



Evaluation and complementation of observed flow in the Hancheon watershed in Jeju Island using a physically-based watershed model

Kim, Chul Gyum^{a*} · Kim, Nam Won^a

^aHydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

Paper number: 16-086

Received: 7 October 2016; Revised: 27 October 2016; Accepted: 27 October 2016

Abstract

This study was conducted to evaluate observed runoff data collected every 10 minutes at stream gauging stations in Jeju Island using a physically-based model, SWAT. The Hancheon watershed was selected as study area, and ephemeral stream algorithm suggested by previous research was incorporated into the model, which is able to simulate ephemeral runoff pattern of Jeju streams. Simulated runoff and runoff rates were compared to observations during 2008-2013, which showed 'very good' performance rating in Nash-Sutcliffe model efficiency (ME) and determination coefficient (R^2). Some observations had problems such that runoff rates were very high for some rainfall events with little amount of antecedent rainfall, and were very low or missing with much rainfall comparing to previous researches. Additionally, regression equation between precipitation and simulated runoff was generated with high degree of correlation. The equation can be utilized to simply predict reasonable runoff, or to investigate and complement the abnormal or missing data of observations on the assumption that modelling results were sufficiently reliable and satisfactory. As results, minimizing the error in calibrating the model by evaluation of observed data would be helpful to accurately model the rainfall-runoff characteristics and analyze the water balance components of watersheds in Jeju Island.

Keywords: Jeju Island, Streamflow, Runoff rate, Watershed model, SWAT

유역모형을 활용한 제주도 한천 유역의 관측유량 평가 및 보완

김철겸^{a*} · 김남원^a

^a한국건설기술연구원 수자원하천연구소

요 지

본 연구에서는 제주도의 한천 유역을 대상으로 유역모델링 기법으로 많이 활용되고 있는 SWAT 모형을 이용하여 실시간 관측되고 있는 하천유량의 신뢰성과 활용성을 평가하였다. 평상시 거의 건천의 형태를 나타내는 간헐하천 특성을 고려하기 위하여 기존 연구에서 검증되었던 간헐하천 모의 알고리즘을 적용하였으며, 2008~2013년을 대상으로 유역별 관측사상과 모의사상을 비교·분석하였다. 모형효율과 결정계수를 통해 모형 적용성을 평가한 결과, 보정기간에 대해 모형효율(ME) 0.88, 결정계수(R^2) 0.93, 검증기간에 대해서는 각각 0.79와 0.89로서 매우 양호한 것으로 분석되었다. 모의치와 관측치의 차이가 크게 나타나는 일부 사상들에 대한 검토 결과, 강수량에 비해 관측유출률이 너무 크거나 낮은 경우가 있었는데 이는 기존 호우시 유출률 및 모델링 결과와 비교할 때 관측유량의 계측 및 수위-유량 산정과정에서의 오류의 가능성을 예상할 수 있었다. 이러한 관측유량에 대한 보완을 위해 모의자료를 이용하여 강수량과 유출량 간의 회귀관계를 도출하였으며, 2009~2010년을 대상으로 회귀식을 적용한 결과 유역모델링에 의한 모의유량과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서, 모델링 결과가 충분한 신뢰성을 보장한다는 가정 하에, 유도된 회귀식을 활용하여 신뢰성 있는 유출량을 간편하게 예측할 수 있으며, 관측자료의 결측치나 이상치를 즉각적으로 검증하는 데에도 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서와 같이 관측자료의 검증 및 결측치에 대한 보완을 통하여 모형 적용시 보정과정에서의 오류를 최소화함으로써 제주도 지역의 독특한 유출 특성을 고려한 정교한 모델링과 물수지 분석에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어: 제주도, 관측유량, 유출률, 유역모형, SWAT

*Corresponding Author. Tel: +82-31-910-0545
E-mail: cgkim@kict.re.kr (C. G. Kim)

1. 서론

제주도 지역은 화산암류로 이루어진 지형 및 지질조건의 특이성으로 인해 내륙의 일반적인 하천유역과는 전혀 다른 유출 특성을 나타낸다. 제주도 중심에 위치한 한라산의 영향으로 하천의 경사가 급하고 투수성이 커서 특정규모 이상의 호우에만 유출이 발생하고, 평상시에는 일부 하천의 하류구간을 제외하고는 대부분 건천의 형태를 이루고 있다. 최근 20년간(1992~2011년)의 분석 결과에 의하면(JSSGP, 2013), 강수량의 44.5%가 지하수로 함양되며, 직접유출에 의한 평균 유출률은 22.1%로 우리나라 평균인 58% (MLTMA, 2011)에 비해 상당히 낮게 제시되고 있다. 또한 지역별로는 강수량이 많은 남부지역의 유출량 및 유출률이 북부보다 높은 것으로 나타난다.

제주도 하천의 유출 특성에 대한 연구는 과거 관측자료를 중심으로 분석되어 오다가 2008년 이후부터는 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et al., 1993) 모형과 같은 유역모델링 기법을 이용하여 다각도로 분석이 수행되고 있다. SWAT 모형의 경우 제주지역의 독특한 유출 특성과 지하수를 중심으로 하는 수자원 이용 특성을 고려하기 위해, 기존 모형을 개선한 제주형 SWAT-MODFLOW 모형(Kim et al., 2009), 한계유출 모의기법(Chung et al., 2011), 간헐하천 모의기법(Kim et al., 2013a) 등이 새롭게 개발되어 적용된 바 있다.

그러나, 기존 제주도 유출 모델링 연구들의 대부분은 특정 연도의 제한된 관측유량에 대한 보정이어서 다양한 강우 및 유출 특성을 고려한 보정이 이루어졌다고 보기 힘들다. 예를 들면, 처음으로 제주도 4개 하천(천미천, 외도천, 옹포천, 연외천)에 SWAT을 적용하였던 Jung (2008)은 천미천과 외도천 유역 보정에서 각각 2회, 7회 관측한 순간유량을 일 모의유량과 비교하였고, 옹포천과 연외천은 평상시 관측유량(각각 33회, 23회)을 비교함으로써, 제주도 하천의 간헐적 유출형태를 제대로 보정하지 못한 것으로 판단된다. 이후 수행된 Han (2009), Kang et al. (2013), Lee et al. (2015)의 연구에서도 순간 관측유량을 일 모의유량과 비교하고 있다. 반면, Chung et al. (2011), Kim et al. (2013a, 2013b), Jung et al. (2013), Kim et al. (2015)은 일평균으로 환산된 관측유량과 모의된 일 유량을 비교함으로써 강우시 및 비강우시 연속적인 자료에 대한 보정을 수행한 바 있다. 그러나, 대부분 관측자료에 대한 충분한 평가가 이루어지지 않은 채 보정이 수행된 것으로 보인다. Jung et al. (2013)은 제주특별자치도에서 관측하는 10분 단위 유출자료를 활용하여 화북천 유역의 SWAT 모델링 보정에

활용한 바 있으나, 해당기간 동안의 관측유출률이 0.8~35.8%(연간 평균 3.74%)로서 기존 제시되고 있는 20% 내외의 유출률과 비교할 때 매우 낮은 것으로 판단된다. 이는 보정에 의한 모의유량을 작게 유도함으로써 모델링을 통한 수자원 평가에 오류를 범할 수도 있음을 의미한다.

따라서, 제주도 지역의 독특한 유출해석을 위한 모델링 기법도 중요하지만, 모델링 결과의 활용성을 제고하기 위해서는 보정에 활용되는 자료, 대표적으로 관측유량에 대한 평가가 선행되어야 할 것이다. 제주특별자치도에서는 도내 주요 하천 24개 지점과 5개 배수로를 대상으로 총 29개의 유량관측소를 운영 중이며, 강우시를 중심으로 실시간 관측유량 자료를 확보하고 있다. 이들 관측소에서는 10분 단위로 수위와 유속을 동시에 측정하여 단면적으로부터 유량자료를 계산하는 한편, 일부 결측된 자료에 대해서는 관측자료에서 도출된 수위-유량 관계로부터 유량을 추정하고 있다.

본 연구에서는 한천 유역을 대상으로, 실시간 관측되고 있는 하천유량 자료와 유역모델링 기법을 이용한 모의자료의 비교를 통해 관측유량 및 유출 특성을 평가하고, 관측유량의 검증 및 보안을 위한 유역모델링 기법의 활용방안을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 대상유역

분석에 필요한 관측자료의 가용성을 고려하여 기존에 JDI (2010)의 연구를 통해 실시간 관측유량을 이용하여 유출 특성 분석이 수행되었던 한천 유역을 대상유역으로 선정하였다. 대상유역 하류에 위치한 한천교(한천-1 수위관측소)를 기준으로 유역면적은 34.6 km²이며, 최장 유로연장은 19.95 km,

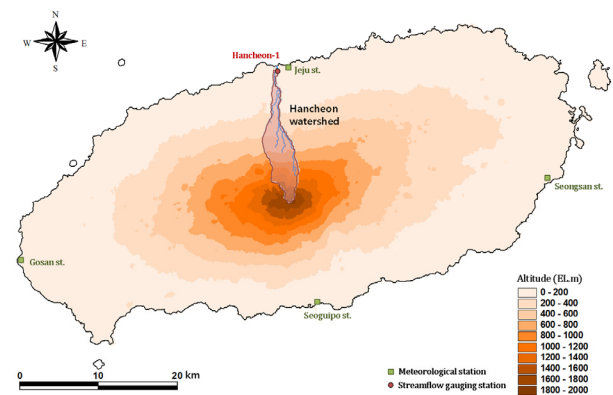


Fig. 1. Location of the study area

유역의 평균경사는 0.05 m/m이다. Fig. 1은 대상유역 및 한천-1 수위관측소 위치를 나타낸 것이다.

Table 1은 2008~2013년에 관측된 호우사상을 대상으로 강수량과 유출률을 정리한 것으로, 관측사상의 수는 총 53개이며, 사상별 강수량의 규모를 볼 때 최소 50 mm 이상에서 유출이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 기존 연구들(Jeju Province and KOWACO, 2003; JDI, 2009; Chung et al., 2011)에서 제시하는 것처럼 일정규모 이상의 호우시에만 유출이 발생하는 제주도 하천유역의 한계유출 특성으로 볼 수 있다. 관측자료에 의한 호우시 평균 유출률은 32.1%로 나타났다.

2.2 유역모델링 기법

그간 제주도 지역에 수문해석 및 유출량 모의를 위해 적용된 모형은 많지 않으며, 2008년 이후 Jung (2008)을 시작으로 SWAT 및 SWAT-K를 중심으로 한 유역모형 적용에 대한 연구가 수행되고 있다. 제주도 지역에서는 Kim et al. (2009)에 의해 SWAT-K 모형이 처음으로 적용되어 표현 유역에서의 유출 특성을 모델링 한 바 있으며, 이후 Chung et al. (2011, 2015), Kim and Lee (2013), Kim et al. (2013a, 2013b, 2014, 2015)에 의해 한천, 가마천, 송천, 천미천, 외도천, 강정천 등 다양한 하천유역에 적용된 바 있다.

한천 유역에서의 유출 모델링에 대한 기존 연구의 대부분 또한 SWAT을 적용한 연구로서, Chung et al. (2011)이 한계 유출 모의기법을 개발한 바 있으며, Kim et al. (2013b)이 지하수 변동 특성 해석, Kim and Lee (2013)이 실제증발산량 평가, Kim et al. (2014)이 함양지체시간에 대한 경험식 도출, Kim and Kim (2015)이 고도에 따른 증발산량 및 용수량 특성을 해석한 바 있다.

상기 연구들 중에서 Kim et al. (2013a)이 제시한 간헐하천 모의기법은 토양수분의 정도에 따라 중간유출 발생을 억제하고 연직방향의 침투 및 침루를 지배적으로 발생하도록 관련

알고리즘을 수정한 것으로서, 평상시에는 거의 건천의 형태를 보이다가 일정규모 이상의 강우시에만 유출이 발생하는 제주도 하천유역의 유출 특성을 모의하는데 적합한 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서도 이 방법을 적용하여 대상유역에 대해 SWAT 모델링을 구축하였다.

모형 입력자료 중 강수량과 잠재증발산량 산정에 필요한 온도, 풍속, 습도 자료는 지역별, 고도별 영향을 고려하기 위하여 Kim et al. (2012)이 적용한 PRISM 기법에 의해 생산된 격자별 자료를 소유역별 평균값으로 재산정하여 적용하였다. 태양복사량은 Angstrom 공식(Allen et al., 1998)을 이용하여 제주도에 위치한 4개 기상대(제주, 고산, 성산, 서귀포)의 관측 일조시간으로부터 환산하여 적용하였다.

3. 연구결과

3.1 모형 적용성 평가

Table 1에 제시된 것처럼, 관측사상이 비교적 많은 2010~2011년의 관측자료를 이용하여 보정을 수행하였으며, 2008년과 2012~2013년의 3개년 자료를 이용하여 모형 적용성을 검증하였다. 2009년 자료는 관측된 9개 사상의 면적평균 유량이 5.7 mm로 너무 작고 유출률 또한 너무 낮게 나타나 비교에서 제외하였다.

Fig. 2는 2010~2011년에 대해 호우가 주로 발생하는 5월부터 9월까지의 관측 및 모의 수문곡선을 나타낸 것으로, 일부 결측구간을 제외하고 대체로 관측치와 모의치가 유사한 경향을 나타내고 있다. 2010~2011년의 26개 호우사상에 대해 모의 정확성을 평가한 결과, Nash-Sutcliffe 모형 효율(Nash and Sutcliffe, 1970) $ME=0.88$, 결정계수 $R^2=0.93$ 으로서 매우 높은 것으로 분석되었다.

Fig. 3은 구축된 모형의 적용성을 평가하기 위해 나머지 기간인 2008년과 2012~2013년에 대해 적용한 결과로서 호우

Table 1. Observed rainfall events and runoff rates for the Hancheon watershed

| Year | Annual rainfall (mm) | No. of events | Area-average rainfall (mm) | | | Observed runoff rate (%) | | |
|------|----------------------|---------------|----------------------------|-------|-------|--------------------------|------|------|
| | | | Min. | Max. | Mean | Min. | Max. | Mean |
| 2008 | 1,783 | 4 | 77.4 | 157.2 | 110.9 | 1.0 | 26.9 | 13.1 |
| 2009 | 2,276 | 9 | 54.2 | 127.1 | 85.7 | 1.4 | 22.2 | 6.6 |
| 2010 | 3,297 | 16 | 66.3 | 285.0 | 124.4 | 0.7 | 43.4 | 18.5 |
| 2011 | 2,969 | 10 | 61.9 | 404.6 | 151.9 | 0.7 | 60.7 | 29.5 |
| 2012 | 3,848 | 8 | 80.8 | 563.5 | 251.9 | 5.5 | 98.4 | 65.8 |
| 2013 | 2,052 | 6 | 78.2 | 305.1 | 130.9 | 2.0 | 33.2 | 21.0 |

가 많이 발생한 5월~9월의 수문곡선을 비교한 것이다. 대상 기간의 총 18개 호우사상에 대해 관측치와 모의치의 모형효율과 결정계수를 산정한 결과, 각각 $ME=0.79$ 와 $R^2=0.89$ 로서 매우 양호한 것으로 나타났다.

기존에 수행되었던 한천 유역에 대한 유출 모델링에서는, Chung et al. (2011)이 2008~2010년의 20여개 사상을 대상으로 모의치의 통계적 특성을 분석하여 모형효율(ME) 0.71, 결정계수(R^2) 0.74의 값을 도출한 바 있으며, Kim et al. (2013b)의 연구에서는 2008~2010년의 호우사상 유출량에 대해 결정계수(R^2) 0.56의 결과를 제시하였다.

Moriasi et al. (2007)에 의하면 유역 모형 적용시 월별 단위 모의에 대해 모형효율이 0.75 초과일 경우 ‘very good’으로 평가하고 있는데, 본 연구에서는 일유량을 비교한 것이기에 매우 높은 적용성을 가진다고 판단할 수 있다. 또한, 본 연구에서 제시하는 보정 및 검정 결과 모두 기존 연구들에서 제시한 통계치보다 높은 것으로 나타나, 기존 연구들에 비해 모델링 결과의 신뢰성을 좀 더 보장한다고 판단할 수 있다.

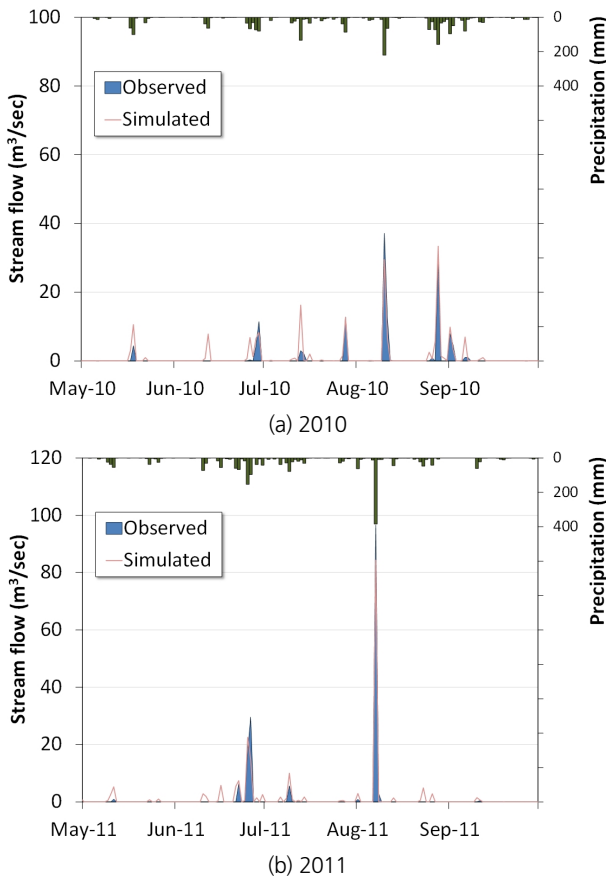


Fig. 2. Observed and simulated streamflows during May to September (2010-2011)

Fig. 4는 SWAT 모의자료와 JNU (2015)에서 제시된 Kalesto 및 CCTV 기기로 관측한 유출량에 대해 유출률을 비교한 것으로서, 방법에 따라 결과에 다소 차이가 있으나 SWAT이 사상별 홍수량이 아닌 일 단위의 장기유출을 모의하는 모형임을 감안할 때 관측치의 경향과 유사하다고 판단할 수 있다. 또한, 분석기간인 2008~2013년에 대한 53개 사상의 모의유출률이 5.8~65.7%(평균 33.7%)로서, Table 2와 같

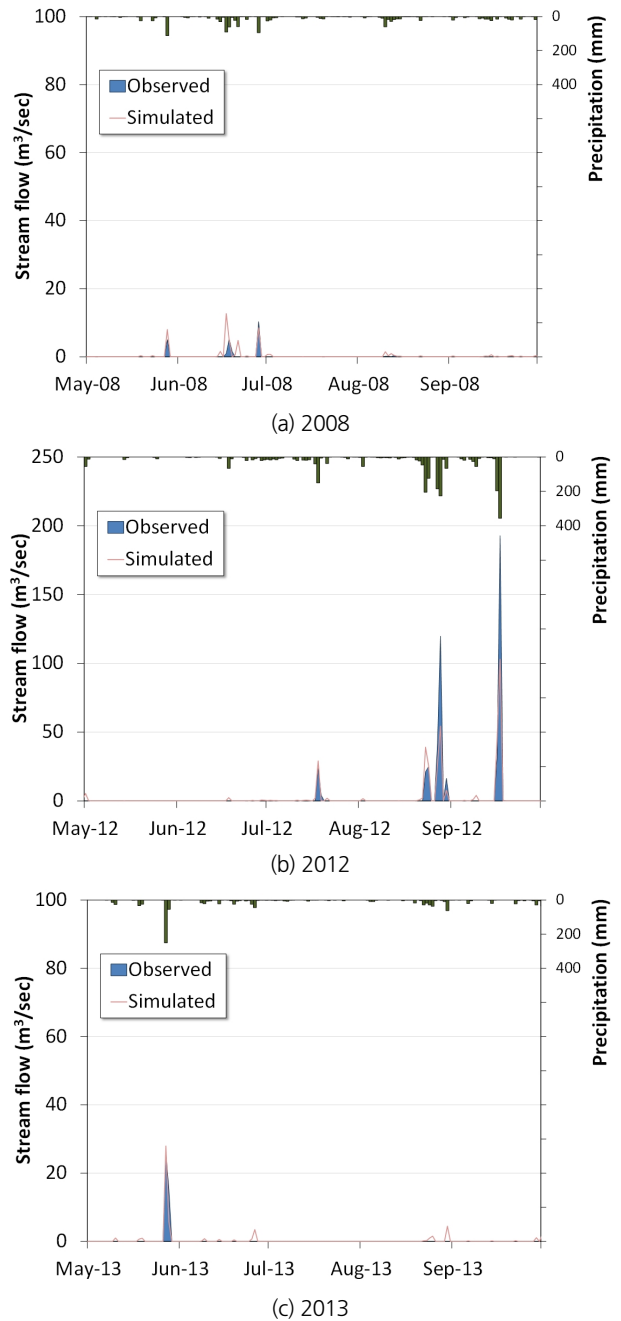


Fig. 3. Observed and simulated streamflows during May to September (2008, 2012-2013)

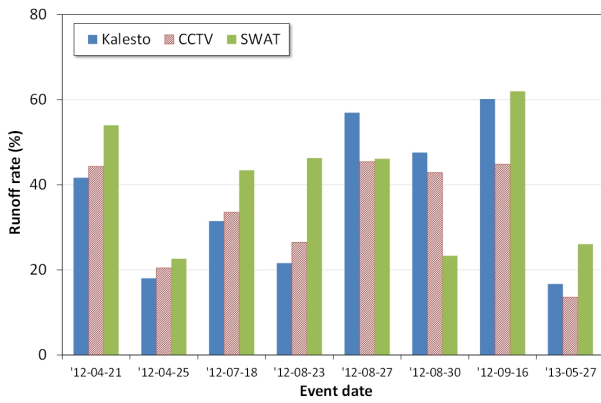


Fig. 4. Comparison of observed and simulated runoff rates

이 한천 유역에 대해 관측되었던 홍수시 유출률인 38.5%(Jeju Province and KOWACO, 2003), 22.3~47%(Yang et al., 2014), 13.5~45.4%(JNU, 2015)와 비교했을 때, SWAT에 의한 모의치가 대상유역의 유출 특성을 잘 반영한다고 볼 수 있다.

3.2 관측유량 평가 및 보완

Fig. 5는 강수량과 유출률의 관계를 나타낸 것으로, 약 200 mm 이하의 강수량에 대해서는 관측유출률이 모의유출률보다 낮게 나타난 반면, 400 mm 이상의 강우사상에 대한 유출률은 관측치가 더 높은 것으로 분석되었다. 그러나 이때의 관측유출률이 거의 100%에 가깝게 나타나고 있는데, 제주도 하천 유역의 간헐적 유출특성을 감안할 때 다소 높은 수치로 판단된다.

또한, 제주도 하천의 불규칙한 하상조건 및 독특한 유출특성(간헐하천, 한계유출, 높은 침투능 등)으로 인해 관측되는 강우-유출 관계가 내륙의 하천보다 복잡하게 나타나고 있으며, 모의치 또한 모델링을 통해 지형적·지질학적 조건, 기상조건, 유출현상을 고려하고 있기 때문에 동일한 강수량에 대해 유출률 차이가 크게 나타나고 있다. 특히, 50 mm의 호우를 전

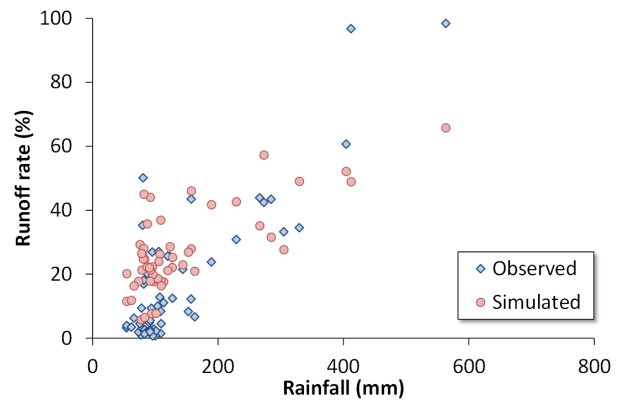


Fig. 5. Observed and simulated runoff rates vs. rainfall amounts

후하여 유출이 발생하는 한계유출 특성으로 인해 50~100 mm 구간의 강수량에 대해 유출률 변화가 더 크게 나타나는 것으로 판단된다.

Table 3은 분석기간 중 관측치와 모의치의 차이가 크게 나타나는 일부 사상의 유출량 및 유출률을 비교한 것으로서, 결국 2009-07-06, 2009-09-29, 2010-06-11, 2011-06-10 사상을 비롯하여 모의치와 큰 차이를 보이는 2009-05-20, 2010-05-17, 2010-06-25, 2010-07-12, 2010-09-05 사상의 경우 100 mm 이상의 많은 강수량에도 불구하고 관측유량이 없거나 매우 낮은 것으로 분석되고 있다. 반면, 2012-08-27과 2012-09-15 사상은 관측유출률이 거의 100%에 근접하는 것으로 나타났는데, 이는 앞서 Fig. 4에서 살펴본 바와 같이 동일 사상에 대한 타 연구(JNU, 2015)에서의 관측유출률이 각각 45.4~57.0%와 44.9~60.2%로 제시된 것으로 볼 때, 관측유량 측정과정이나 수위-유량 관계로부터 유량을 도출하는 과정에서 오류의 가능성을 예상할 수 있다.

한편, 대상유역인 한천의 중상류에는 지하수 인공함양 및 홍수저감의 목적으로 한천 제1, 제2 저류지가 설치되어 2010년 5월부터 호우시 하천수 일부를 유입시키고 있다. 이에 따라 2010년 5월 이후부터의 하류측 유출량은 저류지로 인해 일정

Table 2. Previous studies on runoff rates of the Hancheon watershed

| Reference | Year | No. of events | Area-average rainfall (mm) | | | Observed runoff rate (%) | | |
|---------------------------------|-----------|---------------|----------------------------|-------|-------|--------------------------|------|------|
| | | | Min. | Max. | Mean | Min. | Max. | Mean |
| Jeju Province and KOWACO (2003) | 2002 | 1 | - | - | 702.9 | - | - | 38.5 |
| Yang et al. (2014) | 2012 | 5 | 131.0 | 855.8 | 432.8 | 22.3 | 47.0 | 39.4 |
| JNU (2015) | 2012-2014 | 12 | 33.8 | 802.1 | 318.7 | 13.5 | 45.4 | 32.5 |

부분 감소된 상태로 볼 수 있다. 따라서, 저류지 설치에 따른 관측유량의 감소로 모의유량과 차이가 발생할 가능성도 있다. 그러나, 본 연구에서는 앞선 Fig. 2~4에서 나타난 것처럼 2010년 이후의 일부사상에서 관측치에 비해 모의치가 낮게 나타나고 있어 저류효과에 대한 명확한 분석이 쉽지 않다. 저류지에 의한 홍수조절 효과를 분석하기 위해서는 기존 연구 (Park and Moon, 2011; Moon et al., 2014)와 같이 호우발생 기간에 대해 상하류 지점에서의 정확한 하천유량 관측은 물론 실시간 저류지 유입량 관측을 통한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

상기와 같이 일부 결측된 유량자료 또는 이상치에 대한 보완을 위해, 모델링 결과가 충분한 신뢰성을 보장한다는 전제 하에 모의자료를 활용하여 강수량과 유량의 관계를 도출하였다. Fig. 6은 관측사상을 대상으로 강수량과 모의유량의 관계를 분석한 것으로서, 아래와 같은 회귀식을 유도하였다.

$$Q = 0.0131 P^{1.605} \tag{1}$$

여기서, Q 는 사상별 유량(m^3/s), P 는 강수량(mm)이다.

유도된 관계식에서 결정계수(R^2) 0.81의 높은 상관성을 얻었으며, F-검정에 의한 Significance F (P-value)가 0.05보다 작은 값을 보임에 따라, 유도된 회귀식은 유의수준 5% 이내 (즉, 신뢰수준 95% 이상)에서 적합한 것으로 나타났다.

Fig. 7은 2008~2013년 50 mm 이상의 호우사상 중 미세측

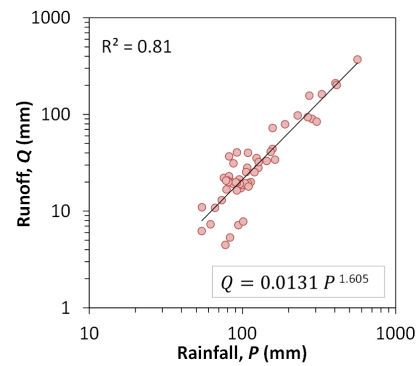


Fig. 6. Relationship between rainfall and runoff

된 유출사상을 대상으로 SWAT에 의한 모의유량과 회귀식에 의한 예측유량 및 신뢰구간을 나타낸 것으로, 모의유량 모두 95% 신뢰구간에 포함되는 것으로 분석되었다.

아래 Fig. 8은 앞서 Table 3에서 분석한 것처럼 관측치와 모의치의 차이가 크게 나타났던 2009년과 2010년에 대해 관측 유량을 대상으로 회귀식을 이용하여 결측치 및 이상치를 보정한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 회귀식을 활용하여 보정된 유출량이 유역모델링 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 유출이 발생하는 50 mm 이상의 강우에 대하여 Eq. (1)의 회귀식을 이용함으로써, 유역모델링을 수행하지 않아도 신뢰성 있는 유출량을 간편하게 산정할 수 있으며, 한편으로 실시간 수위-유속자료를 이용하여 관측유량을 산정하는 과정에서 결측치나 이상치를 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3. Comparison of observed and simulated runoff

| Start date of rainfall event | Rainfall (mm) | Runoff (mm) | | Runoff rate (%) | |
|------------------------------|---------------|-------------|-------|-----------------|------|
| | | Obs. | Sim. | Obs. | Sim. |
| 2008-06-17 | 157.2 | 19.2 | 43.9 | 12.2 | 27.9 |
| 2009-05-20 | 108.7 | 1.6 | 19.4 | 1.4 | 17.9 |
| 2009-07-06 | 124.1 | - | 16.9 | - | 13.6 |
| 2009-09-29 | 121.6 | - | 20.1 | - | 16.5 |
| 2010-05-17 | 163.0 | 10.9 | 34.1 | 6.7 | 20.9 |
| 2010-06-11 | 103.4 | - | 21.4 | - | 20.7 |
| 2010-06-25 | 100.4 | 0.8 | 18.6 | 0.7 | 18.5 |
| 2010-07-12 | 152.7 | 12.7 | 41.1 | 8.3 | 26.9 |
| 2010-09-05 | 109.5 | 4.9 | 17.9 | 4.5 | 16.4 |
| 2011-06-10 | 104.1 | - | 11.9 | - | 11.4 |
| 2012-08-27 | 412.3 | 399.0 | 201.6 | 96.8 | 48.9 |
| 2012-09-15 | 563.5 | 554.4 | 370.3 | 98.4 | 65.7 |

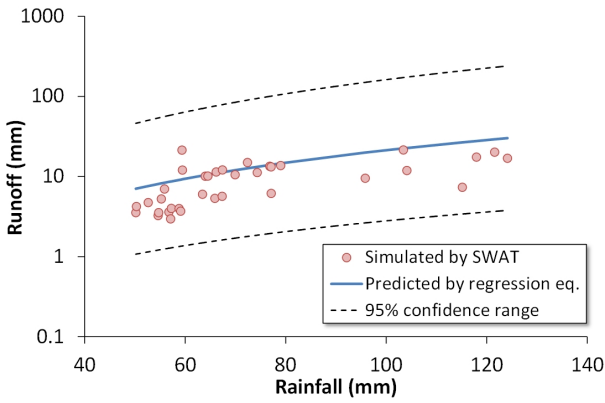


Fig. 7. Range of the 95% confidence interval and simulated runoff data

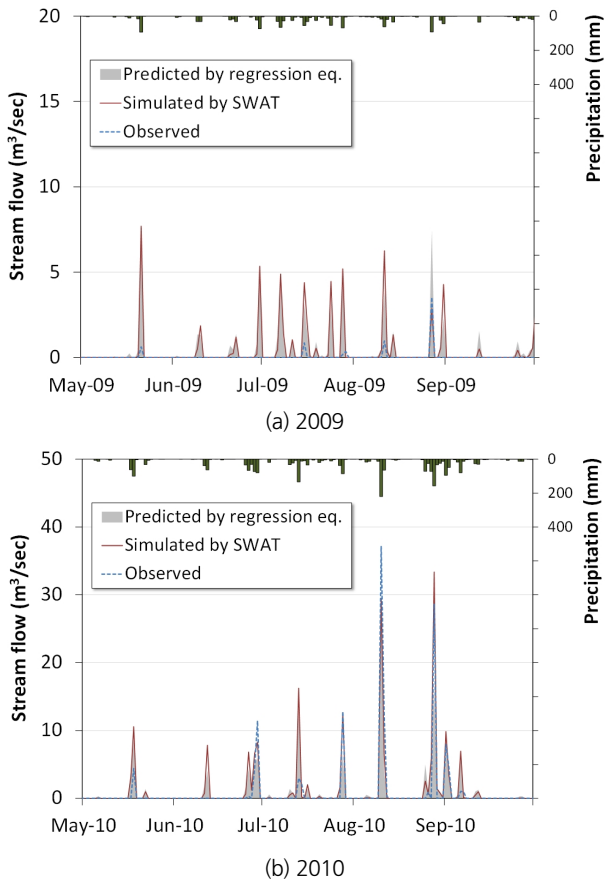


Fig. 8. Comparison of predicted and simulated streamflows

4. 결론

특정규모 이상의 집중호우에 대해서만 유출을 나타내는 제주도 하천의 유출 특성을 고려한 모델링을 위해서는, 독특한 지형적 특성과 다양한 강우-유출 특성을 고려할 수 있는 모

델링 기법, 그리고 모델링 결과의 신뢰성을 확보하기 위한 충분한 관측자료가 필요하다. 본 연구에서는 한천 유역을 대상으로 기존 유역모델링 기법으로 많이 활용되었던 SWAT 모형의 적용성을 평가하는 한편, 모델링 결과를 이용하여 실시간 관측되고 있는 하천유량에 대한 평가 및 보완방안을 제시하였다.

평상시 거의 건천의 형태를 나타내는 간헐하천 특성을 고려하기 위하여 기존 연구에서 검증되었던 간헐하천 모의 알고리즘을 적용하여, 2008~2013년을 대상으로 관측사상과 모의사상을 비교·분석하였다. 먼저 관측사상의 경우 최소 50 mm 이상에서 유출이 발생하는 것으로 나타났으며, 일정규모 이상의 큰 강우에만 유출이 발생하는 제주도 하천의 한계유출 특성을 확인할 수 있었다. SWAT에 의한 유역 모델링 결과의 적용성을 평가한 결과, 보정과 검증기간에 대해 모형효율은 0.88과 0.79, 결정계수는 0.93과 0.89로서 매우 양호한 것으로 분석되었다. 또한, 타 연구에서 제시하는 한천 유역의 관측유출률과도 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타나 모델링 결과가 기존의 유출 특성을 잘 반영함을 알 수 있었다.

모의치와 관측치의 차이가 크게 나타나는 일부 호우사상을 분석해본 결과, 100 mm 이상의 큰 호우에도 매우 낮은 유출률을 보이거나 결측된 경우도 많았으며, 반대로 일부 관측사상의 유출률이 100%에 근접하는 경우가 있었다. 이는 모델링 결과의 문제일 수도 있으나, 기존 연구 및 문헌들에서 제시되고 있는 유출률과 비교했을 때 관측유량 계측 및 산정과정에서의 오류의 가능성도 예상할 수 있다. 한편으로는 저류지 설치에 따른 관측유량의 감소로 모의유량과 차이가 발생할 가능성도 있으나 관측치에 비해 모의치가 낮게 나타나는 사상들도 있어 저류지 영향에 대한 명확한 분석은 곤란하였다. 이러한 관측자료의 보완을 위해 강수량과 모의유량 자료를 활용하여 상관성 높은 회귀관계를 유도하였고, 미계측된 호우사상을 대상으로 검토한 결과 모의유량이 모두 95% 신뢰구간에 포함되는 것으로 분석되었다. 2009년과 2010년을 대상으로 회귀식을 적용한 결과 유역모델링에 의한 모의유량과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서, 모델링 결과가 충분한 신뢰성을 보장한다는 가정 하에, 유도된 회귀식을 활용하여 신뢰성 있는 유출량을 간편하게 예측할 수 있으며, 관측자료의 결측치나 이상치를 즉각적으로 검증하는 데에도 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 제시하는 모의유량 및 강수량-유출량 관계식의 활용성을 제고하기 위해서는 무엇보다 관측자료와의 검증이 필수적이다. 그러나, 분석한 바와 같이 일정규모 이상의 호우시에만 유출을 나타내는 제주도 하천의 지형 및 지질학적

특성으로 인해 정교한 관측자료의 확보가 쉽지 않으며, 내륙 지역과 같은 정교한 유역수문모델링 또한 어려운 것이 현실이다. 본 연구에서 검증한 바와 같이 수문모델링 결과의 신뢰성이 일정수준 보장된다면, 모델링 결과를 통하여 유도된 강수량-유출량 관계를 통하여 관측자료의 평가 및 보완이 가능하며, 타 유역에 대해서도 동일한 방법으로 기존 자료에 대한 검증 및 결측자료의 보완 등에 활용할 수 있을 것이다. 또한 모형 적용시 보정과정에서의 오류를 최소화함으로써 모델링 결과를 이용한 수자원 평가나 계획 등에 있어서 신뢰성 및 정확성을 제고시킬 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술 지역특성화사업 「제주권 국토교통기술 지역거점 센터」의 연구비지원(과제 번호 : 16RDRP-B076272-03)에 의해 수행되었습니다.

References

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper 56)*. Food and Agriculture, Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Arnold, J. G., Allen, P. M., and Bernhardt, G. (1993). "A comprehensive surface-groundwater flow model." *Journal of Hydrology*, 142, pp. 47-69.
- Chung, I. M., Lee, J., and Kim, N. W. (2015). "Estimation of interception in Cheonmi watershed, Jeju Island." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 35, No. 4, pp. 815-820.
- Chung, I. M., Lee, J., Kim, J. T., Na, H., and Kim, N. W. (2011). "Development of threshold runoff simulation method for runoff analysis of Jeju Island." *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 20, No. 10, pp. 1347-1355.
- Han, U. G. (2009). A runoff simulation using SWAT model depending on changes to land use. Thesis for Degree of Master, Jeju National University.
- Jeju Development Institute (JDI) (2009). Basic Research on Hydrological and Water Quality Characteristics for Utilization of Stream Runoff. Political Research 2009-11, JDI.
- Jeju Development Institute (JDI) (2010). Basic Research on Hydrological and Water Quality Characteristics for Utilization of Stream Runoff. Political Research 2010-3, JDI.
- Jeju National University (JNU) (2015). Water cycle analysis and establishment of water resources infrastructure in Jeju Island. Ministry of Land, Infrastructure and Transport & Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, R&D-14CRTI-B056997-05.
- Jeju Province and Korea Water Resources Cooperation (KOWACO) (2003). Comprehensive Investigation of Hydrogeology and Groundwater Resources in Jeju Island (Ⅲ). Jeju Province.
- Jeju Special Self-Governing Province (JSSGP) (2013). The water management comprehensive plan for Jeju Special Self-Governing Province (2013-2022).
- Jung, W. Y. (2008). Simulation of runoff of rivers in Jeju Island using SWAT model. Thesis for Degree of Master, Jeju National University.
- Jung, W. Y., Yang, S. K., and Lee, J. H. (2013). "Characteristics of runoff on urban watershed in Jeju Island, Korea." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 22, No. 5, pp. 555-562.
- Kang, M. S., Yang, S. K., Jung, W. Y., and Kim, D. S. (2013). "Characteristics of runoff on southern area of Jeju Island, Korea." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 22, No. 5, pp. 591-597.
- Kim, C. G., and Kim, N. W. (2015). "Altitudinal pattern of evapotranspiration and water need for upland crops in Jeju Island." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 11, pp. 915-923.
- Kim, N. W., and Lee, J. E. (2013). "Assessment of actual evapotranspiration in the Hancheon watershed, Jeju Island." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 22, No. 5, pp. 533-542.
- Kim, N. W., Chung, I. M., and Na, H. (2013a). "A method of simulating ephemeral stream runoff characteristics in Cheonmi-cheon watershed, Jeju Island." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 22, No. 5, pp. 523-531.
- Kim, N. W., Chung, I. M., and Na, H. (2015). "An integrated water budget analysis of Oedocheon watershed in Jeju Island." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 24, No. 4, pp. 471-480.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Yoo, S. Y., and Lee, J. (2009). "Analysis on the groundwater usage in Pyoseon area by using the integrated SWAT-MODFLOW model." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, pp. 1939-1944.
- Kim, N. W., Na, H., and Chung, I. M. (2013b). "Simulation of groundwater variation characteristics of Hancheon watershed in Jeju Island using integrated hydrologic modeling." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 22, No. 5, pp. 515-522.
- Kim, N. W., Na, H., Chung, I. M., and Kim, Y. J. (2014). "Empirical formula of delay time for groundwater recharge in the representative watersheds, Jeju Island." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 9, pp. 743-752.
- Kim, N. W., Um, M. J., Chung, I. M., and Heo, J. H. (2012).

- “Estimating the total precipitation amount with simulated precipitation for ungauged stations in Jeju Island.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 9, pp. 875-885.
- Lee, J. H., Yang, S. K., and Kim, M. C. (2015). “Runoff analysis of climate change scenario in Gangjung basin.” *Journal of Environmental Science International*, Vol. 24, No. 12, pp. 1649-1656.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2011). National Comprehensive Water Resources Plan (2011-2020). MLTMA.
- Moon, D. C., Jung, K. S., Park, W. B., and Kim, Y. C. (2014). “An evaluation of the flood control effect according to the Hancheon reservoir operation.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 2, pp. 107-117.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., and Veith, T. L. (2007). “Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.” *Transactions of ASABE*, Vol. 50, No. 3, pp. 885-900.
- Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V. (1970). “River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles.” *Journal of Hydrology*, 10, pp. 282-290.
- Park, W. B., and Moon, D. C. (2011). “Effects of downstream flood possibility reducing after Han-reservoir operation.” *Journal of Jeju Development Research*, 15, pp. 203-221.
- Yang, S. K., Kim, D. S., and Jung W. Y. (2014). “Rainfall-runoff characteristics in a Jeju stream considering antecedent precipitation.” *Journal of Environmental Science International*, Vol. 23, No. 4, pp. 553-560.