

ORIGINAL ARTICLE

## 제주 천미천 유역의 간헐하천 유출특성 모의 방안

김남원 · 정일문\* · 나한나

한국건설기술연구원 수자원연구소

### A Method of Simulating Ephemeral Stream Runoff Characteristics in Cheonmi-cheon Watershed, Jeju Island

Nam-Won Kim, Il-Moon Chung\*, Hanna Na

Water Resources Research Dept., Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Gyeonggi-do, 411-712, Korea

#### Abstract

In this study, a method of simulating ephemeral stream runoff characteristics in Jeju watershed is newly suggested. The process based conceptual-physical scheme is established based on the SWAT-K and applied to Cheonmi-cheon watershed which shows the typical pattern of ephemeral stream runoff characteristics. For the proper simulation of this runoff, the intermediate flow and baseflow are controlled to make downward percolation should be dominant. The result showed that surface runoff simulated by using the modified scheme showed good agreement with observed runoff data. In addition, it was found that the estimated runoff directly affected the groundwater recharge rate. This conceptual model should be continuously progressed including rainfall interception, spatially estimated evapotranspiration and so forth for the reasonable simulation of the hydrologic characteristics in Jeju island.

**Key words** : SWAT-K, Ephemeral stream, Cheonmi-cheon, Intermediate flow

#### 1. 서론

제주도는 연평균 2,000mm에 달하는 많은 비가 내리는 지역임에도 불구하고 투수성이 높은 지질특성으로 인하여 발달된 하천이 없고, 하천유출은 오직 40-50mm 집중호우 시에만 짧게 발생하는 것으로 알려져 있다 (Jeju Development Institute, 2009). 한편 유출과 관련한 연구는 관측의 어려움 때문에 거의 이루어지지 못하다가 1990년대 후반 제주특별자치도 수자원관리본부에서 제주도 주요하천에 대하여 수위 관측 및 유량측정을 실시하면서 하천과 관련한 연구가 활발해지기 시작했다 (Moon 등, 2005; Jeju Do

and Korea Water Resources Corporation., 2003; KIGAM and Jeju special self-governing province, 2005; Ha 등, 2008; Jung과 Yang, 2008).

하지만 관측유량자료를 확보한다 하더라도 내륙과는 상이한 낮은 유출률과 높은 함양률을 갖는 제주지역의 유출해석을 수행하는 데 있어 기존의 연속 유출 수문모형은 여러 가지 한계를 가진다. 그 원인은 두 가지로 요약할 수 있는 바, 첫째 제주 지역의 경우 일정한 강수량 또는 토양 수분 함수량에 도달하기 전까지는 지표 및 중간유출이 발생하지 않으므로 이를 분석하는데 기존 유출모의 패러다임으로는 설명이 불가하기 때문이다. 유역별로 일정규모 이상의 강우가 발생

Received 14 November, 2012; Revised 11 March, 2013;

Accepted 9 April, 2013

\*Corresponding author : Il-Moon Chung, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Gyeonggi-do 411-712, Korea  
Phone: +82-31-910-0334  
E-mail: imchung@kict.re.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.

할 때에만 간헐적으로 유출이 발생하는 제주도 하천의 특성을 모의하기 위해서 통합수문모델링 기법(Kim 등, 2009)과 선행강우 조건에 따른 제주형 한계 유출 모의기법(TRSM)이 제시된 바 있다(Chung 등, 2011). 둘째, 강우에 의해 토양수분을 거친 수량은 중간유출과 기저유출을 통해 지표수로 배출되어야 하나 제주도의 대부분 지역에서는 장기간에 걸쳐 대수층으로 함양되는 고유한 매질특성을 보인다. 이에 본 연구에서는 기존의 SWAT 모형(Arnold 등, 1993)을 개선한 SWAT-K 모형(Kim 등, 2009)을 기반으로 간헐하천 모의를 위한 프로세스 중심의 개념적 물리적 방법을 제시, 제주 천미천 유역에 시험 적용하고자 한다.

## 2. 연구재료

본 연구에서 활용하고자 하는 SWAT-K(Korea) 모형은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Arnold 등 (1993)에 의해 개발된 준 분포형 장기 유역 수문모형 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)을 우리나라 특성에 맞도록 인위적, 자연적인 물순환 구조변화와 지표수-지하수 연계 해석(Kim 등, 2008) 등을 개선하여, 강우 · 증발산 · 토양수분 · 지표수 · 지하수의 시공간적 분포를 정량적으로 산정하는 장기유출 해석 모형이다. 특히 국내 토양통 DB를 자체적으로 구축하고 유출 구조를 개선한 한국형 모형이라고 할 수 있다(Kim 등, 2009). SWAT에서 모의되는 수문순환은 다음과 같은 물수지 방정식에 근거하여 일별로 모의된다.

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서,  $SW_t$ 와  $SW_o$ 는 각각 주어진 날의 최종 및 초기 토양 수분량(mm H<sub>2</sub>O),  $t$ 는 시간(일),  $R_{day}$ 는 강수량(mm H<sub>2</sub>O),  $Q_{surf}$ 는 지표유출량(mm H<sub>2</sub>O),  $E_a$ 는 증발산량(mm H<sub>2</sub>O),  $W_{seep}$ 는 토양면으로부터 투수층으로의 투수되는 총량(mm H<sub>2</sub>O),  $Q_{gw}$ 는 회귀수량(mm H<sub>2</sub>O)이다. SWAT 모형에서는 지표유출량 산정을 위해 SCS 유출곡선법과 Green & Ampt 침투법의 두 가지 방법을 제공하고 있으며, 증발산량 산정을 위

해서는 Penman-Monteith 방법, Priestley-Taylor 방법, Hargreaves 방법의 세 가지 방법이 제시되고 있다(Neitsch 등, 2001). 본 연구에서는 SCS 유출곡선법과 Penman-Monteith 방법을 이용해서 각각의 지표유출량과 증발산량을 계산하였다.

SWAT 모형은 토지이용상태, 토양상태, 경사, 방 향에 따라 수문학적 반응단위를 가지는 동질 유역으로 정의되는 HRU(Hydrological Response Unit)라는 분할개념을 이용하고 있다(Leavesley 등, 1983). 이와 같은 단위로 유역이 구분되면 여러 종류의 작물과 토양에 의한 다양한 증발산, 토양수분, 지하수 함양 등을 반영할 수 있다. 이러한 특징이 준 분포형 모형의 장점으로 각 HRU에서 수문성분의 발생량이 계산되고 유역의 총 유출량을 얻기 위하여 소유역별 하도로 유입된다.

## 3. 연구방법

토양 속으로 침투한 물은 식물에 의한 증산 작용 또는 토양 증발에 의해서 일부 소모되며 중간유출(lateral flow)의 형태로 하천으로 유출되거나 토양층 바닥까지 침투(percolation)되어 비포화대를 거쳐 대수층에 함양된다.

중간유출량은 토양층의 포화수리전도도, 경사장 및 경사 등의 함수인 운동학적 저류모형(kinematic storage model)을 기반으로 식 (1)과 같이 계산된다.

$$Q_{lat} = 0.024 \cdot \left( \frac{2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\psi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (1)$$

여기서,  $SW_{ly,excess}$ 는 토양층에서의 배수 가능한 수분량으로 포장용수량을 초과한 토양수 부분이고,  $K_{sat}$ 는 토양층에 대한 포화 수리전도도(mm/hr),  $\psi_d$ 는 토양층의 배수 가능한 공극율(mm/mm),  $slp$ 는 단위거리 당 표고차인 경사면의 경사,  $L_{hill}$ 는 경사면 길이(m)이다.

연직하향으로의 침투량은 저류추적법(storage routing method)을 이용하여 중간유출량과 동시에 식 (2)로 계산된다.

$$w_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \cdot \left( 1 - \exp \left[ \frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right] \right) \quad (2)$$

여기서,  $w_{perc.ly}$ 는 하부 토양층으로 침투되는 수분량(mm),  $SW_{ly.excess}$ 는 토양층에서 배수 가능한 수분량(mm),  $\Delta t$ 는 시간 간격(hrs),  $TT_{perc}$ 는 침투되는 유하 시간(hrs)이다.

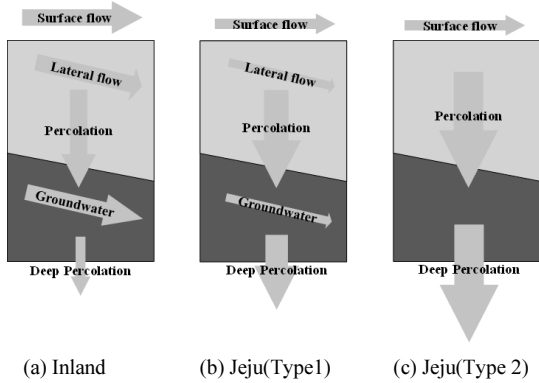


Fig. 1. Schematic diagram of soil layer and shallow/deep aquifers.

내륙지역의 하천유출의 경우는 Fig. 1(a)과 같이 지표면 유출, 중간유출, 지하수 유출 등이 각기 어느 정도 기여하고 있다. 그러나 제주 지역은 큰 호우가 발생한 우기에만 하천유출이 발생하고 평상시에는 하천에 물이 흐르지 않는 간헐하천이 대부분이며, 간헐하천도 우기라 할지라도 기저유출을 구성하는 지하수유출 성분은 물론 중간유출성분도 그 크기가 매우 미약하여 하천유출이 거의 대부분 지표면유출을 차지하고 있다(Fig. 1(b)). 심지어 하천으로의 중간유출 및 지하수유출이 발생하지 않아 하천유출의 전량이 지표면유출에 기인하는 경우(Fig. 1(c))도 많다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1(b)과 그림 Fig. 1(c)처럼 간헐하천을 모의하기 위해서 연직하향으로의 흐름이 지배적으로 발생하도록 토양수분 거동 해석 모듈을 개선하였다. 특히 그림 Fig. 1(c)과 같이 완전히 하천과 대수층이 분리된 하천인 경우에는 중간유출 및 얇은 대수층에서 하천으로의 지하수 유출을 강제 억제시키도록 알고리즘을 수정하였다.

토양층 최하단부를 통과한 물이 얇은 대수층까지 도달하는 지하수 함양량은 시간적 지체, 감쇠를 고려하여 식 (3)과 같이 지수형 감쇠 가중함수(exponential

decay weighting function)로 표현된 작일 함양량과 동일 침투량의 가중합으로 계산된다(Neitsch 등, 2001).

$$w_{chrg,i} = (1 - \exp[-1/\delta_{gw}]) \cdot w_{seep} + \exp[-1/\delta_{gw}] \cdot w_{chrg,i-1} \quad (3)$$

여기서,  $w_{chrg}$ 는  $i$ 일의 대수층 함양량(mm),  $\delta_{gw}$ 는 토양층 바닥을 통과한 침투량이 지하수면에 도달할 때까지의 지체를 모사하기 위한 지체시간(days),  $w_{seep}$ 는  $i$ 일에 토양층의 바닥으로 빠져나가는 수량(mm),  $w_{chrg,i-1}$ 는  $i-1$ 일의 대수층 함양량(mm)이다.

식 (3)은 토양대 아래 비포화대를 하나의 선형저수지로 간주하여 저류량( $S$ )과 유출량( $O$ )간 선형의 관계인  $S=KO$ 를 저류량의 시간적 변화는 유입량( $I$ )과 유출량( $O$ )의 차와 같다는 연속방정식  $dS/dt = I - O$ 에 대입하여 얻은  $O$ 에 관한 1차 상미분방정식의 해이며, 이 때 저류상수  $K$ 가 지체시간  $\delta_{gw}$ , 유입량  $I$ 가 침투량  $w_{seep}$ , 유출량  $O$ 가 함양량  $w_{chrg}$ 가 된다. 지체시간 ( $\delta_{gw}$ )은 지하수면의 심도와 비포화대의 수리지질특성에 따라 좌우되며 이 값을 직접적으로 측정하는 것은 어렵기 때문에 서로 다른  $\delta_{gw}$ 를 사용하여 대수층 함양을 모의하거나 지하수면의 모의 변화값과 실측값을 비교하여 추정할 수 있다. 그러나 식 (3)은 제주지역과 같이 지하수 심도가 깊어 지체시간이 매우 긴 매질에 대해서는 적용상 한계가 있어 이에 대한 개선이 이루어졌다(Chung 등, 2010).

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1. 대상유역 현황

천미천은 제주도에서 가장 긴 하천으로 한라산 동쪽 해발 1,700고지인 흙붉은오름(EL.891m)과 성널오름(EL.1,125m)사이의 협곡에서 발원하여 동류하다가 바다로 유입된다(Namjeju-Gun, 1991). 본 연구에서는 천미천을 중심으로 표준유역 경계까지 확장하여 모델영역을 설정, 16개의 소유역으로 구분하였으며, 각 소유역에 대한 유역특성인자는 Table 1에 나타내었다.

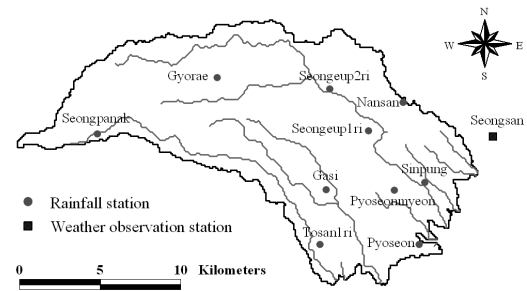
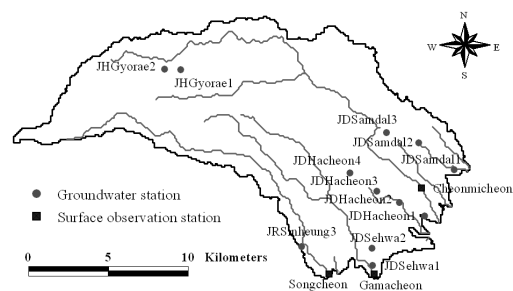
**Table 1.** Characteristic of subwatersheds in Cheonmi-cheon

No.	Area (km <sup>2</sup> )	Main channel length (km)	Main channel Slope (m/m)	Tributary length (km)	Tributary slope (m/m)	Mean elevation (EL.m)
1	27.26	11.314	0.018	14.486	0.020	397.00
2	16.33	10.652	0.028	12.151	0.036	362.00
3	3.54	3.788	0.025	5.258	0.027	65.00
4	8.12	4.247	0.021	7.424	0.026	104.00
5	13.44	11.498	0.028	12.228	0.029	215.00
6	14.41	9.011	0.029	12.306	0.026	179.00
7	6.09	5.919	0.018	7.118	0.019	70.00
8	3.76	2.465	0.017	4.550	0.019	46.00
9	7.91	6.133	0.015	7.499	0.017	61.00
10	6.25	0.283	0.001	5.374	0.017	37.00
11	33.53	24.324	0.037	26.334	0.042	167.00
12	2.55	1.184	0.037	3.405	0.049	60.00
13	16.28	6.303	0.013	9.423	0.018	79.00
14	26.01	5.243	0.030	14.171	0.062	655.00
15	16.05	2.898	0.019	7.072	0.027	204.00
16	29.77	6.377	0.020	15.005	0.015	135.00

#### 4.2. 기상 및 수문자료

제주도 내 운영 중인 82개의 관측소 중 본 연구지역인 천미천유역과 근접한 성산기상청 관할관측소자료와 AWS의 가시, 표선면, 성판악, 재난안전대책본부의 교래, 난산, 성읍1리, 성읍2리, 신흥, 표선, 토산1리의 7개 지점 자료를 이용하여 기상 관측 자료를 구축하였다(Fig. 2). 이 관측자료 중 미세측 기간에 대해 다중선형회귀모형을 이용하여 자료를 생성하였고, PRISM 기법을 적용하여 공간분포시켰다(Kim 등, 2012). 기상자료는 성산관측소의 최근 9년간(2002년~2010년) 연평균 일사량이 14.4MJ/m<sup>2</sup>이며, 연평균 최저기온은 13.6℃이고, 연평균 최고기온은 20.2℃, 연평균 상대습도는 67.8%이며, 연평균 풍속은 3.0m/s로 나타났다.

또한 유출모형의 보정과 검증, 모의결과에 대한 평가를 위해 하천유량자료 및 지하수위 관측 자료가 필요하다. 대상유역에는 Fig. 3과 같이 3개의 지표수 유량관측지점(가마천, 송천, 천미천)이 있으며, 지하수위 관측지점은 총 12개(JD삼달1, JD삼달2, JD삼달3, JD세화1, JD세화2, JD하천1, JD하천2, JD하천3, JD하천4, JH교래1, JH교래2, JR신흥3)이다.

**Fig. 2.** meteorological observatory and rainfall stations.**Fig. 3.** Surface water and groundwater measuring stations.

4.3. 공간특성자료

SWAT모형은 유역의 형상을 나타내는 수치표고모델(Digital Elevation Model; 이하 DEM), 유역 내 토지이용상황을 나타내는 토지이용 또는 토지피복도, 그리고 토양에 대한 특성을 나타내는 토양도 등의 GIS 데이터를 필요로 한다. 본 연구에 구축한 DEM, 토지이용도, 토양도는 다음과 같다.

4.3.1. 수치표고모델(DEM)

DEM은 일반적으로 격자 형태로 만들어져 있으며 각 격자에는 표고값이 입력되어 있다. DEM은 수치지도를 이용하여 구축할 수 있으며, 현대에 들어와서 인공위성영상의 활용도가 높아지면서 위성영상을 활용하여 구축할 수도 있다. 본 연구에서는 모형의 계산시간, 모형결과의 정확도 등을 판단하여 30m 공간해상도를 가지는 DEM을 100m 공간해상도로가공하여 사용하였으며, 대상유역에 대한 DEM은 Fig. 4와 같다.

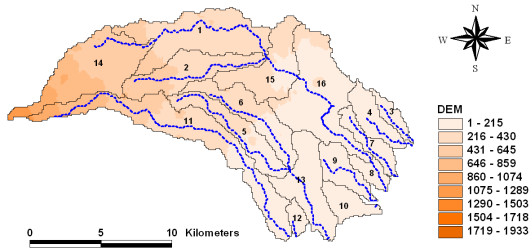


Fig. 4. DEM of Cheonmi-cheon.

4.3.2. 토지이용도

환경부에서는 대분류(1:50,000), 중분류(1:25,000), 세분류(1:5,000)의 해상도에 해당하는 토지이용도를 제공하고 있으며, 본 연구는 이 중 모의 시 다양한 토지이용상태를 반영할 수 있도록 2007년 갱신된 중분류 토지이용도를 사용하였다. Fig. 5는 토지이용도를 DEM의 공간해상도인 100m로 가공한 것을 나타낸 것이다. 목장(PAST)이 전체유역의 약 36.3%, 산림지역(FRSD, FRSE, FRST)이 31.2%로 분포하는 것으로 나타났으며, 그 외로 밭농사 지역(AGRR:16.2%), 과수원(ORCD:12.7%) 순으로 분포한다.

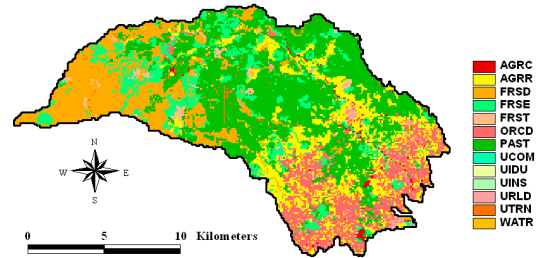


Fig. 5. Land use map.

4.3.3. 토양도

토양도는 농업과학기술원에서 2007년도에 토양도 전산화 사업을 통해 구축된 1:25,000 축척의 정밀토양도를 사용하였다. Fig. 6은 천미천 유역에 대한 정밀토양도를 앞서 토지이용도와 같이 DEM과 동일한 공간

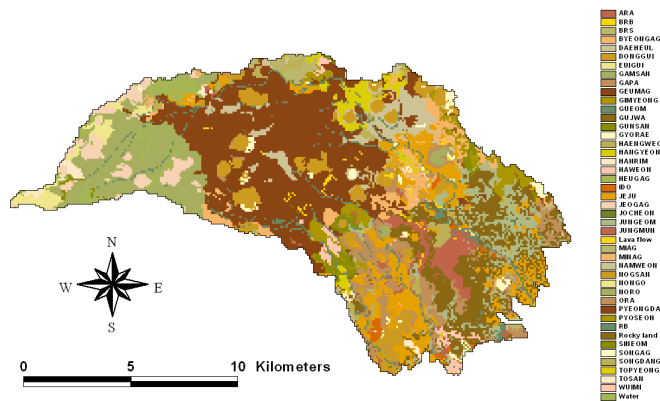


Fig. 6. Soil map.

해상도로 가공한 것으로서, 45개의 토양통으로 구성 되어 있으며, 그 중 PYEONGDAE통이 24%로 가장 많이 분포하고 있으며 GUJWA통이 10%, JEJU통이 8.5%, NORO통이 8.4%, ORA통(5.9%), NOGSAN통(5.2%) 순으로 구성되어 있다.

#### 4.4. 결과분석

천미천 유역의 관측유량을 살펴보면 평상 시 유출이 없고 큰 비가 내렸을 경우 하천에 유출이 발생하는 전형적인 간헐하천의 양상을 보이고 있으며, 지표면 유출성분이 하천유출에 절대적으로 기여하고 있다. 이와 같은 간헐하천 양상을 모의하기 위해서 제주형 간헐하천 모의 기법을 사용하여 중간유출성분 발생을 억제하고 연직하향으로의 침투가 지배적으로 발생하도록 개선하였다. 제주 지역과 같이 연직하향으로 배수가 잘 되는 수리지질학적 특성과 간헐하천의 지하수 유출특성을 모델링으로 구현하기 위해서는 얇은 대수층에서 깊은 대수층으로의 침투량을 결정하는 대수층 침투계수( $\beta_{dep}$ )의 검토정 과정이 중요하다. 본 연구에서 시험 대상유역으로 선정된 천미천 유역은 간헐하천 구간을 포함하는 상류부 소유역에는 침투계수  $\beta_{dep}$ 을 0.7 이상 부여하고 상시하천 구간을 포함하는 하류부 소유역에는 내륙의 유역처럼 대수층 침투계수  $\beta_{dep}$  값을 작게 주어 함양량의 대부분이 얇은 대수층을 거쳐 하천으로 지하수 유출되도록 하였을 때 하천 유출 양상을 잘 나타내는 것으로 분석되었다.

Fig. 7은 제주형 간헐하천 모의 기법을 적용하기 전의 유출수문곡선으로 점선은 관측유출량, 실선은 모의유출량을 나타낸 것이다. 얇은 대수층에서 깊은 대수층으로의 침투를 전량 발생토록 하여 하천으로의 지하수유출을 제어하였음에도 불구하고 여전히 관측 유출량에 비해 모의유출량이 크게 산정되고 있으며, 소규모 강우에는 유출이 거의 발생하지 않고 큰 강우에만 유출이 발생하는 펄스 형태의 유출특성을 나타내지 못하고 있다. 반면에 Fig. 8은 제주형 간헐하천 모의 기법을 적용한 결과로 모의치가 관측치를 잘 따라가고 있으며 간헐하천 양상 또한 잘 구현하고 있음을 알 수 있다.

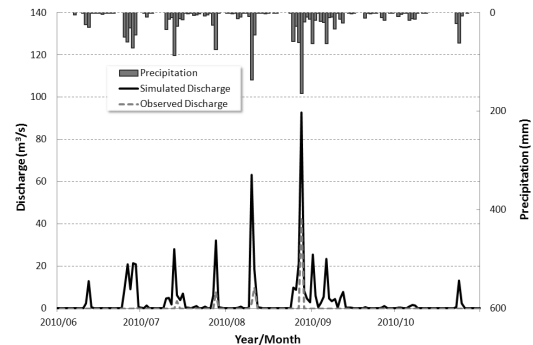


Fig. 7. Comparison between observed and computed discharge (before modification).

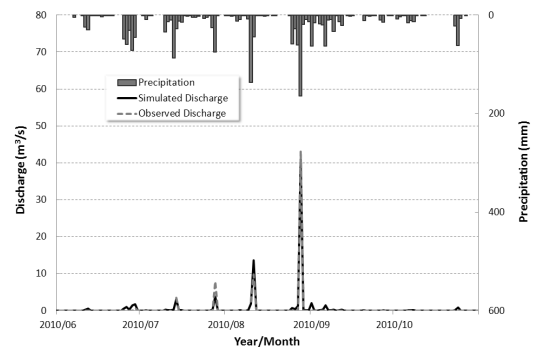


Fig. 8. Comparison between observed and computed discharge (after modification).

제주형 간헐하천 모의 기법 적용 전·후의 유출수문곡선을 강우량에 대한 관측 유량값으로 도시한 후 비교 분석하였다. Fig. 9와 Fig. 10에서 나타난 바와 같이 강우가 40mm 이하 발생 시에는 관측유량이 없는 것으로 나타났으며, 개선 전 모델결과에는 이 부분에 대한 모의가 어려웠지만 개선 후 유출량 모의개선에 크게 기여했음을 볼 수 있다.

2010년 관측유량 값과 개선 후 모의값과의 일대일 비교를 수행한 결과 개선 전 관측값에 비하여 과대하게 산정되던 모의값이 간헐하천 모의 기법을 개선함으로써 인해 감소하여 관측치와 선형성이 높아지면서 결정계수( $R^2$ )가 0.78에서 0.92로 상승한 것을 확인할 수 있다(Fig. 11).

Table 2와 Fig. 12는 천미천 유역에 대하여 유출량 보정을 실시한 2010년에 대하여 제주형 간헐하천 모의 기법 개선 전·후의 크기를 도시한 것으로 중간유

출성분의 제한으로 유출량이 작아지고, 깊은 대수층으로의 침투가 지배적으로 발생하도록 처리하였기 때문에 함양량이 증가한 것을 알 수 있다. Fig. 13은 지하수위 관측지점인 JD하천의 지하수위 시계열 자료와 SWAT-K를 이용한 모의지하수 시계열 자료를 비교 도시한 것으로 모의치가 관측치의 양상을 양호하게 모사하고 있음을 알 수 있다.

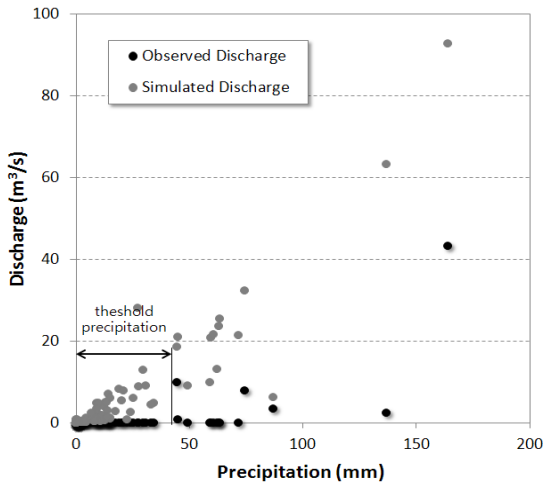


Fig. 9. Precipitation and simulated discharge/observed discharge before modification.

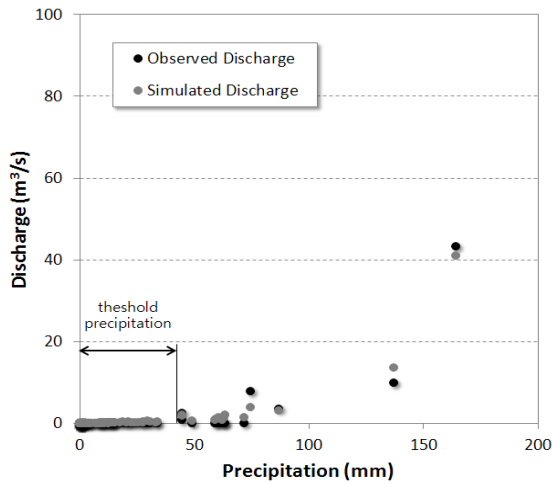


Fig. 10. Precipitation and simulated discharge/observed discharge after modification.

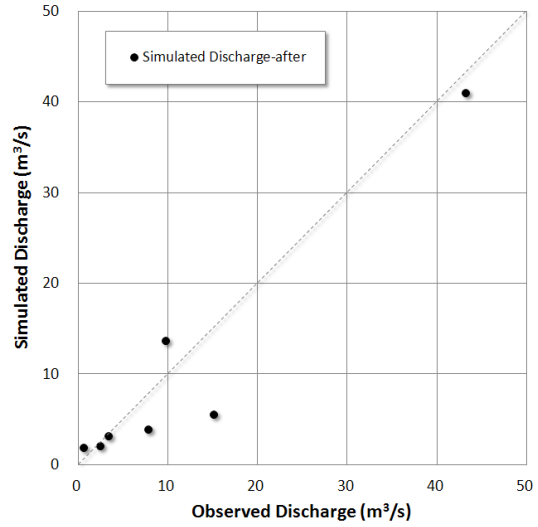


Fig. 11. Comparison between observed and computed discharge after modification.

Table 2. Hydrological components before and after modification

Hydrologic components	Before modification	After modification
surface runoff (mm)	586	90
recharge (mm)	1469	1964
evapotranspiration (mm)	925	926

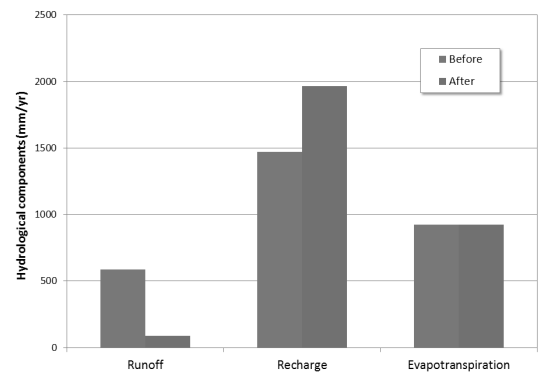


Fig. 12. Hydrological components before and after modification.

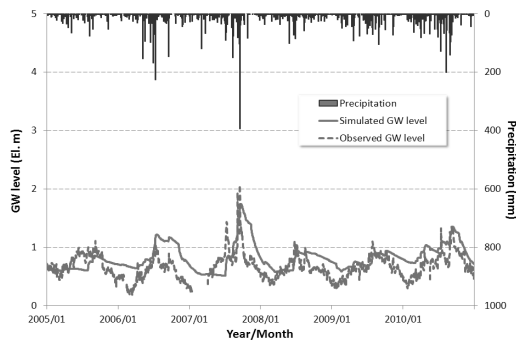


Fig. 13. Observed and simulated groundwater level time series (JDHacheon1).

## 5. 결론

본 연구에서는 제주의 독특한 지표수 유출-지하수 함양의 연계 해석을 위해 SWAT-K 모형(Kim 등, 2009)을 기반으로 간헐하천 모의를 위한 프로세스 중심의 개념적 물리적 방법을 제시, 제주 천미천 유역에 시험 적용하였다. 천미천 유역은 상시 유출이 없고 큰 비가 내릴 경우에만 하천유출이 발생하는 전형적인 간헐하천의 양상을 보이고 있으며, 지표면 유출성분이 하천유출에 절대적으로 기여하고 있다. 이와 같은 간헐하천 양상을 모의하기 위해서 중간유출성분 발생을 억제하고 연직하향의 침투가 지배적으로 발생하는 동시에 깊은 대수층으로의 함양이 이루어지도록 알고리즘을 개선했다. 모형 개선 전후의 비교를 통해 중간 및 기저유출을 억제시킴으로써 관측유출량에 매우 적합한 모의유출량이 계산되었으며 소규모 강우-유출사상까지 포함한 간헐하천의 양상을 잘 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 또한 유출량의 보정은 결과적으로 정확한 함양량 추정에 직접적으로 기여하는 것을 알 수 있었다. 이 개념적 모형은 강수의 차단효과, 증발산의 시공간적 분포 등을 반영한 지속적인 개선을 통해 제주 지역의 특성을 충분히 반영한 모형으로 활용될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업의 연구비 지원(10지역기술혁신B02, 제주수자원연구단)에 의해 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- Arnold, J. G., Allen, P. M., Bernhardt G., 1993, A comprehensive surface-groundwater flow model, *J. Hydrol.*, 142, 47-69.
- Chung, I. M., Kim, N. W., Lee, J., Sophocleous, M. A., 2010, Assessing distributed groundwater recharge rate by using integrated surface-groundwater modeling: Application to Mihocheon watershed, Korea: *Hydrogeol. J.*, 18(5), 1253-1264.
- Chung, I. M., Lee, J., Kim, J. T., Na, H., Kim, N. W., 2011, Development of threshold runoff simulation method for runoff analysis of Jeju Island, *J. Environ. Sci.*, 20(10), 1347-1355.
- Ha, K. C., Moon, D. C., Koh, G. W., Park, K. H., 2008, Runoff characteristics of the Oedocheon watershed in Jeju Island, *J. Soil Groundwater Environ.*, 13(5), 20-32.
- Jeju development institute, 2009, The hydrologic and water quality characteristics analysis for the streamwater application in Jeju island, 2009-11, p.98.
- Jeju Do and Korea Water Resources Corporation, 2003, Hydrogeologic Groundwater Resources Investigation in Jeju Island. Jeju, South Korea.
- Jung, W., Yang, S. K., 2008, Simulation of runoff of rivers in Jeju Island using SWAT model, *J. Environ. Sci.*, 17(9), 1039-1052.
- KIGAM and Jeju special self-governing province, 2005, Integrated analysis of groundwater occurrence in Jeju, 54-68.
- Kim, N. W., Lee, J., Chung, I.M., Kim, D. P., 2008, Hydrologic component analysis of the Seolma-Cheon watershed by using SWAT-K model, *J. Environ. Sci.*, 17(12), 1363-1372.
- Kim, N. W., Um, M. J., Chung, I. M., Heo, J. H., 2012, Estimating the total precipitation amount with simulated precipitation for ungauged stations in Jeju island, *Journal of Korea water resources association*, 45(9), 875-885.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Kim, C., Lee, J., Lee, J. E., 2009, Development and applications of SWAT-K (Korea). In: *Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Global Applications* (Eds. J. Arnold et. al.), Special Publication No. 4, World Association of Soil



- and Water Conservation, Bangkok, Thailand.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Yoo, S., Lee, J., Yang, S. K., 2009, Integrated Surface-groundwater Analysis in Jeju Island. *J. Environ. Sci.*, 18(9), 1017-1026.
- Leavesley, G. H., Lichty, R. W., Troutman, B. M., Saindon, L. G. (1983). Precipitation- runoff modeling system: user's manual, US Geological Survey, Water-Resour. Invest. Rep., 83-4238(207).
- Moon D. C., Yang, S. K., Koh, G. W., Park, W. B., 2005, Estimation of baseflow discharge through several streams in Jeju Island, Korea, *J. Environ. Sci.*, 14(4), 405-412.
- Namjeju-gun, 1991, Basic plan for river maintenance in Cheonmi-cheon, (19-20).
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Willams, J. R., 2001, Soil and Water Assessment Tool: the theoretical documentation, 2000, U.S. Agricultural Research Service.
- Yoon, T., 2011, Applied Hydrology - Practice and Application, Cheongmoongak(1053).