

ORIGINAL ARTICLE

레이더 자료의 강우보정 및 Vflo를 활용한 도심하천의 홍수량 산정

강보성 · 양성기* · 김용석

제주대학교 토목공학과

Rainfall Correction of Radar Image Data and Estimation Runoff of Urban Stream using Vflo

Bo-Seong Kang, Sung-Kee Yang*, Yong-Seok Kim

Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

Abstract

This research aims at comparing the accuracy of flood discharge estimation. For this, we focused on the Oedo watershed of Jeju Island and compared flood discharge by analyzing the values as follows: (1) the concentration of the lumped model (HEC-HMS) and distributed model (Vflo), and (2) the in-situ data using Fixed Surface Image Velocimetry (FSIV). The flood discharge estimation from the HEC-HMS model is slightly larger than the Vflo model results. This result shows that the estimations of the HEC-HMS are larger than the flood discharge data by 4.43 to 36.24% and that of the Vflo are larger by 8.49 to 11%. In terms of the error analysis at the peak discharge occurrence time of each mapping, HEC-HMS is one hour later than the measured data, but Vflo is almost the same as the measured data.

Key words : Flood discharge, HEC-HMS, Vflo, FSIV

1. 서론

지구상 기후변화로 인해 태풍 및 집중호우 등의 발생빈도가 증가하고 있으며 그 규모가 대형화됨에 따라 매년 많은 피해가 발생하고 있다. 이와 같은 재해로 인한 인명 및 재산 피해를 줄이기 위하여 우리나라는 물론 세계 각국은 많은 노력과 예산을 투자하고 있다 (Kang, 2014).

제주도는 집중호우 및 돌발홍수 등 자연재해에 연

중 노출되어 있으며, 지리적 특성상 태풍의 길목에 위치하고 있어 호우사상으로 인한 피해가 매년 크게 발생하고 있다(Jung, 2009). 과거에는 하천 유출 발생 시 짧은 시간 동안 바다로 유입되는 지질-지리적 특성으로 인해 홍수재해로부터 비교적 안전지대로 여겨져 왔으나, 2007년 태풍 ‘나리’ 내습 시 약 1,600억 원의 재산피해 뿐만 아니라 14명의 인명피해가 발생한 후부터 방재에 대한 인식이 크게 바뀌었다(Yang, 2007).

최근 한라산 정상 부근에는 500 mm 이상의 집중호우

Received 30 November, 2016; Revised 29 March, 2017;

Accepted 17 April, 2017

*Corresponding author: Sung-Kee Yang, Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea
Phone : +82-64-754-3451
E-mail : skyang@jejunu.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

발생빈도가 급증하고 있으며, 제주시 및 서귀포시의 일강우량이 200 mm 이상인 경우도 빈번하고 나타나고 있다. 특히, 2014년 8월에 발생한 태풍 ‘나크리’는 기상청 관측 사상 최대인 1,500 mm의 일강우량을 기록하였다. 이와 같이, 이상기후의 영향으로 집중호우 발생빈도가 급증하고 일강우량의 경신이 빈번하게 발생함에 따라 홍수 피해의 위험도 증가하고 있어 예방 대책이 시급한 과제이며, 급격한 기후변화로 인한 홍수 피해를 줄이기 위해서는 정확한 홍수량 산정을 통한 하천기본계획 및 유역종합치수계획의 수립이 매우 중요하다.

레이더 자료를 활용한 연구의 중요성이 증대되는 만큼 홍수량 산정 시 분포형 모형을 활용한 연구가 국내·외에서 꾸준히 진행되었다. 레이더 자료 및 분포형 모형을 활용한 국내·외 연구 동향을 살펴보면 Yoon et al.(2002)은 Kriging 기법을 통해 공간적으로 분포된 강우자료를 강우유출모형과 비교하여 강우유출관계를 고찰하고 불확실성을 분석하여 정량화하는 방안을 모색하였다. Hong et al.(2006)은 Vflo 모형의 홍수량 산정 정확성을 평가하기 위하여 매개변수를 보정 하지 않은 HEC-HMS 모형의 결과와 비교하였으며 Vflo 모형을 충분히 적용할 수 있음을 확인하였다. Park et al.(2007)은 레이더 강우와 Vflo 모형을 이용하여 홍수유출을 해석하여 매개변수의 보정을 통한 모의결과 정확성이 높다는 결과를 얻었다. Kim et al.(2009)은 Vflo 모형의 매개변수 민감도 분석을 통하여 조도계수 값에 따라 수문곡선의 형태가 민감하게 반응하는 결과를 얻었다. Eulogio(1998)는 Kriging 기법과 Thiessen 가중법을 이용하여 연평균강우자료를 공간적으로 분포시켰으며, Goovaert(2000)는 Kriging 기법, Thiessen 가중법, IDW (Inverse Distance Weighting)법을 이용하여 강우자료만 이용한 경우와 DEM (Digital Elevation Model)을 적용하여 공간적으로 예측한 결과를 비교 분석하였다. 이들 방법은 각각

의 단일 모형에 의한 유출량을 산정하고 있으나 실제 현장관측 자료와 모형간의 정확도를 분석한 예는 거의 없다.

본 연구에서는 분포형 모형을 활용한 홍수량 산정 방법의 정확도를 높이기 위하여 레이더 영상자료로부터 추출되는 강우 데이터를 G/R기법을 통하여 보정하였다.

RAIDOM 기법을 활용하여 레이더 영상자료(CAPPI)로부터 제주 도심하천인 외도천 유역의 면적 강우량을 산정하였으며, 지상우량관측자료(AWS)를 활용한 면적강우량 간 강우보정 후 제주수자원연구단에서 연구한 홍수유출 현장관측 자료(FSIV : Fixed Surface Image Velocimetry)와 비교·분석하였다.

2. 연구 방법

2.1. 연구대상 하천 및 유역

제주도 하천은 투수성이 매우 좋은 지질특성을 가지고 있어 대부분 평상시 물이 흐르지 않는 건천의 형태를 유지하고 있으며, 대부분 경사가 급한 남북사면에 위치하고 있다(Kang, 2014).

본 연구에서는 도심을 통과하며 과거 태풍 ‘나리’ 내습 시 하천 범람에 의해 피해가 발생했던 외도천을 연구대상 유역으로 선정하였다(Fig. 1). 외도천의 지역특성인자를 분석한 결과 유역면적 44.64 km², 유로연장 20.56 km, 유역평균폭 2.17 km, 형상계수는 0.106로 분석되었다(Table 1).

2.2. RAIDOM 기법을 활용한 강우자료 추출

RAIDOM 기법은 영상정보를 특정 수치데이터로 변환하는 기법으로, 영상으로부터 추출된 RGB 정보를 록업테이블의 정보와 서로 맵핑(Mapping)하여 특정 수치데이터를 얻을 수 있다. 이는 이미지 상 출력되는 각 픽셀의 색상을 RGB 조합(0~255)에 따라 16,777,216개의 데이터로 나타낼 수 있는 원리를

Table 1. Basin characteristics of Oedo stream

Stream	Area(km ²)	Length(km)	Mean width of basin(km)	Shape factor
Oedo	44.64	20.56	2.17	0.106

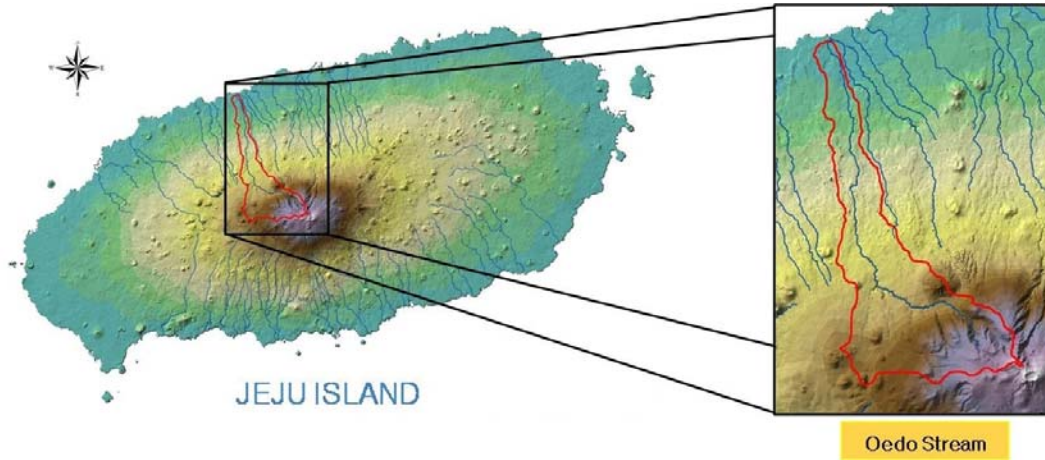


Fig. 1. Location of the Oedo stream in Jeju Island.

이용한 기법이다.

RAIDOM 기법을 이용하여 특정 수치데이터로 변환하기 위한 과정은 다음과 같다. 우선, 영상입력장치에 촬영된 영상을 입력하고 할당되는 배열의 크기를 설정한다. 설정된 해당 좌표에서 각 픽셀의 RGB 데이터를 독취 후 임시 저장하고, 해당 룩업테이블과 맵핑하여 해당 픽셀의 수치데이터를 생성한다. 이와 같이 생성된 해당 픽셀의 RGB 데이터 대신 수치데이터를 치환하여 저장 후 출력장치에 출력하여 표출하는 단계로 구분할 수 있다.

본 연구에서는 기상청에서 제공하는 레이더 영상 중 성산 기상대의 CAPPI 영상자료를 활용하여 강우를 생성하였다(Fig. 2).

2.3. G/R 보정기법을 통한 레이더강우 보정

G/R 기법은 MFB (Mean Field Bias) 기법으로 가장 보편적으로 사용되고 있는 레이더 보정 기법이다. MFB 기법 중 다중 매개변수 지상우량계 보정 방법은 레이더 관측 영역 내 다수의 지상우량계(AWS) 자료를 활용하여 지점별 보정계수를 레이더 강우에 적용하는 방법이다. 레이더 강우 보정을 위해 본 연구에서

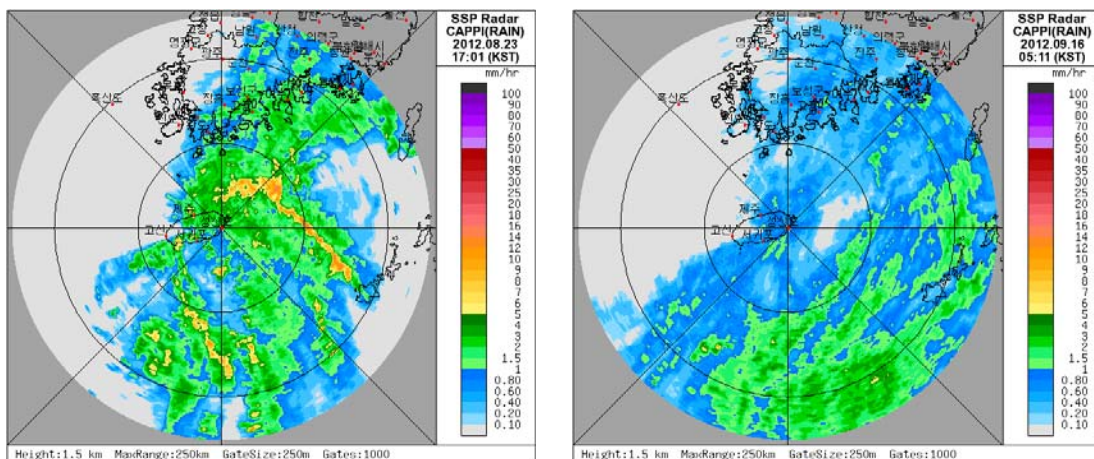


Fig. 2. Event rainfall analysis of raw forecasting data based on CAPPI radar image processing.

적용하고 기상청에서도 사용되고 있는 다중 매개변수 지상우량계 보정 방법에 대한 식은 다음과 같다.

$$R_{adj} = R_{ori} \times \bar{C}$$

R_{adj} 는 평균 보정계수를 사용한 보정 레이더 강우량, R_{ori} 는 보정 전 레이더 강우량, \bar{C} 는 보정계수를 의미한다. 여기서 보정계수 \bar{C} 는 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$\bar{C} = \frac{\sum \frac{C_i}{D_i}}{\sum \frac{1}{D_i}}$$

C_i 는 지점별 보정계수, D_i 는 지상우량계 지점과 레이더 격자 간 거리를 의미한다.

G/R 보정 기법은 동일 격자 내에 존재하는 지상관측 강우의 합과 레이더 강우 합의 비를 의미한다. 즉 지상우량관측소가 다 지점에 고루 분포하고 관측소 간 거리가 가까울 경우 보다 정확한 결과 값을 산정할 수 있다. 제주도는 내륙지역과는 달리 지상우량관측소가 조밀하게 분포되어 있어 G/R 보정 기법 적용 시 보다 효과적인 연구결과를 얻을 수 있다. 연구대상 유역인 외도천의 경우 유역면적 44.64 km², 유로연장 20.56 km로 내륙 하천과 비교 시 크지 않은 유역임에도 강우 보정 시 지상우량관측소 4개소의 자료를 활용하였다.

2.4. 분포형 모형에 의한 홍수량 산정

Vflo는 미국의 Vieux & Associates사에서 개발한 프로그램으로서 레이더 강우 시스템, GIS 수리수문모델 솔루션을 제공하는 물리적 인자 기반의 분포형 모형이다. 이 모형은 격자기반의 수문 모형으로 소유역이라는 인위적인 구분 없이 일정한 크기의 정사각형으로 세분된 각 지점별 물리적 특성치나 매개변수를 입력하게 되므로 공간적인 변화를 적절히 반영할 수 있다.

본 연구에서는 분포형 모형인 Vflo를 활용하여 연구대상 유역인 외도천 유역의 홍수량 산정 시 30 m × 30 m 정사각형 모양의 격자망으로 분할하여 분석을 실시하였다. Vflo 모형을 활용한 매개변수 적용 시 DEM (Digital Elevation Model) 자료를 활용한 격자별 하천의 흐름방향(Flow direction), 경사도(Slope), 하폭(Channel width), 제방경사(Embankment slope)를 구축하였으며, 토지이용도를 이용한 조도계수(Roughness), 불투수율(Impervious), 토양도를 이용한 포화투수계수(Hydraulic conductivity), 습윤선단(Wetting front suction head), 유효공극률(Effective porosity), 유효토심(Soil depth) 등 자료 구축 후 적용하였다(Table 2).

국가수자원관리 종합정보시스템에서 제공하는 DEM 자료와 토지이용도, 토양도 자료를 활용하여 대상유역의 매개변수를 30 m × 30 m 정사각형 격자망으로 구축하였으며, Vflo 입력형태인 ASCII 파일 형식으로 변환하였다. 토양도 및 토지 이용도는 Vieux(2004)가 제시한 재분류 기준표를 활용하여

Table 2. List of using Vflo parameters data in Oedo watershed

Classification	Input data	Transform type
DEM (Digital Elevation Model)	- Flow direction - Slope - Channel width - Embankment slope	
Land use	- Roughness - Impervious	ASCII
Soil map	- Hydraulic conductivity - Wetting front suction head - Effective porosity - Soil depth	

Table 3. Observed discharge of Oedo stream

No.	Time of occurrence	Rainfall events	Antecedent rainfall
1	2012. 07. 18 ~ 07. 19	Typhoon "KHANUN"	X
2	2012. 08. 23 ~ 08. 24	Severe rainstorm	X
3	2012. 09. 16 ~ 09. 17	Typhoon "SANBA"	X

Vflo 매개변수로 재구축하였다.

강우자료의 경우 기상청에서 제공하는 레이더 영상인 CAPPI 자료를 활용하였으며, 성산 기상대에서 관측된 레이더 영상 자료를 활용하여 강우를 생성하였다. 생성된 레이더 강우자료는 G/R 기법을 통하여 보정하였으며, AWS를 활용한 면적강우량과 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

분포형 모형인 Vflo를 활용하여 홍수유출량을 산정하였으며, 유출해석 정확도를 비교하기 위해 집중형 모형(HEC-HMS)과 현장관측 자료(FSIV)와 비교하였다. 강우자료는 현장관측을 통하여 획득한 2012년 호우사상(태풍 ‘카눈’, 집중호우, 태풍 ‘산바’) 자료를 활용하였다(Table 3).

3.1. 호우사상별 레이더 영상자료의 강우 보정

제주도 대부분의 하천은 한라산을 기준으로 남북 사면으로 형성되어 있다. 연구대상 유역인 외도천 유역은 한라산 부근에서 시작되기 때문에 상·하류 부근의 강우량 차이가 크게 나타난다. 이에 따라 지상우량 관측자료(AWS)를 활용한 면적강우량 산정 시 일반적으로 Thiessen 다각형법을 사용하고 있으나, 본 연구에서는 산간지역에 많은 비가 내리는 강우분포 특성을 고려할 수 있는 등우선법을 활용하여 연구대상 유역의 면적강우량을 산정하였다. 또한 RAIDOM 기법으로 레이더 영상자료(CAPPI)의 강우를 수치데이터로 추출하였으며, G/R 기법을 통하여 레이더 강우를 보정하였다. 2012년 7월 태풍 ‘카눈’, 8월 집중호우, 9월 태풍 ‘산바’ 사상에 대한 외도천 유역의 면적강우량을 Fig. 3과 같이 30분 간격으로 분석하였다.

레이더 영상으로부터 강우자료를 추출한 결과 지

상우량관측 자료와 큰 오차가 발생하였으며 보정 전 레이더 강우는 지상우량관측 자료에 비해 낮게 산정되고 있다.

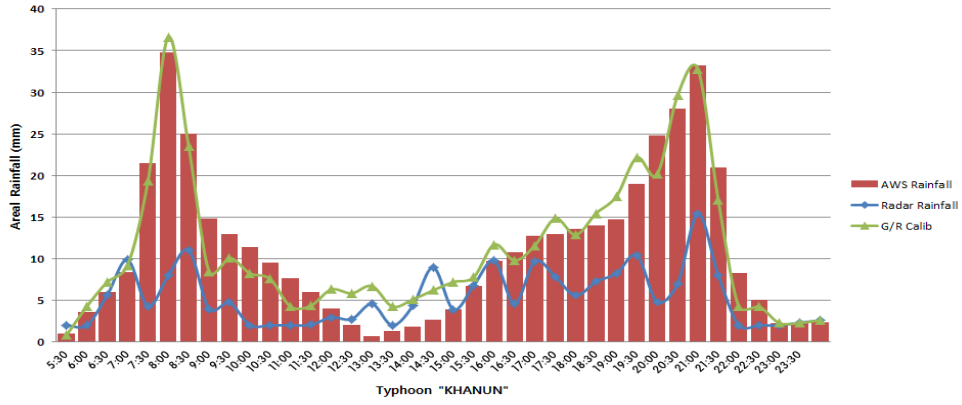
외도천 유역의 레이더 강우와 지상우량관측 자료를 비교한 결과 태풍 ‘카눈’의 경우 최대 26.82 mm의 오차가 발생하였고 RMSE 9.3656, 결정계수(R^2) 0.3866으로 분석되었다. 집중호우 때는 최대 17.7 mm의 오차와 RMSE 8.1618, 결정계수는 0.8837로 분석되었으며, 태풍 ‘산바’는 최대 51.2 mm의 오차가 발생하였고 RMSE 18.0948, 결정계수는 0.6848로 분석되어 다소 낮은 상관관계를 보였다(Fig. 4).

G/R 보정 기법을 적용한 강우와 지상우량관측 자료 간 비교분석 결과 태풍 ‘카눈’의 경우 RMSE 2.6954 와 결정계수(R^2) 0.9115, 집중호우의 경우 RMSE 2.5703, 결정계수는 0.9202, 태풍 ‘산바’는 RMSE 2.1569, 결정계수는 0.9842로 분석되어 매우 높은 상관관계를 보였다(Fig. 4).

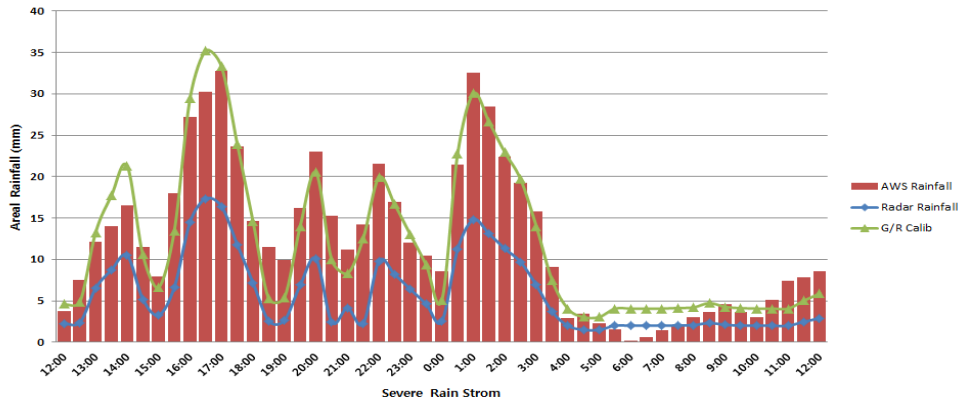
3.2. 분포형 모형의 홍수 유출량 비교·분석

2012년 발생한 호우사상들 중 3가지 사상에 대하여 Vflo 모형을 이용한 유출 모의를 실시하였으며, 모형에 대한 유출해석 비교를 위해 집중형 모형인 HEC-HMS과 현장관측 자료(FSIV)를 이용하였다. 유출사상별 홍수량을 비교한 결과는 Table 4와 Fig. 5에 나타났다.

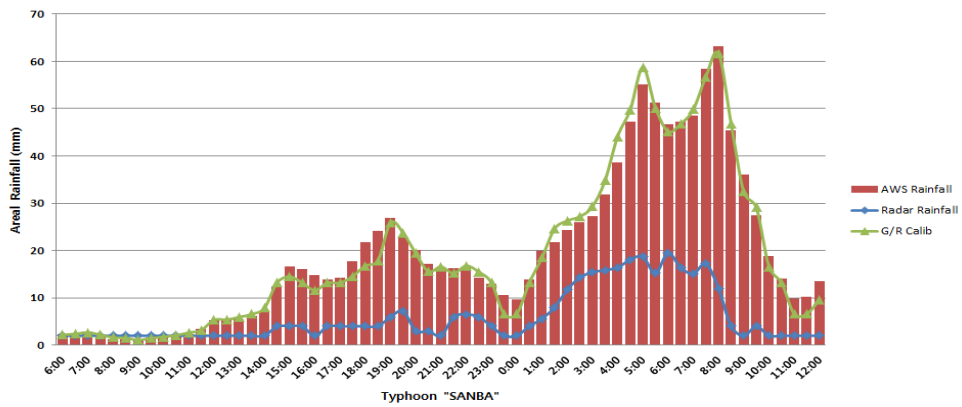
현장관측 자료(FSIV)를 기준으로 태풍 ‘카눈’의 경우 첨두 유량이 발생한 시간은 7월 18일 22시로 동일하였으나, 현장관측 유량 값에 비해 Vflo 첨두 유량 값은 15.05 cms, 8.49% 과다하게 산정되었다(Fig. 5 (A)). 집중호우의 경우 현장관측 자료의 첨두시간과 Vflo로 분석된 첨두시간은 8월 24일 14시로 동일하였으나 HEC-HMS 모델링 결과는 1시간 뒤인 15시에 첨두 유량이 발생하였다. 첨두 유량은 현장관측 값에 비해



(A) Typhoon 'KHANUN'

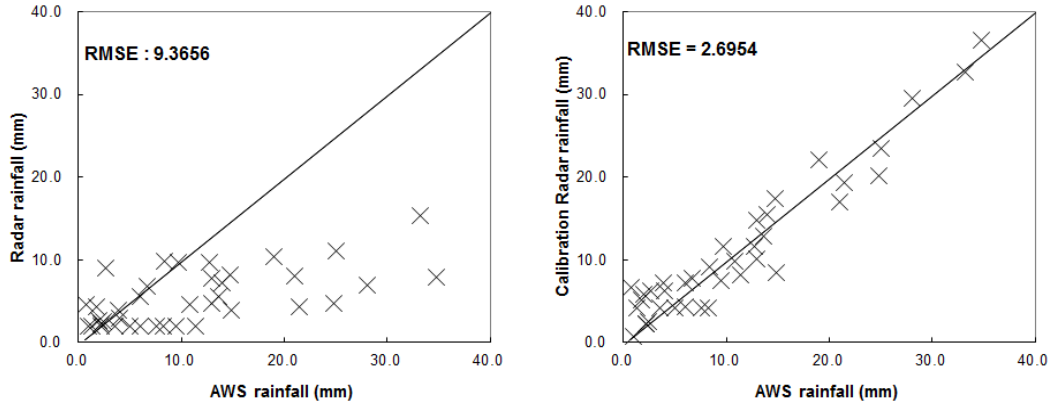


(B) Severe rainstorm

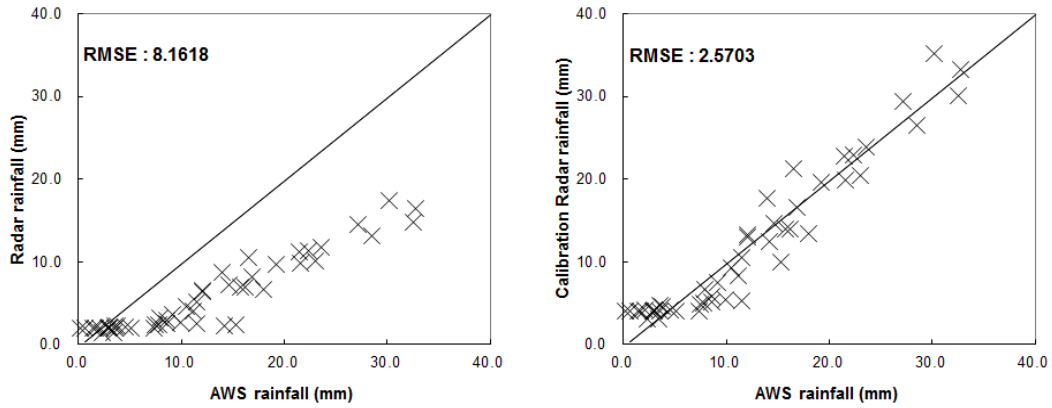


(C) Typhoon 'SANBA'

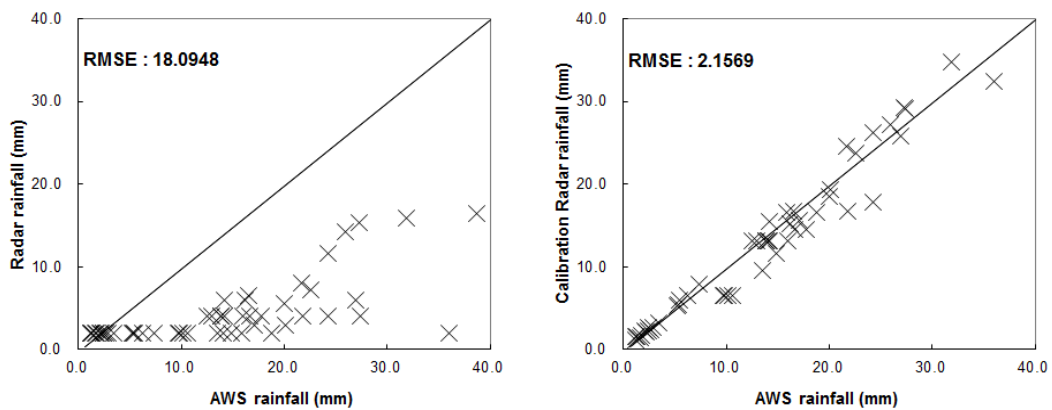
Fig. 3. Comparison different type of areal rainfall analysis.



(A) Typhoon 'KHANUN'

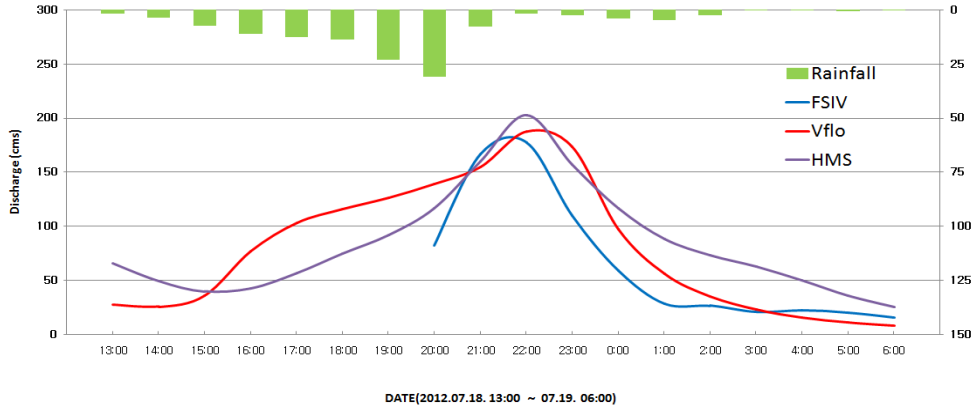


(B) Severe rainstorm

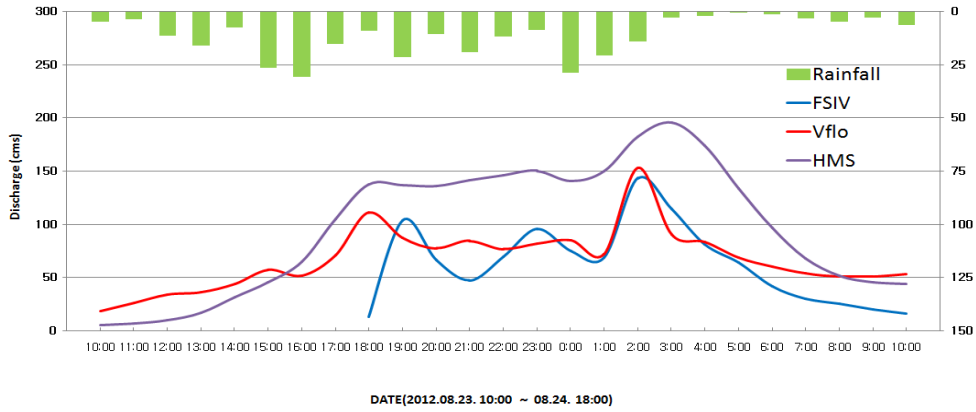


(C) Typhoon 'SANBA'

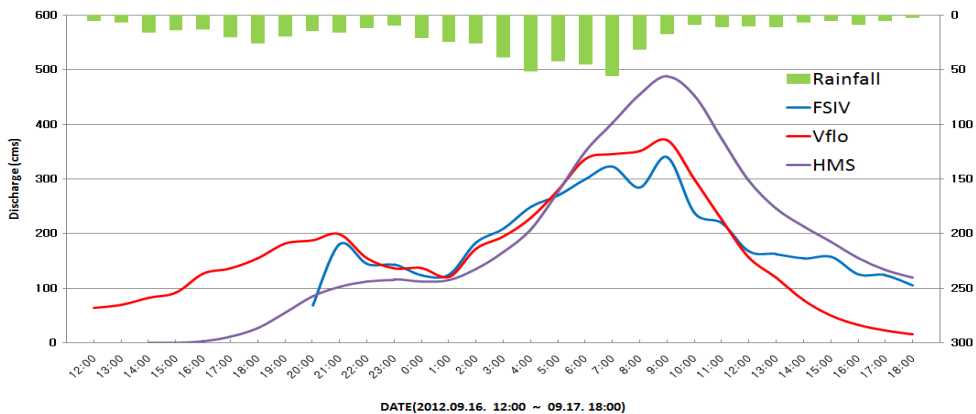
Fig. 4. Comparison different type of areal rainfall analysis.



(A) Typhoon 'KHANUN'



(B) Severe rainstorm



(C) Typhoon 'SANBA'

Fig. 5. Comparison different type of rainfall analysis.

Table 4. Compare the discharge measurement of rainfall

Events		FSIV	HEC-HMS	Vflo
Typhoon KHANUN	Peak runoff (cms)	177.19	202.75	187.70
	Peak time (Date, hr)	7/18 22:00	7/18 22:00	7/18 22:00
Severe rainstorm	Peak runoff (cms)	143.53	195.55	152.98
	Peak time (Date, hr)	8/24 14:00	8/24 15:00	8/24 14:00
Typhoon SANBA	Peak runoff (cms)	330.82	488.03	370.64
	Peak time (Date, hr)	9/17 09:00	9/17 09:00	9/17 09:00

Vflo로 분석한 침투 유량이 9.45 cms, 6.58% 과다 산정되었다(Fig. 5(B)). 태풍 ‘산바’의 침투 유량 발생 시간은 9월 17일 09시로 동일하였으며, Vflo 침투 유량 값이 관측 유량에 비해 39.82 cms, 11% 과다 산정되었다(Fig. 5(C)).

2012년에 발생한 3가지 호우사상에 대한 유출 분석 결과 Vflo 모형을 활용한 홍수량 결과 값이 과다 산정되었다. 제주도는 타 지역에 비해 투수성이 높은 수문학적 특성을 갖고 있어 호우 발생 시 이론적 투수계수와 상이하게 나타나며 도달시간에도 영향을 주고 있어 홍수량 산정 시 오차가 발생하는 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 HEC-HMS를 활용한 유출 분석에서도 나타나고 있으며 제주도 특성에 맞는 정확한 홍수량 산정을 위한 연구가 현재 진행 중이다.

4. 결론

집중호우 및 태풍의 발생이 잦고 강우 발생량이 증가함에 따라 홍수 피해의 위험도 증가하기 때문에 정확한 홍수량 산정을 통한 홍수저감 계획을 수립하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 분포형 모형을 활용한 홍수량 산정방법의 정확도를 높이기 위하여 레이더 영상자료로부터 추출되는 강우 데이터를 보정하였다. 또한 투수성이 높은 지역에서 Vflo 모형을 활용한 홍수량 산정 방법의 정확도를 비교하기 위해 외도천 유역을 대상으로 HEC-HMS와 현장관측 자료(FSIV)를 비교·분석한 결과는 다음과 같다.

RAIDOM 기법으로 레이더 영상자료로부터 강우를 추출하여 지상우량관측 자료와 비교한 결과 태풍 ‘카눈’은 RMSE 9.3656, 결정계수(R^2) 0.3866, 집중호우는 RMSE 8.1618, 결정계수 0.8837, 태풍 ‘산바’

는 RMSE 18.0948, 결정계수 0.6848로 분석되어 다소 낮게 산정되었으나, G/R 기법을 통한 강우 보정 후 태풍 ‘카눈’은 RMSE 2.6954와 결정계수 0.9115, 집중호우는 RMSE 2.5703, 결정계수 0.9202, 태풍 ‘산바’는 RMSE 2.1569, 결정계수 0.9842로 분석되어 레이더 강우를 활용한 연구가 충분히 가능성을 나타냈다.

분포형 모형인 Vflo의 매개변수 구축 시 국가수자원관리 종합정보시스템에서 제공하는 DEM 자료와 토지이용도, 토양도 자료를 활용하였으며, 제주도는 유역의 크기가 30 m × 30 m 정사각형 격자망으로 구축하였다. 토양도 및 토지 이용도는 Vieux(2004)가 제시한 재분류 기준표를 활용하여 재구축하였다.

2012년에 발생한 3가지 호우사상(7월 태풍 ‘카눈’, 8월 집중호우, 9월 태풍 ‘산바’)에 대한 홍수유출을 비교·분석한 결과 현장관측 자료(FSIV)에 비해 Vflo의 침투유량이 8.49 ~ 11% 과다하게 산정되었다.

본 연구를 통하여 제주도 지역에서 집중형 모형뿐만 아니라 분포형 모형을 활용한 홍수량 산정이 충분히 가능할 것으로 판단되나, 보다 정확한 홍수유출량 산정을 위해 제주도 수문 특성을 반영할 수 있는 매개변수 보정 및 연구가 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 제주대학교 교원성과지원 사업에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

Eulogio, P. I., 1998, Comparison of geo-statistical methods for estimating the areal average climatological rainfall

- mean using data on precipitation and topography, *International Journal of Climatology*, 18, 1031-1047.
- Goovaerts, P., 2000, Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall, *Journal of Hydrology*, 228, 113-129.
- Hong, J. B., Kim, B. S., Yoon, S. Y., 2006, Evaluation of accuracy of the physics based distributed hydrologic model using Vflo model, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 26(6B), 613-622.
- Jung, W. Y., Yang, S. K., 2009, Simulation of runoff of rivers in Jeju island using SWAT model, *Journal of the Environmental Sciences*, 18(9), 1045-1055.
- Kang, B. S., Yang, S. K., Jung, W. Y., Kim, Y. S., 2014, Calculation of the flood runoff of the river with imaging equipments, *Journal of the Environmental Sciences*, 23(4), 585-594.
- Kim, B. S., Kim, B. G., Kim, H. S., 2009, Parameter sensitivity analysis of Vflo model in Jungnang basin, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 29(6B), 503-512.
- Park, J. H., 2007, Flood runoff analysis using radar rainfall and Vflo model for Nangang Dam watershed, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 10(3), 13-21.
- Vieux&Associates, INC., 2010, Vflo™ 6.0 User's Guide.
- Vieux, B. E., 2004, *Distributed hydrologic modeling using GIS*, Second Edition, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Vieux, B. E., Bedient, P. B., Mazroi, E., 2005, Real-time urban runoff simulation using radar rainfall and physics-based distributed modeling for site-specific forecasts, 10th International Conference on Urban Drainage.
- Yang, S. K., 2007, River management and improvement measures of Jeju island, *River & Culture*, Korea River Association, 3(4), 104-115.
- Yang, S. K., Kim, D. S., Jung, W. Y., Yu, K., 2011, Analysis and comparison of stream discharge measurements in Jeju Island using various recent monitoring techniques, *Journal of the Environmental Sciences*, 20(6), 738-788.
- Yoon, Y. N., Kim, J. H., Yoo, C. S., 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*, 35(1), 1-12.