

SWAT 모형에 의한 제주도 외도유역의 토지이용변화에 따른 유출량 산정

한웅규 · 양성기

제주대학교 토목공학과

(2009년 7월 22일 접수; 2009년 8월 17일 수정; 2009년 9월 10일 채택)

A Runoff Simulation Using SWAT Model Depending on Changes to Land Use in Jeju Island

Woong-Ku Han and Sung-Kee Yang

Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju-Do 690-756, Korea

(Manuscript received 22 July, 2009; revised 17 August, 2009; accepted 10 September, 2009)

Abstract

Since Jeju island has depended a water resource on the underground water because of a poor development of the surface flow, Jeju island is in need of the surface resource development to prevent the future shortage of the underground water due to excessive development and use of it. The study shows that the SWAT model(continuous rainfall-runoff model) is applied to estimate the outflow in the drainage watershed area, where it has been urbanized through the change of the land, such as a tourism development, cultivation, housing, and impervious layer road development. Near Oaedo watershed area in Jeju island, weather and topographical SWAT input data were collected, and compared the outflow change of past and present.

Key Words : SWAT, Runoff simulation, Drainage watershed

1. 서 론

지표수의 발달이 빈약한 제주도는 수자원을 전적으로 지하수에 의존하고 있다. 그러나 지하수의 과도한 개발·이용으로 인한 지하수 함양량의 감소를 사전에 방지하고 능동적으로 대처하기 위하여 지표수자원 개발이 필요한 실정이다. 또한 제주도는 다양한 개발사업과 인구, 토지이용 등의 증가로 인해 용수의 수요가 날로 급증하고 있는 추세이다¹⁾. 이 같이 늘어나는 용수수요의 증가 추세와 수자원을

확보하기 위해 제주도의 지표수 개발이 매우 필요한 실정이다²⁾.

최근 인구의 도시 집중화와 토지 이용률의 증가에 따라 유역의 유출환경이 크게 변하고 있다. 특히 도시화에 따른 불투수층의 증가와 도로율이 크게 늘어남에 따라 지표면의 이용과 형질이 크게 변형됨으로서 지표수의 흐름과 지하수의 함양 및 오염 등의 문제가 심각하게 대두되고 있어 그 개선대책이 필요하게 되었다. 또한, 도심지에 위치한 하천유역은 도시화로 인해 강우에 대한 저류능력의 감소와 유출률의 증가 및 침투유량의 급증으로 저지대 및 하류역에 도시형 재해를 초래하기도 한다³⁾.

도시화에 따른 영향 평가와 대책을 수립하기 위

해서는 수문학적 모니터링과 수학적 수문모델이 필수적이다. 도시화 또는 토지 이용도 변화에 따른 수문학적 모델을 이용한 분석에 있어서, 대부분 유역의 공간 및 시간적인 변화를 모의하기 위해서 물리적 기반의 분포형 혹은 준 분포형 모형을 선호하는 경향이 있다. 토지 이용도 변화에 대한 연구를 위해서는 좀 더 세밀하고 강력한 모델 검증이 요구된다⁴⁾.

지 등⁵⁾은 택지개발 및 도시화로 인한 토지이용의 변화가 크게 나타나고 있는 실정을 중심으로 이상 기후와 도시화가 홍수량에 미치는 영향을 분석하였다. 도시화로 인한 연구로는 이 등⁶⁾은 WEP모형을 이용하여 도립천 유역의 과거(1975년)과 현재(2000년) 토지이용도를 이용한 모의를 통해서 도시화에 따른 불투수층의 증가가 유출 특성에 미치는 영향에 대해 분석하였으며, 박 등⁷⁾은 HSPF모형을 이용한 도시화 평가에 있어 강수조건과 토지이용변화에 따른 유출특성 분석에 도심지의 증가와 산림의 감소에 따라 총 유출량은 증가하고, 특히 강우 강도가 높은 해가 침투유량의 증가율이 가장 높음을 보였다. 이와 같이 실제적인 도시화에 따른 영향 평가를 내리고, 대책을 세우기 위해서는 우선적으로 수문학적 모니터링이 필요하다. 하지만 복잡한 수문학적 현상과 토지 이용변화의 직접적인 관계를 성립하고 이해하기 위해서는 모니터링만으로 충분하지 못하고, 수학적 수문모델이 필수적이다.

제주도 수자원의 연구에서 지하수와 관련한 연구는 부분적으로 진행되어 왔으며⁸⁾, 제주도 주요하천의 기저유출량 산정에 대한 연구는 있으나⁹⁾, 제주도 하천에 대한 유량관측과 수문모델을 적용하여 유출량을 산정하는 선행연구는 거의 없는 편이다. 다만, 장기간에 걸친 제주도 하천유출량 모의에 대한 연구는 발표된 바 있다¹⁰⁾.

이 연구에서는 장기 강우-유출 모델(continuous rainfall-runoff model)인 SWAT 모델을 제주도 외도천 유역에 적용하여 관광단지의 개발, 농경지 개간, 택지개발 및 불투수층 도로의 개설 등으로 인한 토지이용변화에 따른 도시화의 영향으로 인한 유역내의 직접유출량을 산정 후 과거와 현재의 비교·분석을 통해서 어떻게 변했는지 보고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1. 연구방법

도시화의 영향을 조사하기 위하여 과거와 현재의 토지이용변화에 따른 유출량을 비교하기 위하여 제주도 북부지역의 외도천을 연구 대상유역으로 선정하였다. 유역의 물리적 특성을 반영하는 모형의 효율성을 높이기 위해서는 GIS와 연계된 자료의 구축이 매우 중요하다. SWAT 모형에 필요한 GIS 입력 자료는 크게 5가지(DEM, 토지피복도, 토양도, 유역의 경계, 하천의 형태) 나누어진다. 유역의 경계와 하천의 형태는 모형 내부에서도 모의되기 때문에 DEM, 토지피복도, 토양도 자료를 구축하였다. 이 유역에 대한 SWAT 모형의 입력자료인 수문·기상 자료(precipitation, solar radiation, wind speed, climate, humidity)와 100 m 격자크기의 지형자료, 토지피복도, 토양도 자료를 30년 전의 과거 자료와 현재 자료를 구분하여 구축하였다. 또한, 모형의 보정 및 검증을 위하여 외도천유역의 유출에 대한 현장 실측을 실시하고 정리하였다.

제주도 하천유출 특성에 맞추어 직접유출과 전체 유출로 구분하여 매개변수 민감도 분석을 실시하였으며, 직접유출에 민감하게 영향을 주는 매개변수와 전체유출에 영향을 주는 매개변수를 각각 추출하여 현재의 유출량에 대하여 정우열·양성기의 방법⁹⁾과 같이 검·보정 작업을 수행하였다. 또한 현재의 유출량 보정을 통하여 산정된 매개변수를 과거에 적용하여 과거와 현재의 유출모의 결과를 비교·분석하였다.

2.2. 연구 대상유역

제주도의 하천은 대부분 건천이며 한라산 백록담을 중심으로 남·북측에서 V자형 침식계곡을 따라 소규모로 지표하천이 발달하고 있다. 이들 하천은 지형과 강우의 형태에 따라 크게 다른 특성을 보이는데, 남·북사면방향으로 급한 경사를 가지며, 산지형·직류형에 속하고 있다¹¹⁾. 본 연구에서는 143개의 하천 중 토지피복변화가 가장 많이 발생한 제주도 북부지역의 외도천을 연구 대상 유역으로 선정하였다(Fig. 1).

외도천 유역은 한라산 고도 1,950 m 고지에서 발원하여, 도근천의 제 1지류로 도근천에 합류 후 해안으로 유입되는 하천형태를 보이고 있으며 하류지

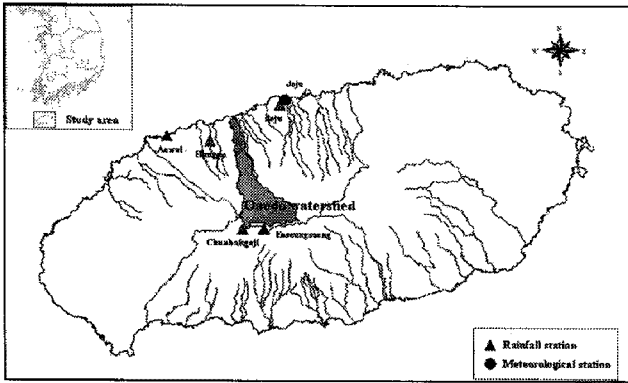


Fig. 1. Rainfall and weather observatory in research object basin.

역의 월대교 직상류의 수원지 시설에서 배출되는 지하수로 인하여 하천수가 흐르며 총 유로연장 21.86 Km, 하천연장 18.3 Km, 유역면적 44.54 Km²이다.

3. SWAT모형의 입력자료 분석 및 구축

3.1. 대상유역의 수문·기상자료 구축

SWAT모형에서 유출량 산정에 사용되는 기본적인 수문·기상자료는 강우, 최고·최저기온, 태양 복사량, 풍속, 습도 등이 있다. 이외에도 관측소의 위치정보를 나타내는 입력자료 및 관측 유출량 자료 그리고 저수지 수위 등에 따라 선택적으로 요구된다¹²⁾.

기상자료는 기상청 제주도 관할 4개 지점 중 제주기상청자료를 사용하였으며, 강우자료는 각 유역별로 제주도 재난안전대책본부 강우량 자료와 기상청 강우량 자료를 사용하였다. 모형의 적용기간을 현재(2000. 1. 1~2007. 12. 31)와 과거(1975. 1. 1~1982. 12. 31)로 나누어 적용하였다(Table 1).

3.2. 대상유역의 GIS 자료 구축

3.2.1. DEM(수치고도자료) 구축

모형의 수문 시스템에서 속성정보는 경사도, 경

사방향, 토지이용, 토지피복 등을 포함한다. 이러한 공간정보의 기본틀을 제공하는 기본도인 DEM(Digital Elevation Model)은 수치지도에서 추출한 등고선을 이용하여, 1초(30 m) 간격의 격자단위로 표고값을 표현한 자료로서 USGS(United States Geological Survey)에서 전 세계를 대상으로 구축한 수치고도자료이다.

대상유역의 DEM은 환경부에서 제공하는 DEM(30 m × 30 m)을 arcinfo 를 이용해 가공하여 사용하였다. 연구대상유역인 외도천 유역은 유역평균 표고가 468 m, 유역평균 경사가 17.12%로 분석되었다(Fig. 2).

3.2.2. 토지피복도(Landuse map)

토지피복도는 국가수자원관리 종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>) 제공하는 토지피복 자료를 이용하였다. 이용된 토지피복자료는 2000년 Landsat 위성영상을 이용하여 피복분류된 자료이며, 토지피복도는 wamis에서 제공하는 지형 공간 래스터 파일은 arcinfo의 GRID 파일 포맷을 arcinfo의 교환 포맷인 .e00으로 변환하고 이를 다시 ZIP으로 압축한 형태로 제공된다. 압축을 푼 상태의 .e00 파일 포맷을 arcinfo(workstation)와 arcview GIS 3.3상에서 GRID 파일로 변환하였다.

유역별로 격자(100 m × 100 m)를 설정하여 모형의 입력자료로 사용하였다(Fig. 3).

과거와 현재의 토지이용변화를 살펴보면 과거(1975년) 외도천유역은 산림지역이 72.11%로 가장 많은 면적을 차지하고 있으며 초지, 논, 시가지순으로 토지피복상태가 나타났다. 현재(2000년)자료는 산림지역이 전체 68.05%로 가장 많은 면적을 차지

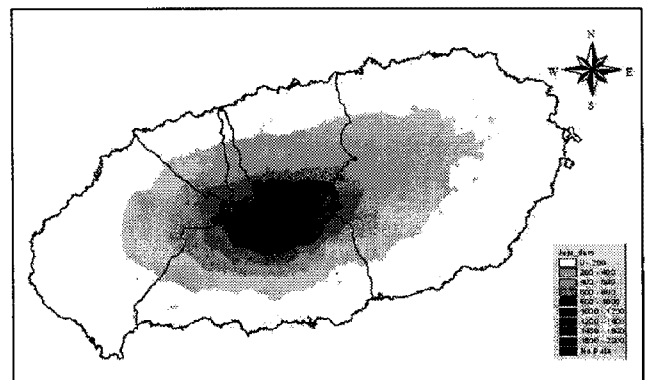


Fig. 2. DEM of the basin.

Table 1. The status of rainfall station at the basins

Data	Period	Rainfall station status
present	2000. 1. 1~ 2007. 12. 31	Jeju, Eoseungsaeng, Hangpa, Chunbaekgoji, Aewol
past	1975. 1. 1~ 1982. 12. 31	Jeju

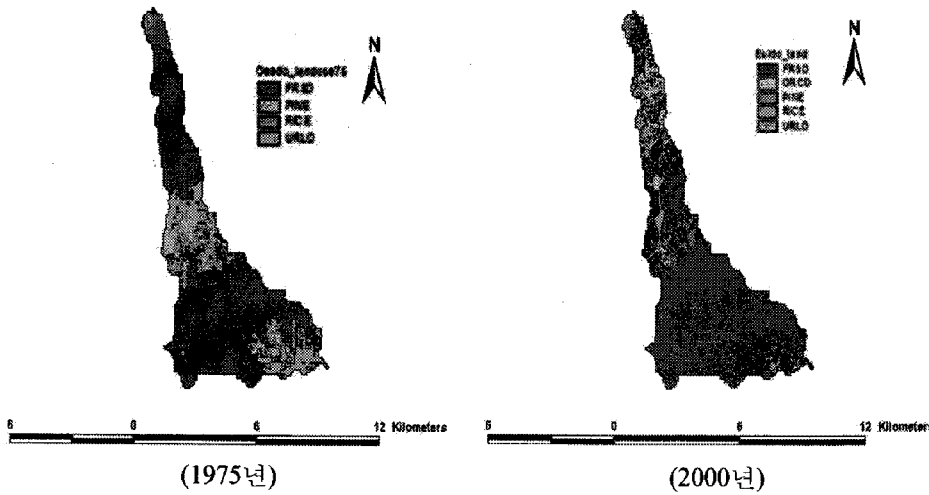


Fig. 3. Land-cover map of study watershed.

Table 2. Ground coverage state at the basin of Oaedo watershed

	Area(km ²)		Ratio(%)	
	Present (2000)	Past (1975)	Present (2000)	Past (1975)
Rice	0.06	1.86	0.13	4.17
Grassland	3.89	8.9	8.73	19.99
Field	8.33	0.74	18.71	1.66
Forest	30.31	32.12	68.05	72.11
City	1.95	0.92	4.38	2.07

하고 있으며, 토지 피복 상태가 밭, 초지, 시가지 순으로 나타났다.

3.2.3. 토양도(Soiltype map)

SWAT모형에서 수치화된 토양도는 토양특성별 공간적인 분포에 관한 정보만 가지고 있으며, 토양 특성별 물리적인 정보를 가진 토양 DB를 구축하여야 한다. 전국에 걸쳐 토양을 통으로 분류하여 각 토양통에 대한 물리적인 자료를 제공하고 있다. 토양도(soil type map) 자료는 농촌진흥청 농업과학기술원에서 농업토양정보시스템으로 제공하는 1:25000 정밀 토양도를 31개의 토양통별로 구분하여 입력 자료로 구축하였다(Fig. 4).

4. SWAT 모형의 적용 및 결과

4.1. 매개변수 민감도 분석

연구대상유역에 매개변수 민감도 분석을 실시하였으며, 직접유출에 민감하게 영향을 주는 매개변

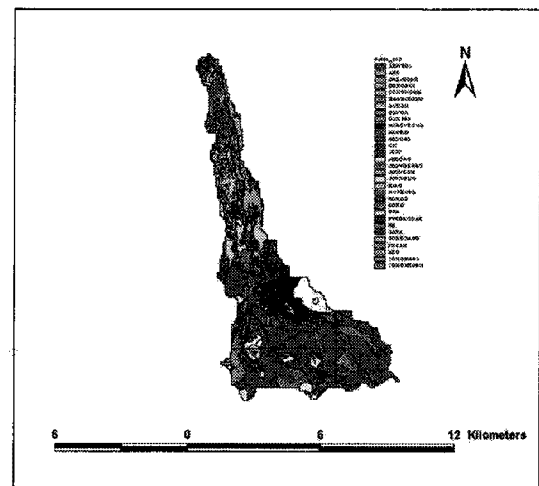


Fig. 4. Soil map of the study watershed.

수와 전체유출에 영향을 주는 매개변수를 각각 추출하여 현재의 유출량에 대하여 정우열·양성기의 방법¹⁰⁾과 같이 검·보정 작업을 수행하였다. 매개변수 7개의 기준값을 정하여 (±25%)씩 단계적으로 변화시키면서 실시하였다. 그 결과 직접유출에 가장 많은 영향을 미치는 매개변수는 CN2로 나타났으며, 전체유출에 영향을 미치는 매개변수로는 CN2, SOL_AWC, ESCO 등으로 나타났다. 이렇게 추출한 매개변수를 통하여 모형의 보정에 적용하였다.

4.2. 모형의 보정 및 적용

현재의 토지피복에 따른 유출량을 산정하기 위하여 매개변수 민감도 분석 결과를 바탕으로 보정을 하였다. (Fig. 5~6). 평상시에 발생하는 기저유출량의 실측자료를 확보하고 연속적인 유출량 자료를

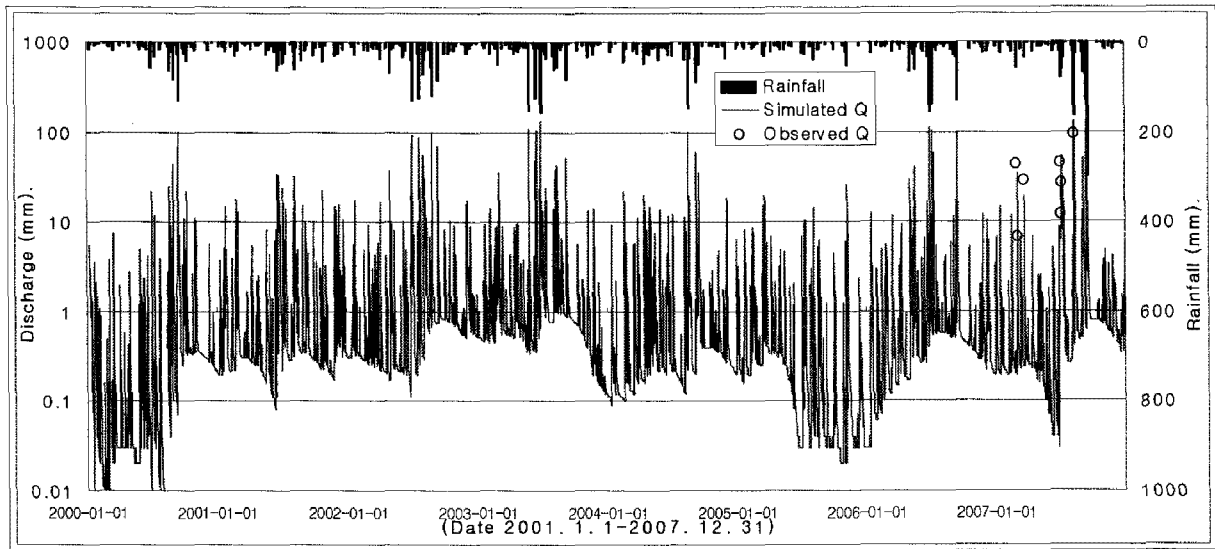


Fig. 5. Result of the present runoff simulation of the basin of Oaedo watershed(date).

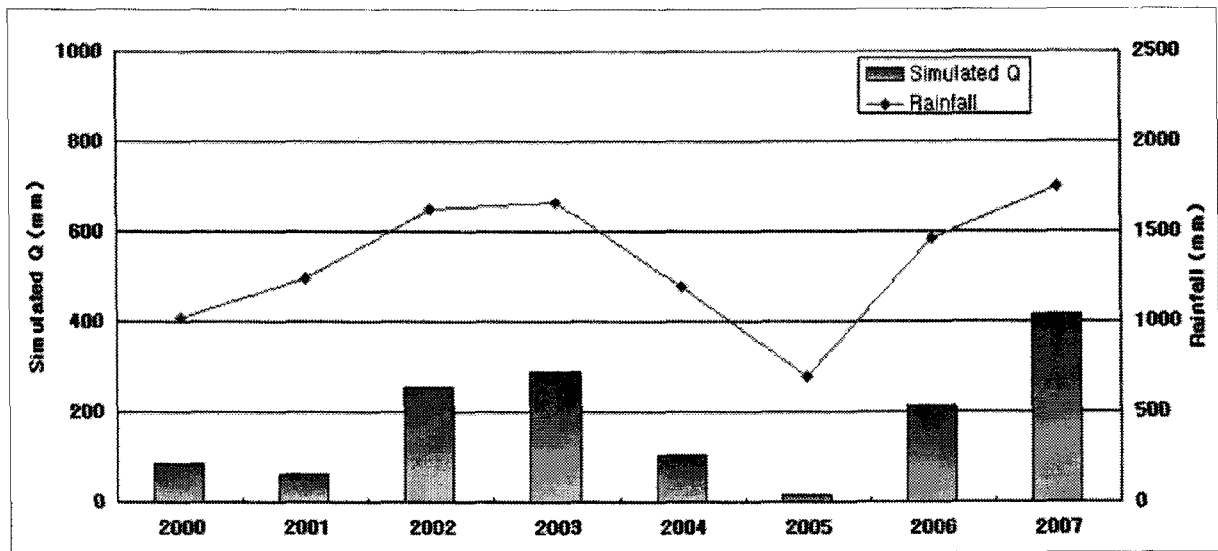


Fig. 6. Result of the present runoff simulation of the basin of Oaedo watershed(year).

확보한 후에 검정을 해야 하지만 외도천 하류지점의 수위-유량곡선의 정확도 부족으로 인하여 2007년 7회 강우 발생 시의 유출 자료를 이용하여 보정하였다.

그 결과 R^2 는 0.93, RMSE는 14.92, ME 0.70 으로 나타났다. 또한 직접유출율은 15~32%(평균22%) 정도로 산정되었으며, 이는 『제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사, 2003, 제주도』에서 실측하여 산정된 직접유출율(19.8~35.2%)과 유사하게 나타났다.

과거의 토지피복에 따른 유출량을 산정하기 위하

여 과거의 실측자료를 바탕으로 모형을 보정하여야 하나, 1975년에 외도천 유역에 유출고를 측정하지 않았으므로, 토지 피복에 따른 직접유출의 변화를 비교하기 위하여 현재의 유출량 보정에 적용되었던 매개변수를 그대로 적용하여 과거의 유출량을 산정하였으며(Fig. 7~8), 그 결과 직접유출율이 10~24%(평균 14%)로 산정되었다.

4.3. 토지이용에 따른 직접유출 비교

SWAT 모형의 입력자료 중에서 토지피복자료를 과거(1975년)와 현재(2000년)로 구분하여 모형에 적

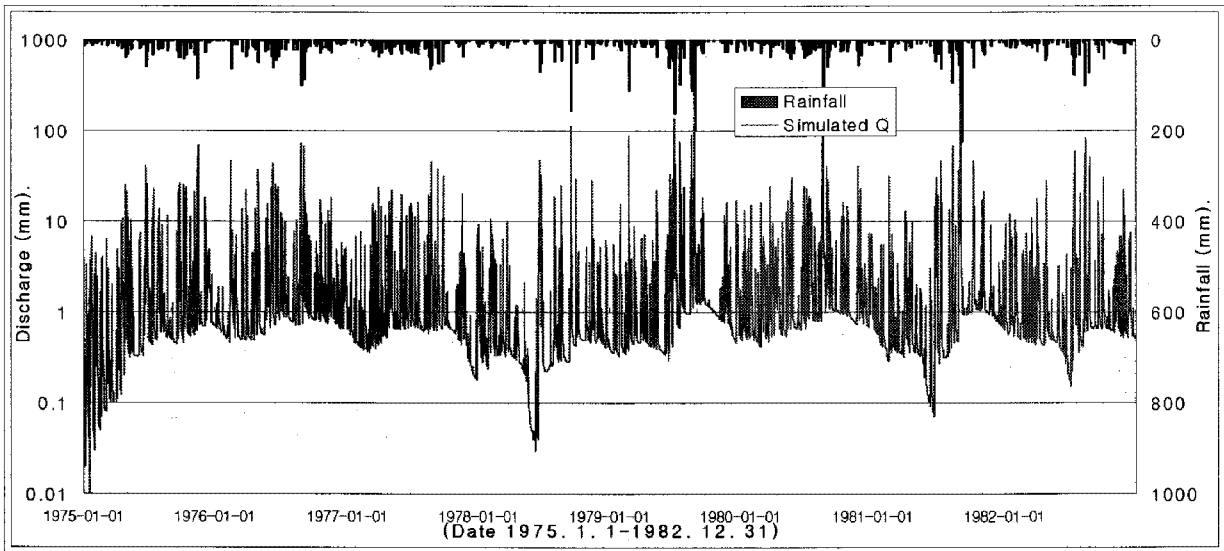


Fig. 7. Result of the past runoff simulation of the basin of Oaedo watershed (date).

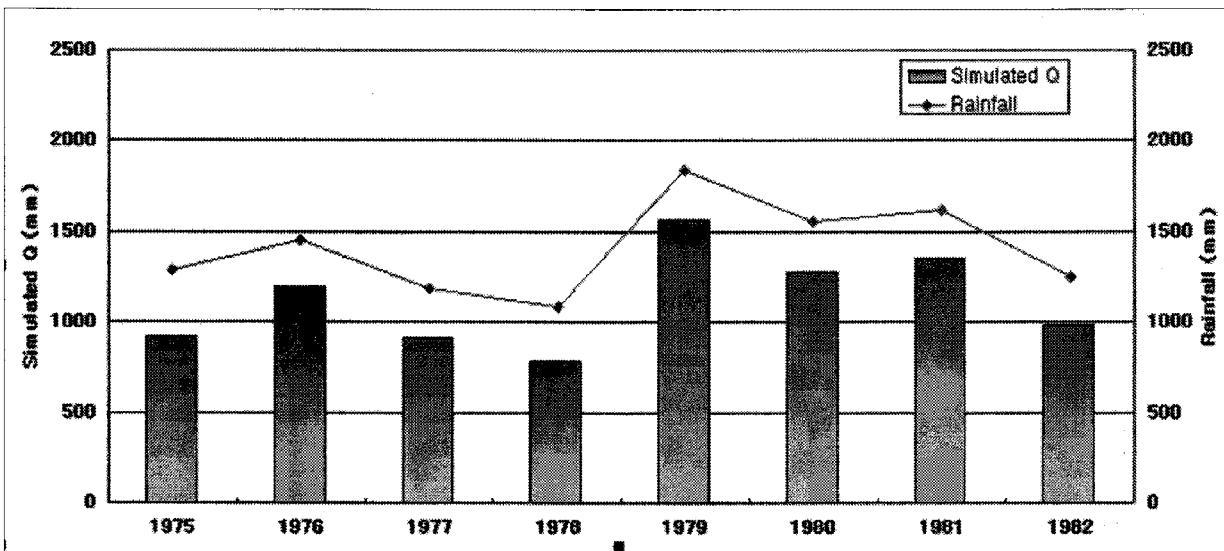


Fig. 8. Result of the past runoff simulation of the basin of Oaedo watershed (year).

용한 결과는 Table 3과 같다.

과거와 현재의 토지피복자료를 각각 이용하여 산정된 결과를 보면 과거(1975~1982) 8년간의 평균 직접유출율은 14%로 산정되었으며, 현재(2000~2008) 8년간의 평균 직접 유출율은 22%로 산정되었다.

4. 결 론

제주도 외도유역을 대상으로 토지이용변화에 따른 하천유역의 유출량을 산정하기 위하여 과거(1975년)와 현재(2000년) 각각의 유출량을 산출하여

비교해 본 결과는 연구대상유역인 외도천 유역의 과거와 현재 중·상류부의 토지피복변화는 크지 않으나 하류부 지역의 불투수성 도시화면적은 과거에 비하여 현재에 2배 이상 증가하였다. 이에 따라서 재해에 큰 영향을 미치는 직접 유출율도 8% 가량 증가함을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 외도천에 SWAT모형을 적용하여 8개년의 일 유출량을 모의해본 결과 유출에 대해서 전체적으로 우수한 결과를 보이고 있다. 향후 지속적인 수문관측과 관측지점을 확충하여 고품질의 자료를 확보함으로써, 도시화 진행에 따른 유출

Table 3. Direct outflow comparison between the past and the present

Year	Rainfall (mm)	Direct flow (mm)	Flow percent (%)	Year	Rainfall (mm)	Direct flow (mm)	Flow percent (%)
1975	1286	98.4	8	2000	1024	191.21	19
1976	1449	150.34	10	2001	1245	153.4	12
1977	1183	82.42	7	2002	1625	397.53	24
1978	1081	134.14	12	2003	1665.5	411.88	25
1979	1834	441.82	24	2004	1190	214.4	18
1980	1550	155.52	10	2005	696.8	46.63	7
1981	1618	401.06	25	2006	1462.7	362.61	25
1982	1254	131.29	10	2007	1749.5	556.99	32
Average	1406.8	199.4	14	Average	1332.3	291.8	22

의 변화를 비교 분석해 나간다면, 도시화에 의한 수문학적 변화 양상을 정량적으로 규명할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 제주도의 통합수문모델의 개발, 지속 가능한 수자원 개발 및 지하수 자원의 감소에 대처할 수 있는 지표수 자원의 이용·개발에 관한 기초적인 연구이며, 종합수자원 개발계획에 반영할 수 있는 토대를 마련하고, 도시화에 따른 도시배수시스템 재정비, 우수관거 신설 등 해당유역의 하천정비계획 및 재해방지대책수립 등에 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 1) 제주특별자치도, 한국수자원공사, 2003, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(Ⅲ) 보고서, 182-251.
- 2) 양성기, 2007, 지구의 수권과학, 구미서관, 302pp.
- 3) 신현석, 강두기, 2006, SWAT모형을 이용한 인공저류시설물의 하류장기유출 영향분석 기법에 관한 연구, 한국수자원학회지, 39(3), 227-240.
- 4) 김정곤, 손경호, 노준우, 장창래, 고익환, 2006, SWAT모형을 이용한 갑천유역에 대한 수문특성

분석 및 도시화 영향평가, 한국수자원학회지, 39(10), 881-890.

- 5) 지동식, 임장혁, 안재현, 안원식, 2002, 이상기후와 도시화에 따른 홍수량 변화에 관한 연구, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 104-107.
- 6) 이승중, 김영오, 이상호, 이길성, 2005, WEP모형을 이용한 도림촌 유역 물순환 모의, 한국수자원학회지, 38(6), 449-460.
- 7) 박민지, 권형중, 김성준, 2005, HSPF모형을 이용한 토지 피복변화에 따른 유출변화, 한국수자원학회지, 38(6), 495-504.
- 8) 서정진, 2005, 제주도 소유역 지하수함양량산정 모델 연구, 석사학위논문, 해양토목공학과, 제주대학, 제주.
- 9) 문덕철, 양성기, 고기원, 박원배, 2005, 제주도 주요 하천의 기저유출량산정, 한국환경과학회지, 14(4), 405-412
- 10) 정우열, 양성기, 2008, 제주도 하천에 대한 SWAT모형의 적용, 한국환경과학회지, 17(9), 1039-1052.
- 11) 양성기, 2007, 제주도의 하천관리와 개선방안, 하천과 문화, 한국하천협회, 3(4), 104-115.
- 12) 장대원, 김남원, 김형수, 서병하, 2004, GIS기반의 SWAT모형을 이용한 하천 유출량 모의, 한국수자원학회 학술대회논문집, 724-730.