.945	0.595
15	Clay Loam (with gravels)	0.309	20.880	0.100
16	Clay Loam/Silt	0.393	18.780	0.375
17	Clay Loam	0.309	20.880	0.100
49	Rocky Land	0.010	0.000	0.000
No data		0.361	15.945	0.595



DEM Landuse Soil map



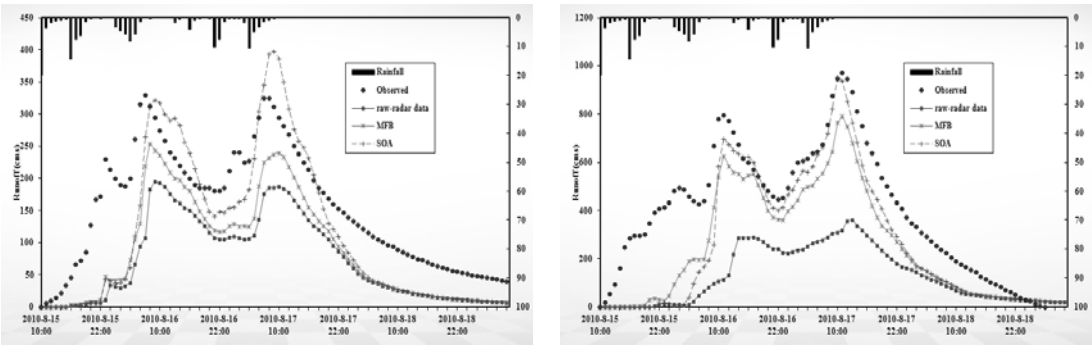
Vflo 모형 구성

Fig. 7 Vflo 모형 입력자료 및 구성

4. 결 과

MFB방법과 SOA방법에 의해 생성된 보정 레이더 강우장이 현실적으로 어느 정도의 강우정확도를 가지고 강우분포를 재현하는지를 평가하기 위해 분포형 수문모형(Vflo)을 이용하여 유출량을 산정하였다.

각 강우장별로 2개의 수위관측소 지점에 대하여 비교·분석을 실시하였다. 먼저 첨두유출량에 대하여 관측유출량과 모의유출량을 검토한 결과, 김천지점에서는 raw-radar data에 의한 모의유출량은 관측유출량 값보다 눈에 띄게 작은 값을 보였으며, 이는 일반적으로 레이보정 전 레이더강우량이 지상강우량에 비하여 과소추정 됨을 잘 보여주는 것이라 할 수 있다. 그러나 본 연구에서 적용된 MFB방법과 SOA방법을 적용한 레이더강우에 의한 모의유출량은 관측유출량 값에 근접함을 보였다. 특히, SOA방법을 적용한 보정 레이더강우의 경우 감천지점에서의 첨두유출량은 관측유출량과 비교하여 두 번째 유출 증가부분에서 약간 과대산정이 되었지만, 전체적으로 감천 및 선산 두 지점에서의 첨두유출량, 첨두유출 발생시간, 전체적인 유출 발생 패턴은 비교적 잘 일치하는 것을 확인하였다(Fig. 7).



(a) 감천지점 (b) 선산지점

Fig. 8 강우장별 강우유출 비교 그래프

각 레이더강우에 대한 유출량비교 결과를 더 자세히 살펴보기 위하여 오차 및 모형효율(Model Efficiency) 분석을 실시하였다. 오차분석을 위해서는 MAE(Mean Absolute Error), RMSE(Root Mean Square Error), NPE(Normalized Peak Error)와 PTE(Peak Timing Error)를 이용하였으며(김병식 등, 2008), 오차분석 및 모형효율의 계산식은 다음과 같다.

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|Q_{oi} - Q_{ci}|$$: Mean Absolute Error

$$\mathrm{SE} = \left[\frac{1}{\mathrm{N}}\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}}(\mathrm{Q_{oi}} - \mathrm{Q_{ci}})^2\right]^{0.5}$$: Root Mean Square Error

$$NPE = \frac{Q_c^{\max} - Q_o^{\max}}{Q_o^{\max}}$$: Normalized Peak Error

$$PTE = T_c^{\max} - T_o^{\max}$$: Peak Timing Error

$$ME = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(Q_{oi} - Q_{oave})^2\right] - \left[\sum_{i=1}^{n}(Q_{ci} - Q_{oi})^2\right]}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{oi} - Q_{oave})^2}$$

: Model Efficiency

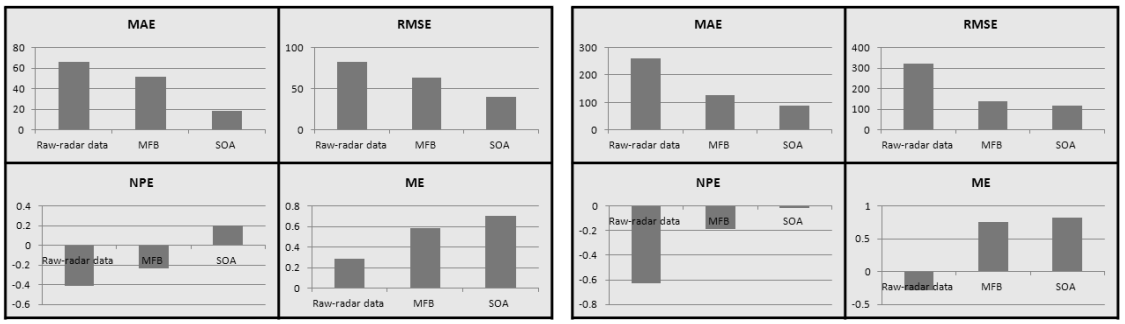
여기서, Q_{oi} : 관측유출량, Q_{ci} : 모의유출량, n : 시간 간격 개수, $Q_o^{\max}$: 관측첨두유출량,

$Q_c^{\max}$: 모의첨두유출량, $T_o^{\max}$: 관측 첨두유출 발생 시간, $T_c^{\max}$: 모의 첨두유출 발생 시간, Q_{oave} : 관측유출량 평균값을 의미한다.

오차분석 및 모형효율 분석 결과 MAE 및 RMSE 오차의 값은 선행강우에 대한 유출발생 초반부에서의 차이로 인하여 크게 만족할 만한 값을 보이지 않았지만, 첨두유출에 대한 NPE는 보정전 40~60%에서 보정 후20% 내외의 수준을 보였으며, 모형효율(ME) 또한 70~80%를 나타내었다(Table 4). 특히, 앞의 Fig. 8에서 SOA방법에 의한 모의유출량과 곡선이 관측유출량과 가장 유사한 것과 같이, 오차분석 결과 값에서도 선산지점의 첨두발생시간에 대한 오차값을 제외하고, 대부분의 오차비교 값에서 SOA방법에 의한 모의유출량 값이 가장 좋은 결과를 나타내었다.

Table 4. 각 강우장별 오차분석 및 모형효율 결과

김천 지점				선산지점			
	raw-radar data	MFB	SOA		raw-radar data	MFB	SOA
MAE	66.18	51.68	18.56	MAE	259.01	127.17	89.18
RMSE	82.33	63.58	39.89	RMSE	320.84	139.57	117.26
NPE	-0.410	-0.230	0.205	NPE	-0.629	-0.186	-0.020
ME	0.29	0.58	0.70	ME	-0.28	0.75	0.82
PTE	1	0.5	0.5	PTE	1	0	0.5
Average (runoff)	86.17	103.82	138.62	Average (runoff)	159.93	297.97	331.71



(a) 감천지점 (b) 선산지점

Fig 9. 각 강우장별 오차분석 및 모형효율 그래프

5. 결 론

본 논문에서는 레이더강우와 지상강우자료를 이용하여 대상유역의 공간강우장을 생성하였으며, MFB방법과 SOA방법에 의해 생성된 레이더강우의 활용성 및 보정방법의 정확도를 평가하고자 분포형유출모형(Vflo)을 이용하였다. 본 논문의 내용과 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 분석된 raw-radar data를 이용한 지점강우 및 이를 이용한 유출량은 관측(실측) 강우량 및 유출량 보다 과소 추정

되는 경향을 나타내었다.

(2) MFB방법과 SOA방법으로 보정된 레이더강우자료를 이용하여 지점강우 및 유출량에 대한 검토 결과, 두 방법 모두 raw-radar data를 이용했을 경우 보다 더 나은 결과를 나타내었고, SOA방법을 이용하여 모의된 유출량 및 유출패턴은 관측유출량 및 패턴과 매우 유사하게 모의 되었으며, 대부분의 오차분석 및 모형효율 값도 가장 좋은 결과를 보였다.

(3) SOA방법을 통해 보정된 레이더강우 자료는 유출모형의 입력 자료로서 수문학적 활용성이 있음을 확인할 수 있었으며, 추후 습지유역에서의 유출분석 및 습지의 저류효과 검토 시 레이더자료 활용을 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 본 연구에서 활용된 지점분석 및 유출량 비교에 따른 오차분석·모델효율 등을 이용하여 정확도 검증 기준이 마련된다면, 레이더강우의 응용 및 활용에 대한 객관적이고 정량적인 근거자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

건설교통부, “강우레이더에 의한 돌발홍수예보 시스템 개발 1차년도” 건설교통부, 2005

건설교통부, “강우레이더에 의한 돌발홍수예보 시스템 개발 2차년도” 건설교통부, 2006

국토해양부, “차세대홍수방어기술개발 연구보고서(Ⅰ)” 국토해양부, 2011

김병식, 홍준범, 김형수, 최규현. (2007). 조건부 합성방법을 이용한 레이더 강우와 지상 강우 자료의 조합. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제 27권, 제 3B호, pp. 255-265.

김영일, 김태순, 허준행. (2009). 레이더 자료의 군집화를 통한 Mean Field Rainfall Bias의 보정. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제 42권, 제 8호, pp. 659-671

박진혁, 강부식, 이근상. (2008). 레이더강우를 이용한 GIS기반의 분포형모형 적용성 분석, **한국지형공간정보학회지**, 한국지형공간정보학회, 제 16권 제 1호, pp. 23-32.

배덕효, 김진훈, 윤성심. (2005). 레이더 추정강우의 수문학적 활용(I): 최적 레이더 강우 추정, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권 제12호, pp.1039-1049.

배영혜, 김병식, 김형수, 서병하. (2007). 칼만필터 기법에 의한 레이더 강우의 보정 및 Vflo^{TM} 모형을이용한 홍수 모의. **2007년도 대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 2040-2045.

오경두. (2009). 분포형 모형 Vflo^{TM}에 의한 수문해석. **제20회 수공학 워크샵**, 한국수자원학회, 2009. 2

최규현, 김병식, 정재욱, 현명숙. (2006). 강우레이더와 지상우량계 자료를 이용한 실시간 강우강도 추정. **2006년도 한국수자원학회 학술발표회논문**집, 한국수자원학회, pp. 1211-1514.

홍승진, 김병식, 함창학. (2010). 강우계와 레이더를 이용한 강우의 시공간적인 활용. **한국지형공간정보학회지**, 한국지형공간정보학회, 제 18권 제 3호, pp. 37-48.

홍준범, 김병식, 윤석영(2006) Vflo^{TM} 모형을 이용한 물리기반의 분포형 수문모형의 정확성 평가, **대한토목학회 논문집**, 제26권, 제6B호, pp.613-622.

Anagonostou, E. N., Krajewski, W. F., Seo, D.-J., and Johnson, E. R. (1998). *Mean field rainfall bias studies for WSR-88D.*

Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, Vol. 3(3), pp. 149-159.

Oscar Anthony Kalinga, Thian Yew Gan. (2006). *Semi-distributed modelling of basin hydrology with radar and gauged precipitation*, **Hydrological Processes**, Volume 20 Issue 17, pp.3725-3746.

B.S. Kim, B.K. Kim, H.S. Kim(2008) *Flood simulation using the gauge-adjusted radar rainfall and physics-based distributed hydrologic model*, **Hydrological Processes**, Volume 22 Issue 22, pp.4400-4414.

Brandes, E. A. (1975). *Optimizing rainfall estimates with the aid of radar*, **Journal of Applied Meteorology**, Vol.14, pp.1339-1345.

Freeze, R.A. and Harlan, R.L. (1969). *Blueprint for a physically-based digitally-simulated hydrological response model*, **Journal of Hydrology**, Vol. 9, pp.237-258

Gandin, L. S., 1963: *Objective Analysis of Meteorological Fields*. Translated by R. Harding, **Israel Program for Scientific Translation**, 242 pp.

Preira Fo, A. J., Crawford, K. C. & Hartzell, C. L. (1998) *Improving WSR-88D hourly rainfall estimates*. **Weath. Forecasting** 13, 1016-1028.

Vieux, B.E. (2001), *Distributed Hydrology Modeling using GIS*, **Water Science and Technology Library**, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Vieux, B.E. *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS*, 2nd ed., Kluwer Academic Publishers, 2004.

Vieux, B.E. and Koehler, E. (2005). *Vflo^{TM} Model Advanced Training*

Vieux & Associates, Inc. *VfloTM 4.0 User's Guide*, 2008.

○ 논문접수일 : 2012년 05월 24일
○ 심사의뢰일 : 2012년 05월 24일
○ 심사완료일 : 2012년 05월 28일