

제주도 하천에 대한 SWAT 모형의 적용

정우열 · 양성기

제주대학교 토목환경공학과-해양과환경연구소
(2008년 7월 17일 접수; 2008년 9월 18일 수정; 2008년 9월 18일 채택)

Application of SWAT Model on Rivers in Jeju Island

Woo-Yul Jung and Sung-Kee Yang

Department of Civil & Ocean Engineering, Cheju National University, Cheju-Do 690-756, Korea
Marine and Environmental Research Institute, Cheju National University, Cheju-Do 690-756, Korea

(Manuscript received 17 July, 2008; revised 18 September, 2008; accepted 18 September, 2008)

Abstract

The SWAT model developed by the USDA-Agricultural Research service for the prediction of rainfall runoff, sediment, and chemical yields in a basin was applied to Jeju Island watershed to estimate the amount of runoff. The research outcomes revealed that the estimated amount of runoff for the long term on 2 watersheds showed fairly good performance by the long-term daily runoff simulation. The watershed of Chunmi river located the eastern region in Jeju Island, after calibrations of direct runoff data of 2 surveys, showed the similar values to the existing watershed average runoff rate as 22% of average direct runoff rate for the applied period. The watershed of Oaedo river located the northern region showed R^2 of 0.93, RMSE of 14.92 and ME of 0.70 as the result of calibrations by runoff data in the occurrence of 7 rainfalls.

Key Words : SWAT model, Chunmi river, Oaedo river, Watershed, Runoff simulation

1. 서 론

제주도는 연평균 강우량이 1,975 mm에 달하는 우리나라 최대의 다우지역이며 투수성이 좋은 다공질 화산암류 및 화산회토로 이루어져 있어 총 강우량의 48.5%에 이르는 빗물이 지하로 침투하여 대부분의 하천들은 건천을 이루고 있다¹⁾. 또한 한라산 백록담을 중심으로 남·북사면에 발달해 있는 하천들은 경사가 급할 뿐만 아니라, 20 km 미만의 짧은 연장으로 인하여 강우에 의한 홍수유출 지속시간이

2~3일에 불과하고 강우 후에는 6개의 하천을 제외하고는 건천의 상태를 이루는 하천들이 대부분이다²⁾.

제주도의 143개 하천 중 6개의 하천을 제외한 전 하천들은 건천의 형태를 이루고 있어 지표수의 발달이 매우 빈약하다. 따라서 제주도민의 생활 및 산업 활동에 필요한 용수는 전적으로 지하수에 의존하고 있다²⁻³⁾. 제주도의 지하수에 관한 조사·연구는 1960년대 초반부터 여러 연구기관과 개인 연구자들에 의해 진행되기 시작하였으며, 2007년 현재까지 제주도전역에는 4,936공의 지하수 관정이 개발되어 지하수 개발량이 거의 한계에 달하였다. 또한 제주도는 고도성장과 개발에 따른 인구, 토지이용 등의 증가로 인하여 용수 수요가 날로 급증하고 있는 추세이며, 이같이 늘어나는 용수수요의 추세와 수자

Corresponding Author : Sung-Kee Yang, Division of Civil & Environmental Engineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea
Phone: +82-64-754-3451
E-mail: skyang@cheju.ac.kr

원을 확보하기 위해 제주도의 지표수 개발이 절실하게 필요한 실정이다⁴⁾.

지표수자원 개발을 위하여 가장 기본적으로 제주도 하천에 대한 수문조사가 필요하다. 제주도의 주요하천에 대하여 모든 수문조사를 실시하기 위해서는 많은 장비와 인력이 추가되어야 하고 갈수기에 발생하는 유출량에 대해서도 지속적인 조사가 필요하다. 따라서 현재로서 제주도 주요하천의 연속적인 유출량을 산정하기 위해서는 하천을 대상으로 하여 수문모형을 적용시켜 지속적인 유출량 자료를 확보하여야만 한다.

본 연구에서는 장기 강우-유출 모형인 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형을 적용하여 제주도 주요하천의 유출량을 산정하고자 한다. 이러한 연구는 제주도의 지속 가능한 수자원 개발 및 지하수 자원의 감소에 대처 할 수 있는 지표수 자원의 이용·개발에 관한 위한 기초적인 연구이며 향후의 중·단기 제주도 종합적 물 연구개발 사업을 위한 그 첫 연구로서 중요한 의의를 가지게 될 것이다.

2. 재료 및 방법

제주도의 하천은 한라산 정상부를 중심으로 발산하고 있으나, 동·서부 지역은 한라산 능선의 말단부에 위치하여 사면경사가 완만할 뿐만 아니라 비교적 평탄한 용암대지로 이루어져 있어 상대적으로 하천의 발달이 미약한 편이다. 따라서 제주도의 하천은 제주와 서귀포를 중심으로 남·북부 지역에 지방하천과 소하천을 포함하여 총 143개의 하천이 분포하고 있다⁵⁾ 143개 하천 중 제주도 동부유역의 천미천과 북부유역의 외도천을 연구대상유역으로 선정하여 SWAT 모형을 적용하였다(Fig. 1).

연구 대상유역에 대한 SWAT 모형의 입력자료인 수문·기상자료(Precipitation, Solar Radiation, Wind Speed, Climate, Humidity)와 지형자료(DEM(Digital Elevation Model), Land Use, Soil Type) 를 구축하였으며, 동시에 모형의 보정 및 검증을 위하여 천미천·외도천 유역의 실측 유출자료를 수집하여 정리하였다. 모형의 입력자료를 구축하고 SWAT 모형을 이용하여 천미천·외도천 유역의 유출 모의를 하였고, 유출 모의 결과를 바탕으로 하여 수문관련 매개변수들의 민감도 분석을 하였으며, 민감도 분석을

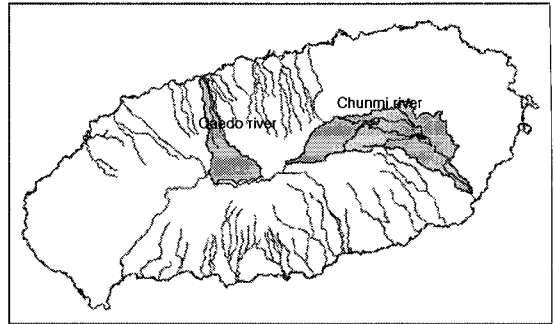


Fig. 1. Watershed for the study.

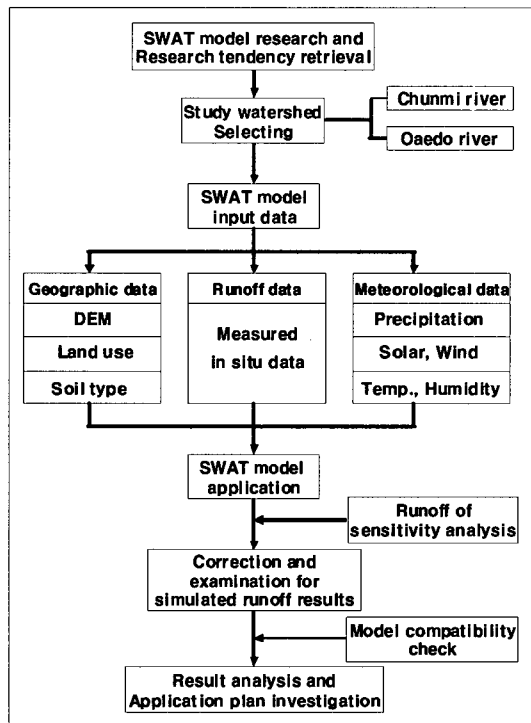


Fig. 2. Flow chart of the study contents.

통하여 보정을 수행하였다. 보정을 수행한 결과를 바탕으로 하여 천미천·외도천의 유출모의 결과를 분석하였으며, 향후 제주도에 필요한 연구결과 활용방안에 대하여 검토하였다. 연구내용의 흐름도는 Fig. 2와 같다.

3. SWAT 모형의 기본 이론 및 입력자료의 구축

3.1. SWAT 모형의 개요

SWAT 모형은 미국 농무성의 농업연구소(USDA

Agricultural Research Service, ARS)에서 개발된 유역 모형으로서 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측하기 위하여 개발된 모형이다⁶⁾.

SWAT에서 일별 지표면 유출량은 SCS(Soil Conservation Service) 방법을 이용하여 산정하며, 측방 유출량은 Kinematic storage model을 이용하여 침투는 토층을 최대 10개 층까지 세분화하여 선형저수량 추적기법을 사용하여 계산한다. 또한 SWAT은 지하수를 두 개의 대수층으로 구분하였다. 즉 유역의 하천에 회귀수를 공급하는 얇은 비피압 대수층과 유역 밖의 하천에 대한 회귀수를 기여하는 깊은 피압 대수층으로 나누어 물수지에 의해 계산된다. 잠재증발산량을 산정하기 위하여 Hargreaves 방법, Priestley-Taylor 방법, Penman-Monteith 방법을 제공하며, 작물과 토양의 증발산을 분리하여 모의하기 위해 Ritch 방법을 이용한다⁷⁾.

SWAT 모형의 입력자료를 GIS를 통해 자동으로 구성되는 유역 전체의 일반적인 유역자료와 토양자료, 작물자료가 있고 수동 입력을 통해 작성되는 기상, 하도추적, 농업관리, 지하수 등의 자료, 그리고 GIS와 수동 입력을 병행하여 작성되는 소유역 자료로 구분된다. 또한 출력자료는 토양도와 토지이용도를 중첩시켜 만든 수문반응단위(HRU, Hydrologic Response Unit)별 출력자료와 유역경계에 의해 구분된 소유역별 자료, 각 하도추적 구간별 결과치로 구분된다⁸⁾.

국내에서는 지리정보시스템을 이용한 SWAT 모형의 적용에서 GIS(Geographic Information System) Tool인 GRASS와 연계하여 농촌유역인 북하천유역의 오염부하량을 예측한 예가 있으며⁹⁾, 안양천 유역에 유량확보와 수질개선을 위해 SWAT 모형을 적용한 바가 있다¹⁰⁾.

3.2. 입력자료의 구축

3.2.1. 대상유역의 수문·기상자료

SWAT 모형에서 유출량 산정에 사용되는 기본적인 수문·기상자료는 강우, 최고·최저기온, 태양복사량, 풍속, 습도 등이 있다. 이외에도 관측소의 위치정보를 나타내는 입력자료 및 관측 유출량 자료 그리고 저수지 수위 등에 따라 선택적으로 요구된다. SWAT 모형은 소유역 각각에 대한 수문자료와 기상자료가 입력 자료로서 사용되지만, 대상유역의 소유역에 대한 각각의 입력 자료는 존재하지 않는다. 이런 경우 SWAT 모형에서는 각 소유역의 출구지점에서 인접한 기상관측소의 자료를 각 소유역별 수문·기상자료로 산정한다. 수문·기상자료의 구축에서 가장 중요한 것은 관측소의 위치정보를 나타내는 테이블과 데이터 파일이 맞물려 돌아가야 한다는 것이다. 예를 들면 위치정보를 나타내는 파일은 Pa_pre.dbf, Pa_climate.dbf, Pa_hum.dbf, Pa_solar.dbf, Pa_wind.dbf 등으로 구축되고, 이 5개의 파일 안에는 각각의 기상관측소에 대한 위치 정보와 각각의 관측소에 대해 맞물리는 데이터 파일들의 이름이 들어가 있다. 유역에 SWAT 모델을 적용하기 위하여 필요한 대상유역의 자료는 Table 1과 같다.

연구대상유역의 기상 자료는 제주 기상관측소(외도천) 과 서귀포, 성산포 기상관측소(천미천) 의 자료를 사용하였으며 각 관측소의 현황은 Table 2, 각

Table 1. Weather input data for the study watershed

| Station data | Input data | |
|----------------|-----------------|-------------|
| | Chunmi river | Oaedo river |
| Pa_pre.dbf | Seo_P, Sung_P 등 | Jeju_P 등 |
| Pa_climate.dbf | Seo_C, Sung_C | Jeju_C |
| Pa_hum.dbf | Seo_H, Sung_H | Jeju_H |
| Pa_solar.dbf | Seo_S, Sung_S | Jeju_S |
| Pa_wind.dbf | Seo_W, Sung_W | Jeju_W |

Table 2. Status of meteorological station of the study watershed

| Observation station | Latitude | Longitude | Sea-level elevation(m) | Observation beginning date |
|---------------------|-----------|------------|------------------------|----------------------------|
| Jeju | 33° 30' N | 126° 32' E | 20.0 | 1923. 5 |
| Seogwipo | 33° 15' N | 126° 34' E | 50.5 | 1961. 1 |
| Sungsanpo | 33° 23' N | 126° 53' E | 18.6 | 1971. 5 |

관측소별 월별 기상자료의 기후 평년값은 Table 3~5와 같다. 강우량 자료는 기상관측소 관측자료와 제주재난안전대책본부 관측자료를 이용하여 모형의 입력자료로 사용하였으며 각 유역별 강우량 입력자료는 Table 6~7과 같다.

3.2.2 대상유역의 GIS 입력자료 구축

유역의 물리적 특성을 반영하는 모형의 효율성을 높이기 위해서는 GIS와 연계된 자료의 구축이 매우 중요하다. SWAT 모형에 필요한 GIS 입력자료는 크게 5가지(DEM, 토지피복도, 토양도, 유역의 경계, 하천의 형태) 나누어진다. 유역의 경계와 하천의 형

태는 모형 내부에서도 모의되기 때문에 DEM, 토지피복도, 토양도 자료를 구축하였다.

대상유역의 DEM은 환경부에서 제공하는 30 m × 30 m 해상도의 DEM을 arcInfo 를 이용해 가공하여 사용하였으며 분석결과 제주도는 0~1950 m 표고를 가지고 있으며, 유역 평균표고는 283.69 m, 유역의 평균 경사는 9.04%로 확인되었다(Fig. 3).

토지피복도는 환경부에서 제공하는 2000년 Landsat 위성영상을 이용하여 피복분류한 자료를 이용하여 Arcview 프로그램을 이용하여 100 m×100 m 격자크기로 구축하여 모형의 입력자료로 사용하였다(Fig.

Table 3. Monthly weather data of Jeju meteorological station(1999.1.1~2007.9.30)

| | Average temp.(°C) | Lowest temp.(°C) | The maximum temp.(°C) | Rainfall (mm) | Relative humidity (%) | Sunshine (hr) | Mean wind speed (m/s) |
|-----|-------------------|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------------|
| Jan | 5.6 | 3 | 8.3 | 63 | 69.2 | 73.5 | 4.9 |
| Feb | 6 | 3.1 | 8.9 | 66.9 | 69.4 | 99.6 | 4.7 |
| Mar | 8.9 | 5.6 | 12.2 | 83.5 | 69.3 | 159.7 | 4.1 |
| Apr | 13.6 | 9.8 | 17.3 | 92.1 | 71.2 | 195.1 | 3.7 |
| May | 17.5 | 13.9 | 21.3 | 88.2 | 73.7 | 217.9 | 3.2 |
| Jun | 21.2 | 18.2 | 24.7 | 189.8 | 80.1 | 174.6 | 3.1 |
| Jul | 25.7 | 23 | 28.8 | 232.3 | 81.6 | 203.4 | 3.2 |
| Aug | 26.5 | 23.8 | 29.5 | 258 | 79.8 | 205.2 | 3.2 |
| Sep | 22.7 | 19.7 | 25.6 | 188.2 | 75.8 | 168.8 | 3.2 |
| Oct | 17.8 | 14.5 | 21.1 | 78.9 | 70.7 | 180 | 3.5 |
| Nov | 12.6 | 9.4 | 15.8 | 71.2 | 69.3 | 129.2 | 4.1 |
| Dec | 8 | 5 | 10.9 | 44.8 | 68.9 | 91.9 | 4.6 |

Table 4. Monthly weather data of Seogwipo meteorological station(1999.1.1~2007.9.30)

| | Average temp.(°C) | Lowest temp.(°C) | The maximum temp.(°C) | Rainfall (mm) | Relative humidity (%) | Sunshine (hr) | Mean wind speed (m/s) |
|-----|-------------------|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------------|
| Jan | 6.6 | 3.2 | 10.5 | 59.4 | 64.8 | 153.6 | 3 |
| Feb | 7.1 | 3.6 | 11 | 80.6 | 64.2 | 152.8 | 3.2 |
| Mar | 10.1 | 6.5 | 13.9 | 125.6 | 64.6 | 174.5 | 3.4 |
| Apr | 14.4 | 10.8 | 18 | 172.2 | 67.8 | 185.5 | 3.2 |
| May | 18.1 | 14.8 | 21.5 | 215.4 | 71.3 | 202.8 | 2.8 |
| Jun | 21.3 | 18.6 | 24.2 | 279.3 | 80 | 146.9 | 2.7 |
| Jul | 25.3 | 23.3 | 27.9 | 306.3 | 85.1 | 144.2 | 2.8 |
| Aug | 26.6 | 24.1 | 29.6 | 257.6 | 80.4 | 186.4 | 3.2 |
| Sep | 23.4 | 20.3 | 26.9 | 170.2 | 73.6 | 177.9 | 3.3 |
| Oct | 18.8 | 15.3 | 22.9 | 72.7 | 66.8 | 199.8 | 3.2 |
| Nov | 13.7 | 10.1 | 17.8 | 68.4 | 65.6 | 174.3 | 3.1 |
| Dec | 8.9 | 5.4 | 13.1 | 43.1 | 64.6 | 163 | 2.9 |

Table 5. Monthly weather data of Sungsanpo meteorological station(1999.1.1~2007.9.30)

| | Average temp.(°C) | Lowest temp.(°C) | The maximum temp.(°C) | Rainfall (mm) | Relative humidity (%) | Sunshine (hr) | Mean wind speed (m/s) |
|-----|-------------------|------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------------|
| Jan | 5 | 1.4 | 8.5 | 78.2 | 69.4 | 127.3 | 3.6 |
| Feb | 5.6 | 1.8 | 9.4 | 80.6 | 68.9 | 141.7 | 3.8 |
| Mar | 8.9 | 4.5 | 12.8 | 126.7 | 69.3 | 178 | 3.5 |
| Apr | 13.3 | 8.5 | 17.5 | 143.8 | 73.1 | 202.7 | 3.1 |
| May | 17.1 | 12.4 | 21.5 | 160.9 | 76.5 | 225.7 | 2.7 |
| Jun | 20.7 | 17.1 | 24.3 | 242.2 | 84.1 | 174.9 | 2.5 |
| Jul | 25.1 | 22.3 | 28.2 | 286.4 | 86.5 | 194.9 | 2.8 |
| Aug | 26.3 | 23.2 | 29.5 | 289.5 | 83.1 | 218.7 | 2.8 |
| Sep | 22.7 | 19.1 | 26.2 | 196.9 | 78.2 | 189.2 | 2.8 |
| Oct | 17.8 | 13.5 | 21.8 | 93.3 | 72.4 | 200 | 2.9 |
| Nov | 12.3 | 8 | 16.4 | 87.2 | 71.3 | 159.2 | 3.1 |
| Dec | 7.4 | 3.3 | 11.3 | 55.2 | 70.2 | 135.9 | 3.2 |

Table 6. Monthly rainfall data at the Oaedo watershed(1999.1.1~2007.9.30)

| | Hangpa | Eoem | Aewol | Chunback | Eoseungsang | Jeju |
|-----|--------|-------|-------|----------|-------------|-------|
| Jan | 53.0 | 44.4 | 40.7 | 65.2 | 103.6 | 62.0 |
| Feb | 55.4 | 52.3 | 44.6 | 81.2 | 86.0 | 59.5 |
| Mar | 66.8 | 59.0 | 53.1 | 122.9 | 106.9 | 67.8 |
| Apr | 64.6 | 67.7 | 69.6 | 242.6 | 144.4 | 65.5 |
| May | 123.3 | 102.2 | 126.7 | 274.2 | 221.9 | 131.3 |
| Jun | 142.9 | 133.8 | 126.4 | 265.9 | 204.3 | 146.7 |
| Jul | 205.4 | 192.9 | 196.9 | 388.7 | 431.4 | 237.5 |
| Aug | 236.9 | 230.1 | 241.6 | 579.9 | 526.9 | 290.0 |
| Sep | 160.7 | 112.2 | 114.6 | 259.6 | 332.7 | 219.1 |
| Oct | 55.3 | 39.9 | 40.2 | 106.4 | 110.9 | 64.1 |
| Nov | 55.0 | 51.1 | 43.0 | 90.5 | 95.6 | 70.5 |
| Dec | 53.4 | 43.1 | 39.9 | 69.2 | 90.0 | 63.7 |

4). 외도천 유역은 산림지역이 전체의 70.77%를 차지하고 있으며 천미천 유역은 산림지역이 전체의 68.05%로 나타났다(Table 8).

토양도(Soil Type Map) 자료는 농업과학기술원에서 제공하는 농업토양정보시스템(ASIS) 제공하는 1:25000 정밀 토양도를 토양통별로 구분하여 Arcview 프로그램을 이용하여 100 m×100 m 격자크기로 구축하여 모형의 입력자료로 사용하였다(Fig. 5).

외도천 유역은 31개의 토양통 중에서 흑악통이 27.69% 차지하고 있으며, 오라, 한경, 적악, 군산 통이 비교적 많은 분포를 보이고 있으며, 천미천 유역

은 35개의 토양통 중에서 평대통이 27.15%를 차지하고 있으며, 노로, 미악, 남원, 녹산 통이 비교적 많은 분포를 보이고 있다(Table 9).

4. SWAT 모형의 적용 및 보정

4.1. 매개변수 민감도 분석

수치적 민감도 분석은 시스템 출력의 변화가 모형 매개변수를 약간 수정하여 모형화된 시스템을 가장 잘 나타내주기 위해 모형 매개변수를 섭동하여 모의 결과와의 관계를 분석하는 것이다. 민감도 분석의 기본 목적은 특별하게 민감한 모형 매개변

Table 7. Monthly rainfall data at the Chunmi watershed(1999.1.1~2007.9.30)

| | Gyora | Songdang | Seongeup | Pyonsun | Sumang | Namwon | Seongpanak | Gwaneomsa | Sungsanpo | Seogwipo |
|-----|-------|----------|----------|---------|--------|--------|------------|-----------|-----------|----------|
| Jan | 108.4 | 78.6 | 100.5 | 92.1 | 109.8 | 85.4 | 131.3 | 112.0 | 88.7 | 74.4 |
| Feb | 90.3 | 68.6 | 73.0 | 71.5 | 72.6 | 75.3 | 109.1 | 88.9 | 59.3 | 64.8 |
| Mar | 156.1 | 103.1 | 123.1 | 123.3 | 129.6 | 110.8 | 216.4 | 134.5 | 100.9 | 97.0 |
| Apr | 244.8 | 144.2 | 184.9 | 152.1 | 238.5 | 176.8 | 377.4 | 157.8 | 135.2 | 176.2 |
| May | 335.0 | 202.0 | 246.0 | 229.0 | 309.3 | 253.5 | 531.4 | 275.3 | 194.5 | 242.5 |
| Jun | 247.3 | 209.4 | 214.5 | 185.7 | 227.8 | 218.5 | 374.4 | 217.5 | 213.1 | 222.2 |
| Jul | 465.8 | 371.4 | 393.9 | 300.0 | 404.4 | 308.5 | 675.4 | 508.0 | 289.3 | 322.6 |
| Aug | 542.4 | 421.6 | 367.8 | 361.6 | 412.7 | 358.9 | 740.7 | 577.7 | 359.4 | 341.3 |
| Sep | 383.3 | 337.5 | 293.3 | 242.8 | 264.8 | 241.7 | 487.3 | 405.8 | 242.1 | 180.3 |
| Oct | 126.6 | 115.9 | 119.5 | 115.3 | 119.5 | 76.0 | 192.8 | 121.8 | 108.4 | 92.4 |
| Nov | 101.5 | 95.3 | 99.6 | 94.0 | 97.9 | 86.8 | 153.9 | 104.8 | 96.1 | 77.3 |
| Dec | 72.6 | 68.4 | 71.1 | 71.0 | 78.8 | 49.8 | 83.0 | 85.5 | 72.4 | 39.7 |

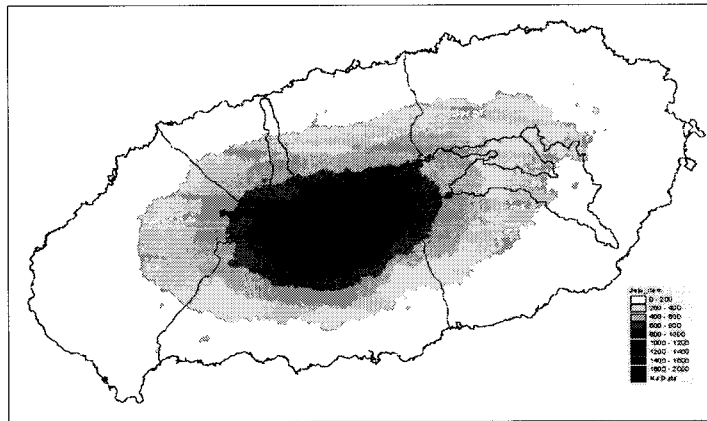


Fig. 3. DEM of the study watershed.

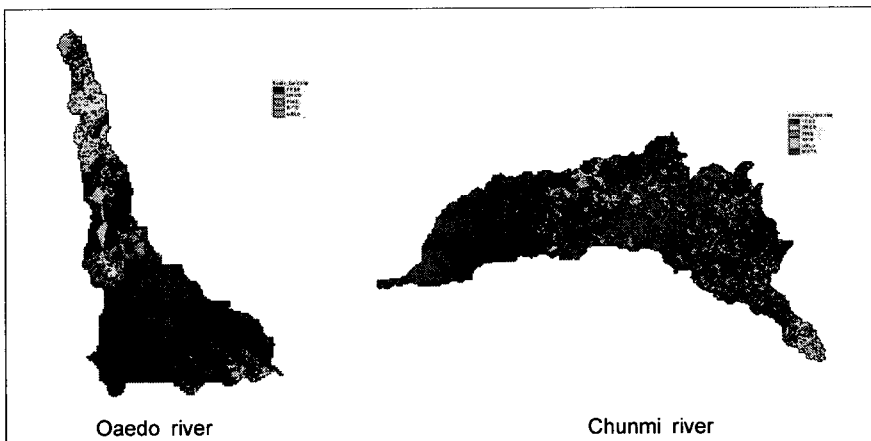


Fig. 4. Land-cover map of the study watershed.

Table 8. Ground coverage state at the watershed to be studied

| | Oaedo river | | Chunmi river | |
|-------------|------------------------|----------|------------------------|----------|
| | Area(km ²) | Ratio(%) | Area(km ²) | Ratio(%) |
| Paddy field | 0.07 | 0.16 | 0.01 | 0.01 |
| Grassland | 4.71 | 10.58 | 11.14 | 8.73 |
| field | 7.31 | 16.42 | 25.4 | 19.9 |
| Forest | 31.52 | 70.77 | 86.86 | 68.05 |
| City | 0.92 | 2.07 | 4.24 | 3.32 |

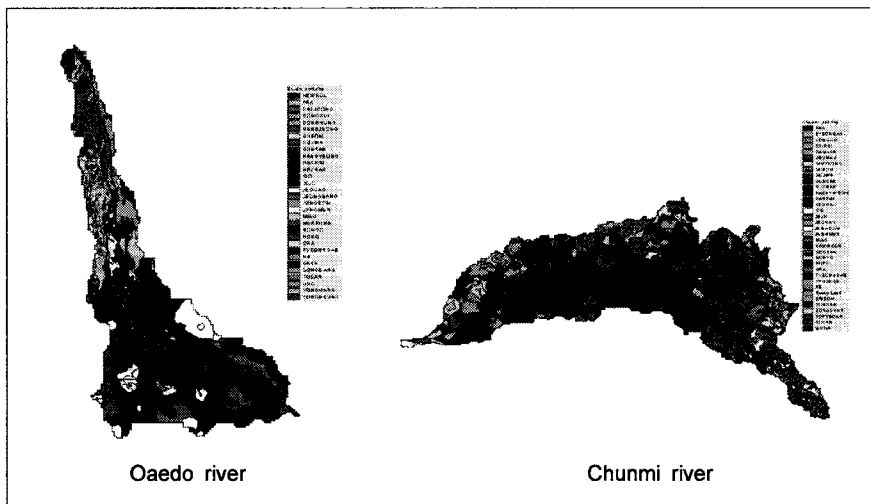


Fig. 5. Soil map of the study watershed.

수를 식별하는 것이며 가장 비슷한 값으로 잘 수행하는 해를 선택하고 더 정확하게 매개변수를 추정하여 효율성을 높이는 것이다¹¹⁾. 물리학적 매개변수는 매개변수보정의 대상이 되지 않으므로 수문학적 매개변수 중 유출에 관련된 매개변수를 민감도분석을 실시할 매개변수로 선정하였다. SWAT 전체의 매개변수(Table 10) 중에서 유출에 관련된 수문학적 매개변수는 Table 11과 같다. 본 연구에서는 Table 11에 제시된 유출에 관련된 수문학적 매개변수 13개를 추정하여 제주도 하천 특성에 맞게 건천·상시하천 유역으로 구분하였으며 매개변수 상한값과 하한값의 중간값을 기준으로 하여 일정한 범위(±28%)씩 단계적으로 변화시키면서 민감도 분석을 하였다.

건천 유역의 직접유출량에 대한 매개변수 민감도 분석을 실시한 결과 가장 민감한 매개변수는 AMC-II 조건의 SCS 유출곡선지수인 CN2로 나타났다.

CN2 값이 증가함에 따라 직접유출량은 지수함수적으로 증가하였으며, SOL_AWC가 기준값에서 변화할수록 10%정도의 직접유출량의 변화를 보임을 확인하였다. 또한 ESCO도 기준값에서 변화할수록 5%정도의 변화를 확인하였으며, 직접유출량에 대해서 위의 3가지 매개변수를 제외한 나머지 매개변수들은 어떠한 반응도 보이지 않았다(Fig. 6).

상시 하천 유역의 직접유출량에 대한 매개변수 민감도 분석을 실시한 결과 반응하는 매개변수는 건천 유역과 마찬가지로 CN2, SOL_AWC, ESCO 등이 반응을 하였다(Fig. 7). 총 유출량에 대하여 반응을 보인 매개변수는 SOL_AWC, CN2, GWQMN, ESCO, ALPHA_BF, GW_REVAP, REVAPMN으로 총 7개의 매개변수가 총 유출량에 대하여 민감한 반응을 보였다(Fig. 8). 가장 민감하게 반응을 보인 SOL_AWC는 기준값에서 하한값에 가까워 질수록 20% 이상의 총 유출량이 증가하는 경향을 보였다

Table 9. Rate and dimension by soil series at the study watershed

| Chunmi river | | | Oaedo river | | |
|--------------|------------------------|----------|-------------|------------------------|----------|
| Region | Area(km ²) | Ratio(%) | Region | Area(km ²) | Ratio(%) |
| GUJWA | 3.51 | 2.75 | HEUGAG | 12.33 | 27.69 |
| MIAG | 10.20 | 7.99 | GUNSAN | 2.80 | 6.28 |
| GIMYEONG | 1.56 | 1.22 | RB | 1.75 | 3.92 |
| PYEONGDAE | 34.65 | 27.15 | TOSAN | 2.01 | 4.51 |
| JUNGEOM | 3.36 | 2.63 | NORO | 1.79 | 4.01 |
| GUEOM | 0.65 | 0.51 | NONGO | 2.05 | 4.61 |
| RB | 4.19 | 3.28 | JEOGAG | 3.01 | 6.76 |
| JEJU | 6.39 | 5.01 | SARA | 0.55 | 1.24 |
| JUNGMUN | 0.40 | 0.31 | DAEJEONG | 0.14 | 0.31 |
| IDO | 0.32 | 0.25 | YONGGANG | 0.01 | 0.03 |
| ORA | 2.23 | 1.75 | ORA | 3.10 | 6.96 |
| GEUMAG | 0.37 | 0.29 | AEWEOL | 0.49 | 1.1 |
| GYORAE | 0.82 | 0.64 | GUJWA | 0.08 | 0.17 |
| HAENGWEON | 0.69 | 0.54 | DONGGUI | 1.23 | 2.77 |
| EUIGUI | 0.10 | 0.08 | GUEOM | 0.07 | 0.16 |
| ARA | 0.08 | 0.06 | GANGJEONG | 0.26 | 0.59 |
| SONGAG | 1.16 | 0.91 | JUNGMUN | 1.60 | 3.6 |
| NAMWEON | 8.39 | 6.57 | HANRIM | 1.46 | 3.28 |
| NOGSAN | 6.55 | 5.13 | YONGHEUNG | 1.03 | 2.32 |
| PYOSEON | 1.53 | 1.2 | MUREUNG | 0.29 | 0.64 |
| SONGDANG | 3.32 | 2.6 | ARA | 0.49 | 1.1 |
| TOPYEONG | 4.60 | 3.6 | JEJU | 1.39 | 3.12 |
| WUIMI | 0.70 | 0.55 | IDO | 0.01 | 0.03 |
| GAMSAN | 0.87 | 0.68 | JUNGEOM | 0.08 | 0.17 |
| SINEOM | 1.42 | 1.11 | JEONGBANG | 0.08 | 0.17 |
| Rocky Land | 0.15 | 0.12 | UDO | 0.70 | 1.57 |
| DONGGUI | 0.49 | 0.38 | DONGHONG | 0.05 | 0.12 |
| HEUGAG | 5.14 | 4.03 | PYEONGDAE | 2.50 | 5.61 |
| NORO | 13.91 | 10.9 | HANGYEONG | 3.05 | 6.84 |
| JEOGAG | 5.13 | 4.02 | SONGDANG | 0.03 | 0.06 |
| HANRIM | 0.20 | 0.16 | MIAG | 0.12 | 0.26 |
| NONGO | 3.06 | 2.4 | | | |
| BYEONGAG | 0.06 | 0.05 | | | |
| TOSAN | 1.11 | 0.87 | | | |
| GUNSAN | 0.31 | 0.24 | | | |

며, CN2는 기준값에서 상한값에 가까워 질수록 15% 정도의 총 유출량이 증가하는 경향을 보였다. 또한 ALPHA_BF는 총유출량에 대하여 반응을 보이지 않다가 하한값에 대하여는 -16% 정도의 총 유출

량이 감소하는 경향을 보였으며, GWQMN 은 기준 값에서 상한값으로 증가할수록 -1% 정도 총 유출량이 감소하는 경향을 보이고 하한값으로 하락할수록 16% 정도 총 유출량이 증가하는 경향을 보였다. ESCO,

Table 10. Parameter in SWAT model⁸⁾

| Atheroma | Parameter | Lower limit | Upper limit | |
|-----------------|-----------|-------------|-------------|--|
| Crop.dat | USLE_C | 0.001 | 0.5 | Min value of USLE C factor applicable to the land cover/plant. |
| Watershed input | SMFMX | 0 | 10 | Maximum melt rate for snow during year (occurs on summer solstice). |
| | SMFMN | 0 | 10 | Minimum melt rate for snow during the year (occurs on winter solstice). |
| | SPCON | 0.0001 | 0.01 | Linear parameter for calculating the maximum amount of sediment that can be reentrained during channel sediment routing. |
| | SPEXP | 1 | 1.5 | Exponent parameter for calculating sediment reentrained in channel sediment routing. |
| | NPERCO | 0 | 1 | Nitrogen percolation coefficient. |
| | PRERCO | 10 | 17.5 | Phosphorus percolation coefficient. |
| | PHOSKD | 100 | 200 | Phosphorus soil partitioning coefficient. |
| Chemical | SOL_LABP | 0 | 100 | Initial labile (soluble) P concentration in surface soil layer. |
| | SOL_ORGN | 0 | 10000 | Initial organic N concentration in the soil layer . |
| | SOL_ORGP | 0 | 4000 | Initial organic P concentration in surface soil layer. |
| | SOL_NO3 | 0 | 5 | Initial NO3 concentration in the soil layer. |
| Ground water | ALPHA_BF | 0 | 1 | Baseflow alpha factor. |
| | GWQMN | 0 | 5000 | Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur. |
| | GW_REVAP | 0.02 | 0.2 | Groundwater "revap" coefficient. |
| | REVAPMN | 0 | 500 | Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur. |
| HRU General | ESCO | 0 | 1 | Soil evaporation compensation factor. |
| | SLOPE | 0.0001 | 0.6 | Average slope steepness(%). |
| | SLSUBBSN | 10 | 150 | Average slope length(m). |
| Soil | n | | | Manning's "n" value for overland flow. |
| | TLAPS | 0 | 50 | Temperature laps rate (?/km). |
| | SOL_AWC | 0 | 1 | Available water capacity of the soil layer. |
| Main channel | CH_COV | -0.001 | 1 | Channel cover factor. |
| | CH_EROD | -0.05 | 0.6 | Channel erodibility factor. |
| | CH_K2 | -0.01 | 150 | Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium (mm/hr). |
| Management | BIOMIX | 0 | 1 | Biological mixing efficiency. |
| | USLE_P | 0.1 | 1 | USLE equation support practice (P) factor. |
| | CN_2 | 35 | 98 | SCS runoff curve number for moisture condition II. |

GW_REVAP, REVAPMN 은 각각 5% 미만의 반응을 나타냈다.

Table 11. Values for Analyzing sensitiveness related runoff parameters

| Parameter | Lower limit | -25(%) | Standard price | 25(%) | Upper limit |
|-----------|-------------|---------|----------------|----------|-------------|
| ALPHA_BF | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 |
| GWQMN | 0 | 1250 | 2500 | 3750 | 5000 |
| GW_REVAP | 0.02 | 0.0515 | 0.101 | 0.1505 | 0.2 |
| REVAPMN | 0 | 125 | 250 | 375 | 500 |
| ESCO | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 |
| SMFMN | 0 | 2.5 | 5 | 7.5 | 10 |
| SMFMX | 0 | 2.5 | 5 | 7.5 | 10 |
| TRAPS | 0 | 12.5 | 25 | 37.5 | 50 |
| CH_COV | -0.001 | 0.24925 | 0.4995 | 0.74975 | 1 |
| CH_EROD | -0.05 | 0.1125 | 0.275 | 0.4375 | 0.6 |
| CH_K2 | -0.01 | 37.4925 | 74.995 | 112.4975 | 150 |
| CN2 | 35 | 51 | 67 | 83 | 98 |
| SOL_AWC | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 |

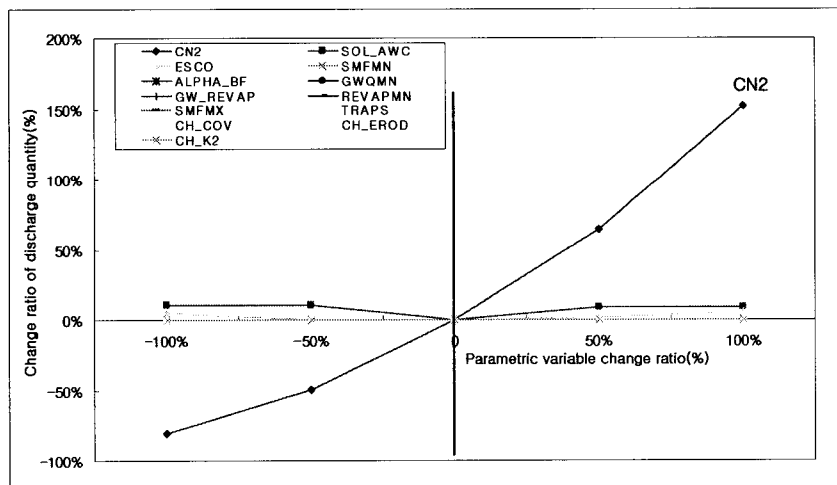


Fig. 6. Change rate of direct runoff according to the changing rate of watershed parameter for dry stream.

4.2. 모형의 적용 및 보정

4.2.1. 천미천 유역

천미천 유역의 모형의 결과를 보정·검정하기 위하여는 실측 유량 관측 자료가 필요하지만 천미천 유역은 항시 건천의 형태를 띠기 때문에 연속적 유출 자료는 확보 할 수 없었다. 따라서 2006년 직접 실측한 2회 관측 자료를 가지고 모형 결과를 보정하였다. 2회의 유출 측정 결과 모형의 결과치가 높게 나와 민감도 분석을 통하여 가장 민감한 매개변수의 CN2 값을 줄여서 고정한 후 매개변수 SOL_AWC와

ESCO 를 조정하여 모형의 결과를 보정하였다(Table 12). 보정 결과 1999년부터 2006년까지 평균 직접 유출율은 22% 였으며 2회의 평균제곱근 오차는 13.09 였다. 실측자료의 부재로 인하여 2회의 평균제곱근 오차(RMSE)는 계산할수 있었으나, 연간 통계치의 평균제곱근 오차(RMSE)와 모형의 효율성 계수(ME)는 계산할 수 없었다.

그러나 실측 유출자료가 부족한 천미천 유역에 모형의 적용성을 판단할수 있는 지표로는 년도별 직접 유출율(%) 자료 밖에 없었기 때문에 제주도 수문지

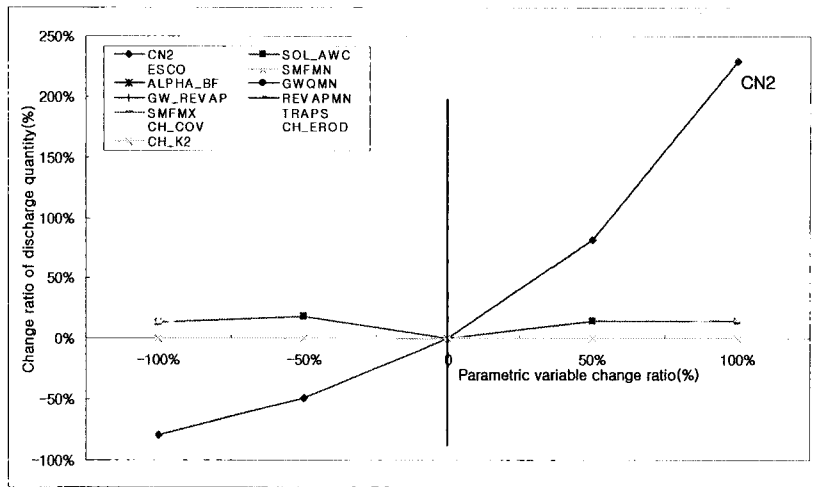


Fig. 7. Change rate of direct runoff according to the change rate of watershed parameter for the watershed river.

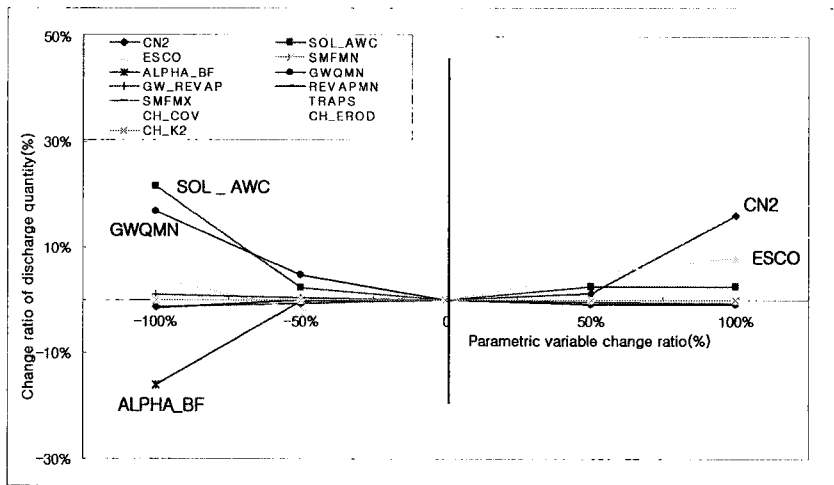


Fig. 8. Change rate of total runoff according to the change rate of watershed parameter for the watershed river.

Table 12. Corrected parameter of the Chunmi watershed

| Input file | Parameter | Definition | Revision price | Range |
|------------|-----------|--|----------------|-------|
| *.mgt | CN2 | SCS runoff curve number for moisture condition II. | ▽8 | 35~98 |
| *.sol | SOL_AWC | Available water capacity of the soil layer. | △0.03 | 0~1 |
| *.hru | ESCO | Soil evaporation compensation factor. | △0.25 | 0~1 |

질·지하수자원 종합조사(III)의 표선유역 평균 직접 유출율과 비교 하였다. 기존의 1993~2002년의 직접 유출율을 폭은 17~31%로 평균치는 22%로 나타났으며¹⁾, 모형의 보정 결과 1999~2006년의 직접 유출

율 폭은 13~28%로 평균치는 22%로 나타났다(Table 13). 직접 유출율은 비교적 적합하게 맞지만 이러한 결과는 많은 실측 자료를 바탕으로 하여 결과치를 검증해야만 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이라 사료된다.

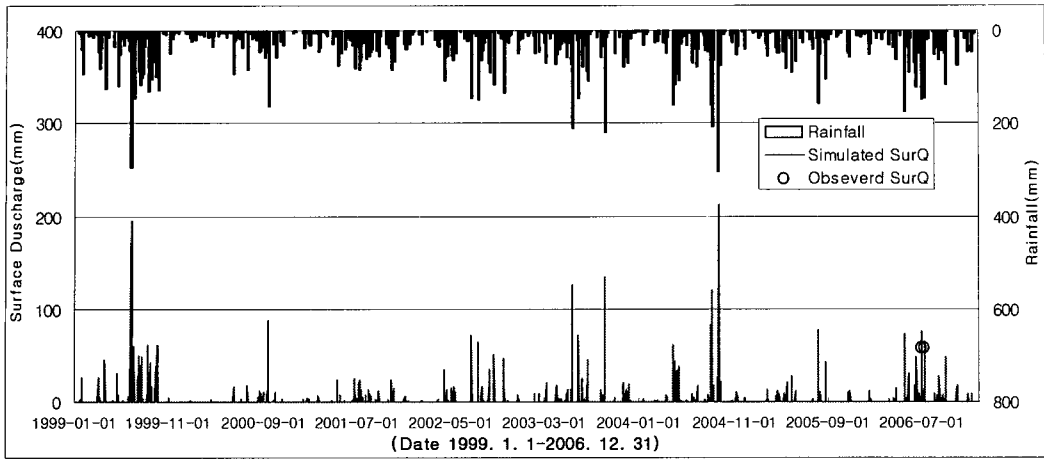


Fig. 9. Result of simulated runoff for the Chunmi watershed.

Table 13. Yearly simulation results at the Chunmi watershed

| Year | Rainfall (mm) | Direct runoff (mm) | Year | Rainfall (mm) | Direct runoff (mm) |
|------|---------------|--------------------|------|---------------|--------------------|
| 1999 | 3584.6 | 998.89 | 2003 | 3001.18 | 743.12 |
| 2000 | 1651.49 | 222.58 | 2004 | 3030.7 | 835.68 |
| 2001 | 2317.09 | 304.23 | 2005 | 1879.23 | 320.76 |
| 2002 | 2443.89 | 513.89 | 2006 | 2568.09 | 576.45 |

4.2.2. 외도천 유역

외도천 유역은 2007년 강우 발생시의 유출량 자료를 바탕으로 하여 보정을 하였다. 외도천 하류지 점에는 평상시에도 수위 0.084 m 정도의 유출이 발생하지만 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(Ⅲ)의 외도천 유역 평상시 유출의 수위-유량곡선의 상관계수 R 값이 0.6 이므로 모형의 보정에는 사용하지 않았다. 강우발생시 직접실측한 관측자료인 2007년 7회 관측자료를 바탕으로 보정을 하였다. 모형의 보정 순서는 먼저 유역 출구 지점에서의 총 유출량을 보정한 후 CN2값을 -6정도 줄여서 고정된 후 ALPHA_BF 값을 하한값인 0.02에 맞추었고,

SOL_AWC +0.03, ESCO +0.45 상향하여 보정하였다 (Table 14). 보정 결과 평균계급근오차(RMSE)는 14.92 로 나타났으며, R² 는 0.93, 모형효율성계수 (ME)는 0.70으로 나타났다(Fig. 10).

5. 결 론

제주도 수자원은 육지부와는 상이한 수문지질학적 특성으로 인해 대부분 지하수에 의존하고 있으나, 지표수의 이용과 개발, 하천에 대한 유량관측과 수문모형을 적용하여 하천 유출량을 산정한 연구는 거의 없는 편이다. 제주도에서는 처음으로 준분포

Table 14. Corrected parameter of the Oaedo watershed

| Input file | Parameter | Definition | Revision price | Range |
|------------|-----------|--|----------------|-------|
| *.mgt | CN2 | SCS runoff curve number for moisture condition II. | ▽6 | 35~98 |
| *.sol | SOL_AWC | Available water capacity of the soil layer. | △0.03 | 0~1 |
| *.hru | ESCO | Soil evaporation compensation factor. | △0.45 | 0~1 |
| *.gw | ALPHA_BF | Baseflow alpha factor. | ▽0.028 | 0~1 |

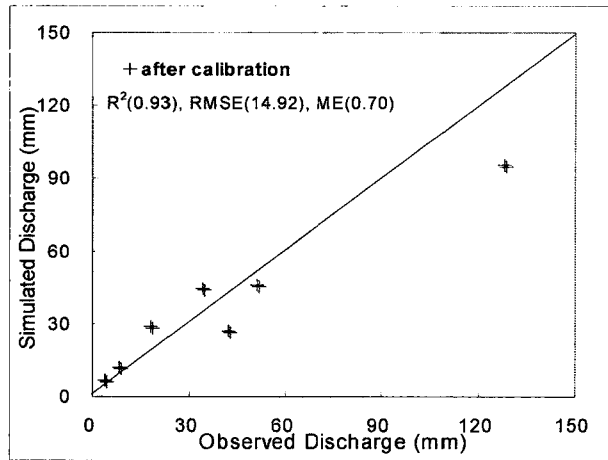


Fig. 10. Corrected result of the model for the Oaedo watershed.

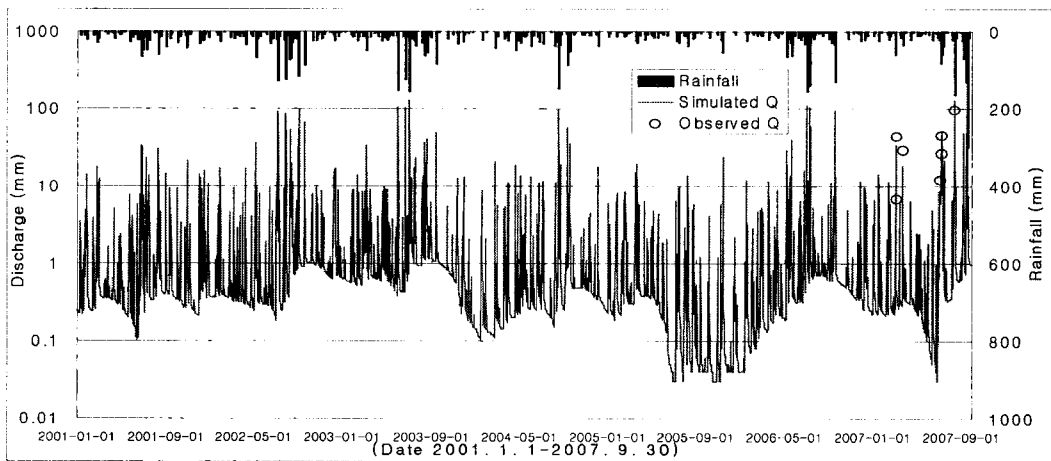


Fig. 11. Result of runoff simulation for the Oaedo watershed.

형 강우-유출 모형인 SWAT 모형을 천미천, 외도천에 적용하여 유역내의 유출량을 산정한 결과는 다음과 같다.

SWAT 모형의 입력 자료인 수문·기상 자료인 강우, 최고·최저기온, 태양복사량, 풍속, 습도 등을 천미천 유역, 외도천 유역에 구축하여 적용하였으며 실제 하천의 형상과 함께 SWAT 모형의 입력 자료로서 DEM, 토지이용도, 토양도등의 지형자료를 구축하였다.

천미천 유역은 평상시 건천의 형태이므로 하천으로 연속적인 실측 직접유출량의 자료는 확보 할 수

없었다. 2006년 2회의 직접유출 실측 관측 자료를 이용하여 보정하여 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(III)의 표선유역 직접유출율(%)과 비교·검정한 결과 적용기간의 평균 직접유출율은 22%정도로 기존의 표선유역 평균 유출률(22%)과 비슷한 값을 보였다.

외도천 유역은 평상시 하류지점에서 0.084 m 정도의 수위를 유지하면서 유출이 계속하여 발생하고 있으나, 하류지점의 수위-유량곡선은 정확도 부족으로 인하여 2007년 7회 강우 발생 시의 유출 자료를 이용하여 보정하였다. 그 결과 R^2 는 0.93, RMSE

는 14.92, ME 0.70 으로 나타났다. 관측 자료와 모의 결과는 서로 유사한 경향을 보이고 있으나, 연속적인 수위 자료가 확보 되고 난 후 정밀한 수위-유량 곡선을 통하여 정확한 보정·검정을 통하여 산정하여야만 한다.

이상의 결과들로부터 제주도 하천에 대하여 SWAT모형을 적용한 결과 장기 일 유출량 모의에 대하여 전체적으로 우수한 결과를 보이고 있다. 그러나 하천관측이 일부 하천에서 특정한 시기에만 조사되고 있으며, 강우량의 관측 지점이 한정되어 이에 대한 제고가 필요하다. 향후 보다 많은 하천의 유출량 자료를 확보하여 본 연구의 결과와 비교·검정하여 SWAT 모형을 구축한다면 제주도 하천의 장기 일 유출량 모의를 할 수 있을 것이라 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) 양성기, 2007, 지구의 수권과학, 구미서관, 302pp.
- 2) 양성기, 2007, 제주도의 하천관리와 개선방안, 하천과 문화, 한국하천협회, 3(4), 104-115.
- 3) 제주도, 한국수자원공사, 2003, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(III) 보고서, 18-28.
- 4) 제주도, 2001, 제주도 수자원 종합개발계획 보완 보고서, 182-251.
- 5) 김미령, 2003, 제주도 하천의 하계망 분석, 석사학위논문, 사회교육과, 제주대학교, 제주.
- 6) 장철희, 김현준, 노성진, 2005, 청계천 유역에 대한 SWAT 모형의 적용, 한국수자원학회 학술발표회논문집, 2, 25-29.
- 7) Neitsch S. L., Arnold J. G., Williams J. R., 2001, Soil and Water Assessment Tool, Theoretical Documentation Version 2000, USDA ARS, Temple, Texas, 21-24.
- 8) Neitsch S. L., Arnold J. G., Williams J. R., 2001, Soil and Water Assessment Tool, User's Manual Version 2000, USDA ARS, Temple, Texas, 31-40.
- 9) 김지훈, 1998, 지리정보시스템을 이용한 SWAT/GRASS 모형의 적용, 석사학위논문, 토목공학과, 서울대학교, 서울.
- 10) 신문주, 2006, SWAT 모형을 이용한 안양천 유역의 유량확보와 수질개선에 대한 방안, 석사학위논문, 토목공학과, 서울대학교, 서울.
- 11) 장대원, 2004, GIS 기반의 SWAT 모형을 이용한 하천 유출량 모의, 석사학위논문, 토목공학과, 인하대학교, 인천.