

碩士學位論文

SWAT 모형을 이용한 제주도
하천의 유출량 모의



濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

鄭 宇 列

2008

SWAT 模型을 利用한 濟州道 河川의 流出量 模擬

指導教授 楊 城 基

鄭 宇 列

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2008年 2月

鄭宇列의 工學 碩士學位 論文으로 認准함

審査委員長

박 상 려



委 員

이 등 우



委 員

양 성 기



濟州大學校 大學院

2008年 2月

Simulation of runoff of rivers in Jeju Island using SWAT model

Woo-Yul Jung

(Supervised by Professor Sung-Kee Yang)

A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirements for the degree of Master of Engineering

2008.

This thesis has been examined and approved.

Department of Civil & Ocean Engineering

GRADUATE SCHOOL

CHEJU NATIONAL UNIVERSIT

目 次

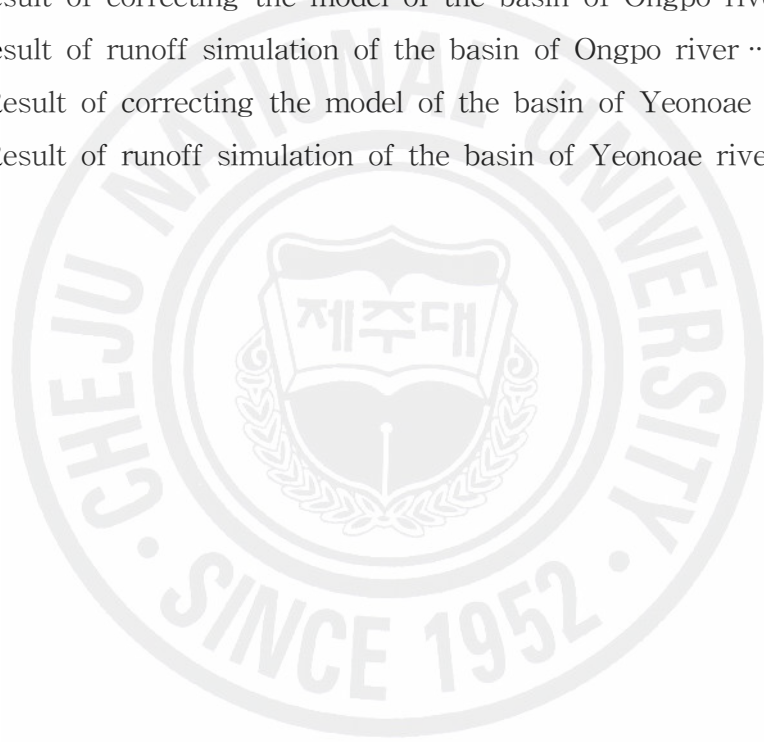
目 次	i
LIST OF TABLES	iii
LIST OF FIGURES	v
Summary	vii
I. 서 론	1
1. 연구의 배경	1
2. 연구의 목적	2
II. 연구대상 유역 및 연구방법	4
1. 연구대상 유역	4
2. 연구 방법	5
III. SWAT 모형의 이론적 배경	7
1. 강우-유출 모형	7
2. SWAT 모형의 이론적 배경	10
2.1 SWAT 모형의 개요	10
2.2 SWAT 모형의 구조	11
2.3 기상	14
2.4 수문	21
2.5 추적	36
3. SWAT 모형의 연구동향	39
IV. SWAT 모형의 입력자료 분석 및 구축	44
1. 대상유역의 수문·기상자료	44
1.1 기상자료 분석	45
1.2 강우량자료 분석	47
2. 대상유역의 GIS 자료 구축	52
2.1 DEM(수치고도자료) 구축	52

2.2 토지피복도(Landuse map)	55
2.3 토양도(Soiltype map)	57
V. SWAT 모형의 제주도 주요하천 적용	63
1. 매개변수 민감도 분석	63
1.1 매개변수 추정	63
1.2 민감도 분석	65
1.3 목적함수	69
2. 모형의 보정과 적용	71
2.1 천미천 유역	71
2.2 외도천 유역	73
2.3 옹포천 유역	75
2.4 연외천 유역	77
VI. 결 론	79
참고문헌	81

List of Figures

Fig. II-1. Basin for the study	4
Fig. II-2. Flow chart of the study contents	6
Fig. III-1 Floodgate circulation about the part of land	12
Fig. III-2 Mimetic diagram of calculating process of SWAT model about the small basin	13
Fig. III-3 Tracing process of SWAT model about the river	14
Fig. III-4 Average atmosphere temperature and land temperature for 4 year	17
Fig. III-5 In case of 50% coverage, dimension-decreasing curve according to the change of SNO_{100}	20
Fig. III-6 Approximate path of water particle in SWAT model	21
Fig. III-7 Difference of the actual infiltration and the infiltrating aspect of Green & Ampt formula	25
Fig. III-8 Perfect inclined plane of concept	30
Fig. III-9 Movement of number field in the dynamic undercurrent model	31
Fig. III-10 Oppressed/not-oppressed Aquifer(Dingmann 1994)	32
Fig. III-11 Transition process of nitrogen in SWAT	35
Fig. III-12 Transition process of phosphorus in SWAT	35
Fig. III-13 Transition process of insecticide in SWAT	36
Fig. IV-1. Precipitation by month and by precipitation observatory of Chunmi river basin	48
Fig. IV-2. Precipitation by month and by precipitation observatory of Oaedo river basin	49
Fig. IV-3. Precipitation by month and by precipitation observatory of Ongpo river basin	50
Fig. IV-4. Precipitation by month and by precipitation observatory of Yeonoae river basin	51
Fig. IV-5. DEM of basin to be studied	53
Fig. IV-6. Land-cover map of basin to be studied	55
Fig. IV-7. Soil map of basin to be studied	58
Fig. V-1. Rate of change of direct runoff according to the rate of change of	

parameter of the basin of a dry river	66
Fig. V-2. Rate of change of direct runoff according to the rate of change of parameter of the basin of a river	67
Fig. V-1. Rate of change of direct runoff according to the rate of change of parameter of the basin of a river	68
Fig. V-4. Result of direct runoff simulation of the basin of Chunmi river	72
Fig. V-5. Result of simulation by year of the basin of Chunmi river	72
Fig. V-6. Result of correcting the model of the basin of Oaedo river	74
Fig. V-7. Result of runoff simulation of the basin of Oaedo river	74
Fig. V-8. Result of correcting the model of the basin of Ongpo river	76
Fig. V-9. Result of runoff simulation of the basin of Ongpo river	76
Fig. V-10. Result of correcting the model of the basin of Yeonoae river	78
Fig. V-11. Result of runoff simulation of the basin of Yeonoae river	78



List of Tables

Table II-1 Summary of rivers of the basins to be studied	5
Table III-1 Classification of model according to hydrological process	8
Table III-2 Various hydrological simulation models (Jin Rack-sun, 2005)	10
Table III-3 Method of weather generator	19
Table III-4 Classification of soil group in SCS runoff curve method	23
Table III-5 Runoff curve index of natural region, CN (AMC-II, $I_a = 0.2S$)	24
Table III-6 Input data according to PET calculating method	27
Table III-7 Domestic · international research trend about the used and the development of SWAT model	43
Table IV-1. Weather input data of the basin to be studied	44
Table IV-2. Status of meteorological post of the basins to be studied	45
Table IV-3. Weather data by month of Jeju meteorological post	45
Table IV-4. Weather data by month of Seogwipo meteorological post	46
Table IV-5. Weather data by month of Sungsanpo meteorological post	46
Table IV-6. Weather data by month of Gosan meteorological post	47
Table IV-7. Basin dimension and the status of rainfall observatory at the basins to be studied	47
Table IV-8. Rainfall data by month of rainfall observatory at the basin of Chunmi river (1999~2006, for 8 years)	48
Table IV-9. Rainfall data by month of rainfall observatory at the basin of Oaedo river (2000~2006, for 7 years)	49
Table IV-10. Rainfall data by month of rainfall observatory at the basin of Ongpo river (2000~2006, for 7 years)	50
Table IV-11. Rainfall data by month of rainfall observatory at the basin of Yeonoae river (2000~2006, for 7 years)	51
Table IV-12. Result of altitude analysis at the basin of Chunmi river	53
Table IV-13. Result of altitude analysis at the basin of Oaedo river	54
Table IV-14. Result of altitude analysis at the basin of Ongpo river	54

Table IV-15. Result of altitude analysis at the basin of Yeonoae river	54
Table IV-16. Ground coverage state at the basin of Chunmi river	56
Table IV-17. Ground coverage state at the basin of Oaedo river	56
Table IV-18. Ground coverage state at the basin of Ongpo river	56
Table IV-19. Ground coverage state at the basin of Yeonoae river	57
Table IV-20. Rate and dimension by soil series at the basis of Chunmi river ..	59
Table IV-21. Rate and dimension by soil series at the basis of Oaedo river	60
Table IV-22. Rate and dimension by soil series at the basis of Ongpo river	61
Table IV-23. Rate and dimension by soil series at the basis of Yeonoae river ..	62
Table V-1. Parameter in SWAT model	64
Table V-2. Value for analyzing the sensitiveness of hydrological parameters related to runoff	65
Table V-3. Rate of change of direct runoff according to the rate of parameter at the basin of a dry river	66
Table V-4. Rate of change of direct runoff according to the rate of parameter at the basins except for a river	67
Table V-5. Rate of change of total runoff according to the rate of parameter at the basins except for a river	69
Table V-6. Corrected parameter of the basin of Chunmi river	71
Table V-7. Result of simulation by year of the basin of Chunmi river	72
Table V-8. Corrected parameter of the basin of Oaedo river	73
Table V-9. Reinforced parameter at the basin of Ongpo river	75
Table V-10. Reinforced parameter at the basin of Yeonoae river	77

Summary

The outflow within the basin was calculated as applying SWAT model of Semi-distributed rainfall-runoff model firstly at Jeju Island to the important rivers(Chunmi river, Oaedo river, Ongpo river and Yeonoae river). The data of watergate · weather and GIS input data (DEM, Landuse map, Soiltype map) were constructed as the input data to be applied to the basins to be studied and the parameters related to the runoff among the hydrological parameters of model were selected to analyze the sensitiveness.

The basin of Chunmi river of the eastern region of Jeju Island, as the result of correcting as utilizing direct runoff data of 2 surveys , appeared the similar value to the existing basin average runoff rate as 22% of average direct runoff rate for the applied period. The basin of Oaedo river of the northern region showed R^2 of 0.93, RMSE of 14.92 and ME of 0.70 as the result of correcting as utilizing runoff data in the occurrence of 7 rainfalls. The basin of Ongpo river of the western region showed R^2 of 0.86, RMSE of 0.62 and ME of 0.56 as the result of correcting as utilizing runoff data except for the period of flood in 2002~2003. Yeonoae river of the southern region showed R^2 of 0.85, RMSE of 0.99 and ME of 0.83 as the result of correcting as utilizing runoff data of 2003.

As the result of calculating runoff for the long term about 4 basins of Jeju Island(Chunmi river, Oaedo river, Ongpo river and Yeonoae river) from the above results, SWAT model wholly appears the excellent results about the long-term daily runoff simulation. If SWAT model is constructed as ensuring further more runoff data and analyzing · verifying with the result of this study, it is judged to have very excellent utilization at the aspect of the long-term

daily runoff simulation of Jeju Island and the integrating management of whole basins.



I. 서론

1. 연구의 배경

제주도는 연평균 강우량이 1,975mm에 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 있다(제주도·수자원공사, 2003). 또한 한라산 백록담을 중심으로 남·북사면에 발달해 있는 하천들은 경사가 급할 뿐만 아니라, 20km 미만의 짧은 연장으로 인하여 강우에 의한 홍수유출 지속시간이 2~3일에 불과하고 강우 후에는 6개의 하천을 제외하고는 건천의 상태를 이루는 하천들이 대부분이다.

제주도의 하천은 한라산에서 시작되는 지형적 특성으로 인해 경사가 급하게 발달되어 신속한 유출을 보이며 있으며, 유출시간도 수 시간 내지 1일 정도로 매우 짧다. 건천의 하상특성이 상류부에서는 모래나 자갈 등으로 구성되어 우수한 투수성을 보이나 해안에 가까울수록 기반암이 노출되어 투수성이 불량하며 하류부에서는 인근 도시지역 불투수층의 증가로 강우에 신속히 반응하여 유출을 보인다. 또한 건천의 특징은 강우에 의해서 점진적으로 홍수유출량이 증가되는 육지 하천과는 달리 투수성이 양호한 하상의 상태로 인하여 하천표층이 포화된 후 홍수가 갑작스럽게 일어나는 특징을 보이며, 건천의 유출형태는 특정 강우에 의해 의해서만 유출을 보이고 있다.

제주도의 143개 하천 중 6개의 하천을 제외한 전 하천들은 건천의 형태를 이루고 있어 지표수의 발달이 매우 빈약하다. 따라서 제주도민의 생활 및 산업활동에 필요한 용수는 전적으로 지하수에 의존하고 있다. 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 다다른 실정이다.

제주도는 고도성장과 개발에 따른 인구, 토지이용 등의 증가로 인하여 용수 수요가 날로 급증하고 있는 추세이다. 그러나 인구 밀집지역 및 농업지역 등 단지 수요

에 편중된 무분별한 개발로 인하여 질산성 질소의 농도 증가와 같은 수질 악화 현상이 확산되는 등 지하수 개발의 난맥상이 노출되기 시작하였다. 제주도는 1991년에 제정한 「제주도개발특별법」에서 국내 최초로 지하수 보전·관리에 관한 조항을 명기하여 지하수 관리의 법적 근거를 마련한 이후 1995년과 2000년에 법을 전문 개정하여 지하수 관리에 필요한 법적·제도적 장치를 보완하여 지하수 개발을 제한하는 지하수관리 정책을 시행하고 있다(양과 양, 2007). 이같이 늘어나는 용수수요의 추세와 수자원을 확보하기 위해 제주도의 지표수 개발이 절실하게 필요한 실정이다(제주도, 2001).

지표수자원 개발을 위하여 가장 기본적으로 제주도 하천에 대한 수문조사가 필요하다. 현재 제주도에서는 여러 주요하천에 대하여 수위·유속계를 설치하여 수문조사가 시행되고 있다. 그러나 제주도의 주요하천에 대하여 모든 수문조사를 실시하기 위해서는 더욱더 많은 장비와 인력이 추가되어야 하고 비 홍수기에 발생하는 유출량에 대해서도 지속적인 조사가 필요하지만 현재로서는 그러지 못하고 있다. 따라서, 현재로서 제주도 주요하천의 연속적인 유출량을 산정하기 위해서는 건천의 상태를 이루는 하천과 항시 유출이 발생하는 하천을 대상으로 하여 수문모델을 적용시키는 연구가 필요한 실정이다.

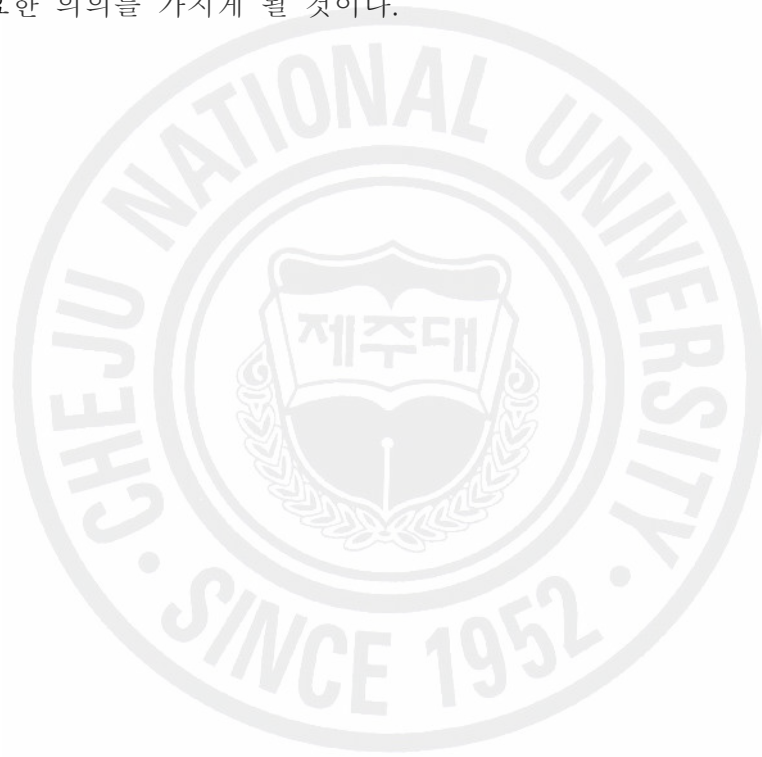
2. 연구의 목적

제주도의 수자원은 전적으로 지하수에만 의존하고 있으나, 정밀수문자료의 체계적인 확보, 전 유역에 걸친 정밀한 수문모델의 구축, 지표수 자원의 이용방안 등에 관한 연구·조사가 시급한 실정이다. 또한, 제주도 하천 유출수의 오염 부하량을 산정과 유사기구 및 침식원인의 규명, 강우자료 및 유량 측정결과를 토대로 합리적인 제주도의 정확한 유출특성의 파악, 홍수시기의 침투 홍수 모의를 위한 방법 및 적합한 모형 개발 등에 관한 연구도 병행하여 이루어져야만 한다.

제주도 수자원의 연구에서 지하수와 관련한 연구는 부분적으로 진행되어 왔으나(고기원, 박원배 등) 제주도 하천에 대한 유량관측과 수문모델을 적용하여 유출량을 산정하는 연구는 거의 없는 편이다.

본 연구에서는 장기 강우-유출 모델(continuous rainfall-runoff model)인 SWAT 모델을 적용하여 장기간에 걸친 유역내의 유출량을 산정하고자 한다. 연구 대상 유역을 정하고 대상유역의 SWAT 모델의 입력자료인 기상자료(Precipitation, Solar Radiation, Wind Speed, Climate, Humidity) 와 지형자료 (DEM, Land Use, Soil Type)을 구축하여 보다 정밀하게 유출량을 모의하려 한다.

이러한 연구 결과는 제주도의 통합수문모델의 개발, 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.



II. 연구대상 유역 및 연구방법

1. 연구대상 유역

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 지방2급 하천과 소하천을 포함하여 총 143개의 하천이 분포하고 있다.

143개의 하천 중 제주도 동부지역의 천미천, 북부지역의 외도천, 서부지역의 옹포천, 남부지역의 연외천을 연구 대상 유역으로 선정하였다(Fig. II-1).

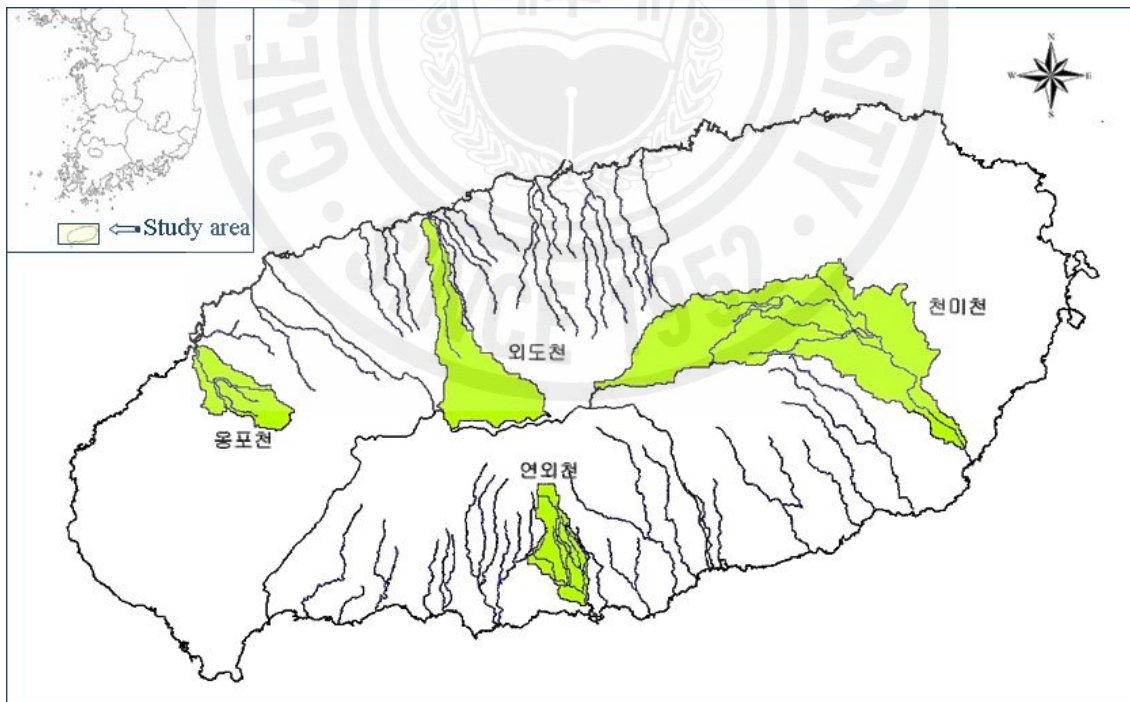


Fig. II-1. Basin for the study

Table II-1 Summary of rivers of the basins to be studied

하천명	수 계			하천길이 (km)	시작점 위치	종점위치
	본류	제1지류	제2지류			
천미천	천미천			25	서귀포 교래	서귀포 표선
진평천	천미천	진평천		8	서귀포 가시	서귀포 표선
외도천	도근천	외도천		18.3	제주 애월	제주 외도
옹포천	옹포천			6.4	제주 명월	제주 옹포
문수천	옹포천	문수천		3.2	제주 동명	제주 옹포
연외천	연외천			9	서귀포 서홍	서귀포 천지
생수천	연외천	생수천		5	서귀포 서홍	서귀포 서홍
서홍천	연외천	서홍천		5.7	서귀포 서홍	서귀포 서홍
호근천	연외천	호근천		5.5	서귀포 호근	서귀포 서홍
원제천	연외천	호근천	원제천	5	서귀포 호근	서귀포 호근

2. 연구방법

제주도 하천에 SWAT 모델을 적용하고 유출특성을 모의하기 위하여 제주도 여러 하천 중에서 제주도 동부지역의 천미천, 북부지역의 외도천, 서부지역의 옹포천, 남부지역의 연외천을 연구 대상 유역으로 선정하였다.

연구 대상유역에 대한 SWAT 모델의 입력자료인 수문·기상자료(Precipitation, Solar Radiation, Wind Speed, Climate, Humidity)와 지형자료(DEM, Land Use, Soil Type)를 구축하였다. 입력자료를 대상유역에 맞추어 구축함과 동시에 모델의 보정 및 검증을 위하여 천미천·외도천·옹포천·연외천 유역의 실측 유출자료를 수집하여 정리하였다.

모델의 입력자료를 구축하고 SWAT 모델을 이용하여 천미천·외도천·옹포천·연외천 유역의 유출 모의를 하였다. 천미천 유역은 3개의 소유역으로 분할하여 모델을 구동하였고, 외도천 유역은 유역 전체를 하나의 유역으로 정하여 모델을 구동하였다. 또한 옹포천과 연외천 유역은 2개의 소유역으로 분할하여 모델을 구동하였다. 유출 모의 결과를 바탕으로 하여 수문관련 매개변수들의 민감도 분석을 하였으

며, 민감도 분석을 통하여 보정·검정을 수행하였다.

보정·검정 작업을 수행한 결과를 바탕으로 하여 천미천·외도천·옹포천·연외천의 유출모의 결과를 분석하였으며, 향후 제주도에 필요한 연구결과 활용방안에 대하여 검토하였다. 연구내용의 흐름도는 Fig. II-2 와 같다.

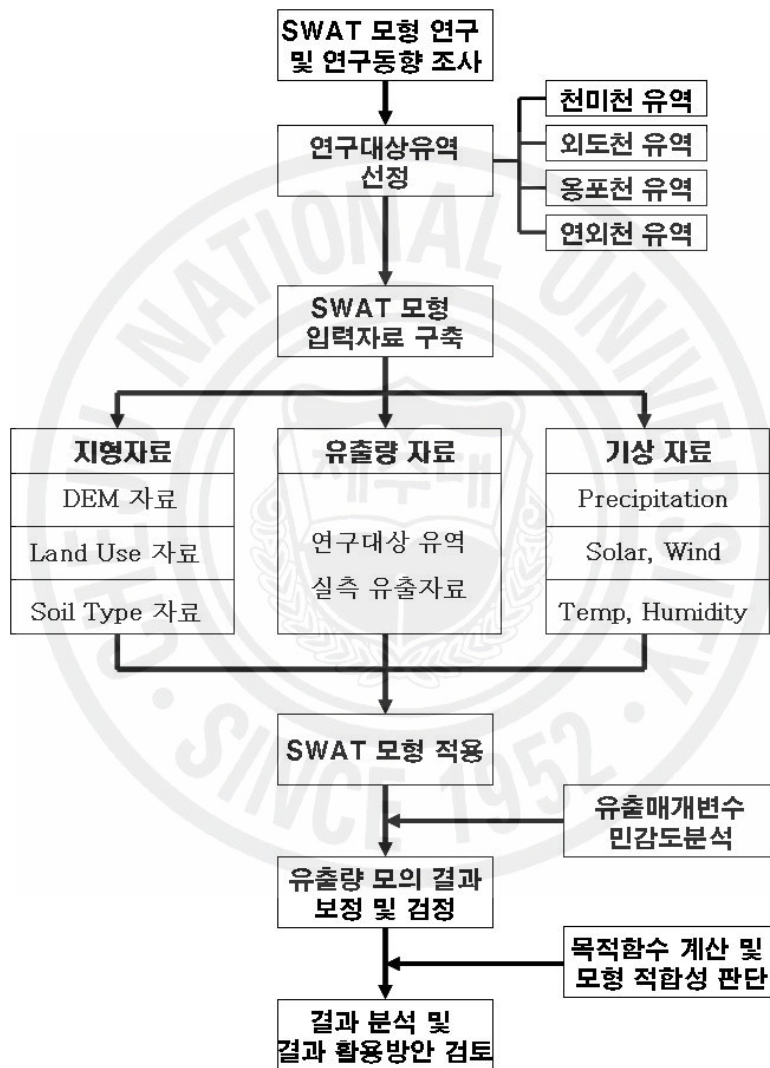


Fig. II-2. Flow chart of the study contents

Ⅲ. SWAT 모형의 이론적 배경

1. 강우-유출 모형

수문모형의 주된 분류기준으로 전원유출모형(田園流出模型)과 도시유출모형(都市流出模型), 집중형 모형(lumped parameter model)과 분산형 모형(distributed parameter model), 사상 모형(event model)과 연속형 모형(continuous model)으로 구분할 수 있다. 유역특성에 따라 전원유출모형과 도시유출모형으로 나눌 수 있으며 도시유출모형의 특징으로 도시유역 하수관거의 모의가 가능하다는 점을 꼽을 수 있다. 매개변수의 공간적 변화 유무에 따라 분산형 모형과 집중형 모형으로 구분할 수 있는데 집중형 모형은 모든 유역이 하나의 특별한 점(point)이라고 가정하여 입력자료, 경계조건, 유역의 지형적 특성 등의 공간적 변화 고려하지 않는 상미분 방정식으로 결과를 계산하여 입력값인 강우를 출력값인 유출로 변환시키는 반면, 분산형 모형은 공간적 변화를 고려하여 편미분 방정식을 지배방정식으로 하여 결과를 계산하여 공간에서 발생하는 물리적인 과정을 고려한 계산을 통해 자연계의 현상을 규명함으로써 집중형 모형보다 더욱 자세한 이론을 바탕으로 물리적 현상에 접근한다는 장점이 있다. 그러나 분산형 강우-유출 모형은 완벽하게 입력자료, 경계조건, 지형정보의 공간적 변화를 나타내는 자료가 부족하므로 집중형과 분산형이 합해진 혼합형 강우-유출 모형의 범주에 포함되는 경우가 많다. Table 3.2는 집중형, 분산형에 포함되어지는 대표적인 강우-유출 모형을 나타낸 것이다. 강우사상의 영향에 따라서는 이전 강우의 영향을 받지 않는 사상 모형과 이전 강우의 영향을 고려하여 모의하는 연속형 모형으로 구분 할 수 있다. 사상모형은 토양에 대한 침투능력이나 그 외의 수문학적 차단 능력이 건조기간 동안 달라지는 현상을 모의하지 못하는 반면 연속형 모형은 장기간에 걸친 호우와 건조기간에 대한 유출을 모의할 수 있다는 장점이 있다. Table III-1은 사상모형과 연속모형의 구분에 따른 대표적인 강우-유출모형을 나타낸 것이다. 강우-유출 모형을 적용하는 유역의 공간적 크기에 따라 유역 면적이 100 km^2 이내인 경우에는 소유역 모형, $100 \sim 1,000 \text{ km}^2$ 에서는 중유역

모형, 1,000 km^2 이상에서는 대유역 모형으로 구분할 수 있고, 적용 시간간격에 따라 시간 모형, 일 모형, 월 모형, 년 모형으로 구분할 수 있다(Singh, 1995)

Table III-1 Classification of model according to hydrological process (Singh, 1995)

분류방법	분류명칭	강우 유출 모형의 예
Hydrological Process	Lumped	HEC-1 (Hydrologic Engineering Center, 1968)
		HYMO (Williams and Hann, 1972)
		RORB (Laurenson and Mein, 1983)
		SSARR (U.S. Army Engineer, 1972)
		Tank Model (Sugawara et al., 1984)
	Distributed	IHM (Morris, 1980)
		ILLUDAS (Terstriep et al., 1974)
		NWSRFS (Hydrologic Research Lab., 1972)
		SHE (Abbott et al, 1986)
		SWAT (Arnold et al., 1994)
	Mixed	SWMM (Metcalf and Eddy, inc., et al., 1971)
		Distributed 모형에서 자료가 부족한 부분을 Lu,ped 모형으로 계산하는 경우

이러한 강우-유출 모형에서는 합리식과 같은 간단한 모형으로부터 여러 개의 매개 변수를 처리해야 하는 복잡한 모형에 이르기까지 다양한 형태의 모형들이 개발되어 있으며, 기존의 대표적인 유출모형으로는 HEC-1 (Hydrologic Engineering Center, 1968), SSARR (Streamflow Syntheses And Reservoir Rgulation; U.S. Army Engineer, 1972), SWMM (Storm Water Management Model; Metcalf and Eddy,

Inc., et al., 1971), SWAT (Soil and Water Assessment Tool; Arnold et al., 1994) 등을 들 수 있다. HEC-1 모형은 간단하여 사용자가 사용하기 편리하고 모의결과의 신뢰성 또한 높아 유역종합치수계획이나 하천정비기본계획의 홍수모의 시 널리 사용되는 모형이다. 하지만 단기호우사상에 의한 유출모의의 적용성은 높지만 모의기간이 몇 년 동안인 연속유출모형은 불가능하다. SSARR 모형은 모의시간단위가 0.1 시간에서 24시간까지 가능하며 연속유출모형으로서 하도유출모의 저수지모의가 가능하다. 하지만 SSARR 모형은 집중형 모형이어서 모의결과의 정밀도가 분산형 모형보다 떨어질 수 있고 DOS 운영체제하에서 모의되기 때문에 최근 전 세계적으로 많이 사용하는 GIS 모형과의 연동이 불가능하여 토지이용의 공간적 변화가 유출에 미치는 영향 등은 고려할 수 없다. SWMM 모형은 도시유역에서의 유량과 수질모의를 목적으로 한 분산형 모형으로서 하수관망을 고려한 도시유출모의 및 수질모의가 가능하며 단기호우사상에 의한 유출 모의와 연속유출모의가 가능하다. 하지만 SWMM 모형 또한 GIS 모형과의 연동이 불가능한 관계로 각 소유역의 면적을 균등한 유역특성 (경사, 조도 등)을 갖는 직사각형유역으로 계산함으로써 토지이용의 공간적 변화가 유출에 미치는 영향 등은 고려할 수 없다. SWAT 모형은 물리적 기반 모형으로서 과거부터 최근까지 GIS (Geographical Information System)로 구축된 자료로부터 토양 (soil type), 토지이용 (land use), 지형정보를 추출하여 입력자료로 사용함으로써 자세하고 정확한 모의가 가능하다는 장점이 있다. 또한 GIS로 작성하되 토지이용자료를 사용하기 때문에 토지이용의 공간적 변화가 유출에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있다는 장점과 대상유역을 HRU (Hydrologic Response Unit)라는 계산단위로 나눠 수문모의를 함으로서 소유역부터 대유역까지 모의가 가능하다는 장점이 있다. HRU는 격자(Cell)형태의 계산단위로서 토양, 토지이용, 지형자료가 포함되어 있고 사용자가 목적에 따라 크기를 조절할 수 있어 모의시간을 조절할 수 있으며 매개변수의 추정 또한 HRU별로 할 수 있다. 모형의 한계로서 모형의 최소모의 시간단위가 일 (day)이기 때문에 홍수 시 유출에 대한 유출량은 일 (day) 단위로 밖에 산정할 수 없지만 현재 시(hour) 단위로 해석 하는 연구가 점차 진행되어지고 있다.

Table III-2 Various hydrological simulation models (Jin Rack-sun, 2005)

Event Simulation Models		
1961	SFM	Storage Function Method
1968	HEC-1	HEC-1 Flood Hydrograph Package
1972	HYMO	A Problem-Oriented Computer Language for Building Hydrologic Models
1972	USGS	USGS Rainfall Runoff Model

Continuos Simulation Models		
1958	SSARR	Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation
1966	SWM-IV	Stanford Watershed Model-IV
1967	HSP	Hydrocomp Simulation Program (SWM version)
1969	OPSET	Self-Optimizing Hydrologic Simulation Model
1970	TWM	Texas Watershed Model (SWM version)
1972	NWSRFS	National Weather Service River Forecast System
1972	OSUSWM	Ohio State University version of SWM-IV
1972	DISPRIN	Water Resources Board Dee Research Model
1972	UBCWM	University of British Columbia Watershed and Flow Model
1973	SACRAMENTO	National Weather Service Sacramento Model
1974	USDAHL-74	U.S. Dept. of Agriculture Hydrograph lab. Watershed Model
1975	IMH2-SVP	Institute of Meteorology and Hydrology of Romania Model
1980	HSPF	Hydrological Simulation Program-Fortran
1993	SWAT	Soil of Water Assessment Tool

Urban Runoff Simulation Models		
1967	HSP	Hydrocomp Simulation Program
1970	MITCAT	MIT Catchment Model
1971	SWMM	Storm Water Management Model
1972	UCURM	University of Cincinnati Urban Runoff Model
1974	ILLUDAS	Illinois Urban Drainage Area Simulator
1974	STROM	Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model

2. SWAT모형의 이론적 배경

2.1 SWAT 모형의 개요

SWAT 모형은 미국 농무성의 농업연구소(USDA, Agricultural Research Service,

ARS)에서 개발된 유역모델로서 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측하기 위해 개발된 모형이다.

SWAT 모형은 일 단위의 모의가 가능한 유역단위의 준 분포형 장기-강우유출모형으로서 4가지의 부모형(sub-model)으로 구성되어 있다. 즉 수문 부모형, 토양유실 부모형, 영양물질 부모형, 하도추적 부모형으로 구분된다. 이 중에서 수문 부모형은 저류방정식에 의해 일 단위로 물수지를 산정하며, 차단, 지표면 유출, 중간유출(측방 유출), 침투, 기저유출, 수로손실, 증발산 등으로 구성되어 있다.

SWAT 모형에서 일변 지표면 유출량은 SCS방법을 이용하여 산정하며, 측방유출은 Kinematic Storage Model(Solen et al., 1983)을 이용하고 침투는 토층을 최대 10개 층까지 세분화하여 선형저수량 추적기법을 사용하여 계산한다. 또한 SWAT은 지하수를 두개의 대수층으로 구분하였다. 즉 유역의 하천에 회귀수를 공급하는 얇은 비피압 대수층과 유역 밖의 하천에 대한 회귀수에 기여하는 깊은 피압 대수층으로 나누어 물수지에 의해 계산된다. 모형에서는 잠재 증발산을 산정하기 위하여 Hargreaves, Priestley-Taylor, Penman-Monteith 방법을 제공한다.

SWAT 모형의 입력자료는 GIS를 통해 작성되는 기상, 하도추적, 지하수 등의 자료와 GIS와 수동 입력을 병행하여 작성되는 소유역 자료로 구분된다. 또한 출력자료는 토양도와 토지이용도를 중첩시켜 만든 수문반응단위(HRU)별 출력자료와 유역 경계에 의해 구분된 소유역별 자료, 각 하도추적 구간별 결과치로 구분된다.

2.2 SWAT 모형의 구조

SWAT 모형을 이용하여 어떠한 문제를 연구하든지, 물수지는 유역 내에서 발생하는 모든 상호작용 중에서 가장 중요하다. 물과 유사, 영양물질의 이동을 정확히 예측하기 위해서는 모형에 의해 모의되는 수문순환(hydrologic cycle)과정이 유역 내에서 발생하는 현상과 일치하여야 한다. 따라서 SWAT 모형은 유역의 수문순환에 대한 모의를 크게 두 부분으로 나누고 있다. 첫 번째 부분은 토지부분으로 각 소유역의 주 하천에서의 물(water), 침전물(sediment), 영양물질(nutrient), 살충제(pesticide)의 부하량을 조절한다. 두 번째 부분은 추적부분으로 유역의 하천조직에서 출구까지의 물과 유사 등의 이동으로 정의될 수 있는 수문순환의 추적에 관한 부분으로 나누어진다.

1) 수문순환의 토지부분

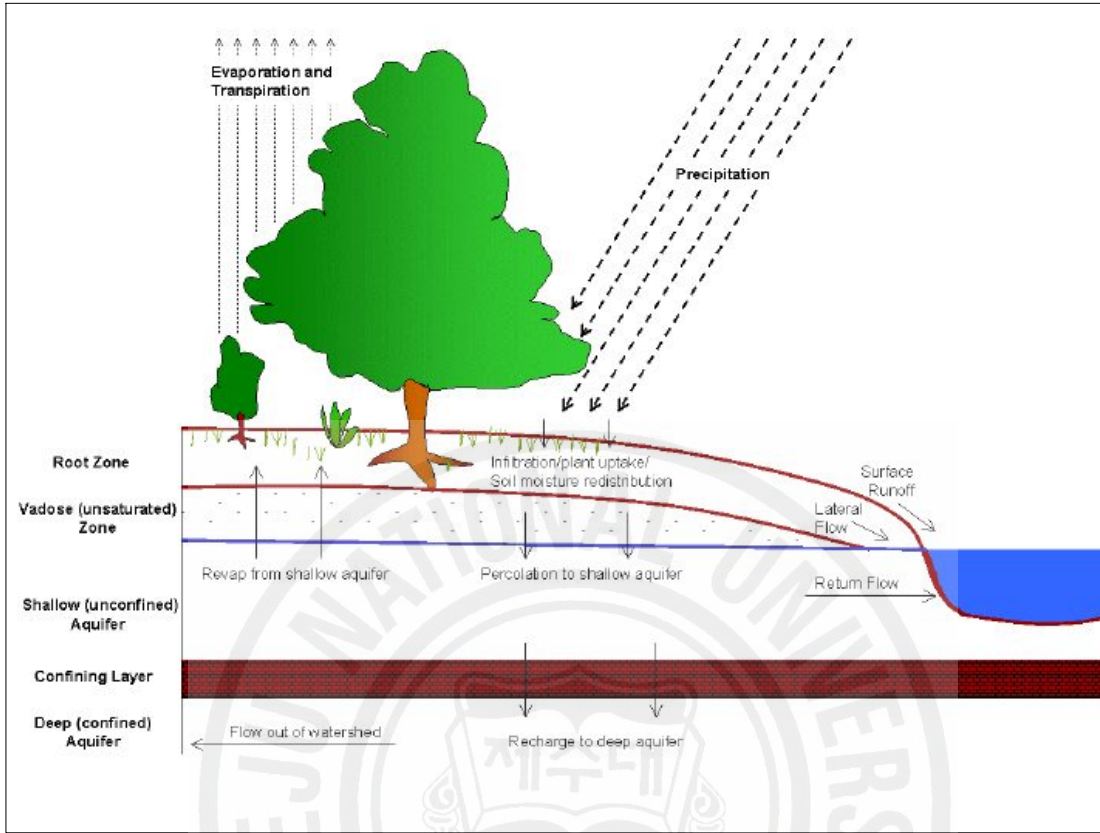


Fig. III-1 Floodgate circulation about the part of land (Arnold, 2000)

Fig. III-1 은 SWAT 모형의 수문순환의 토지부분(land phase of the hydrologic cycle)에 대한 각 구성 요소를 개략적으로 재현한 것이다. SWAT 모형에서는 토지 부분의 수문순환을 정확히 예측하기 위하여 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산, 지표 유출, 기저 유출, 지하수 등에 대한 모의를 각 수문반응단위 별로 계산할 수 있다.

SWAT 모형에서 사용하는 물수지 방정식은 다음 식 (3.1)과 같다.

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (3.1)$$

여기서, SW_t : 최종일의 초양수분량(mmH_2O)

SW_o : I일의 초기토양수분량(mmH_2O), t : 시간(일)

R_{day} : I일의 강수량(mmH_2O), Q_{surf} : I일의 지표유출량(mmH_2O)

E_a : I일의 증발산량(mmH_2O), Q_{gw} : I일의 회귀수량(mmH_2O)

w_{seep} : I일의 토양면에서 투수층으로 투수되는 총량(mmH_2O)

모형에서 유역을 다양하게 구분하면 여러 종류의 작물과 토양에서의 다양한 증발산을 반영할 수 있다. 각 수문반응단위에서 유출이 구분되어 계산되어지며 유역의 총 유출량을 얻기 위하여 하도 추적이 이루어진다. 이를 통하여 정확하고 향상된 물수지에 대한 물리적 해석이 가능하다. Fig. III-2 는 수문순환의 토지부분을 모의하기 위해 SWAT 모형에서 사용되는 일반적인 계산과정을 나타낸다.

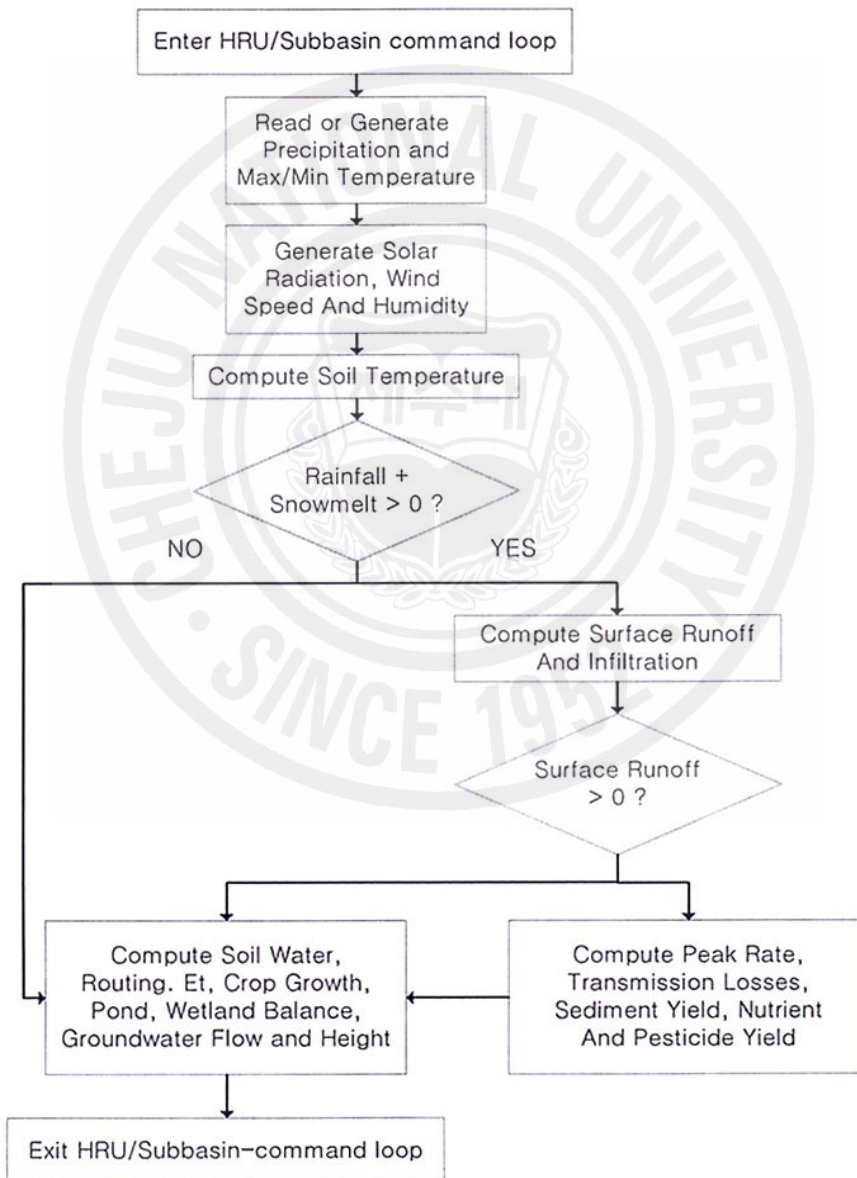


Fig. III-2 Mimetic diagram of calculating process of SWAT model about the small basin

2) 수문순환의 추적

SWAT 모형의 수문순환의 토지부분에서 물과 유사, 영양물질, 살충제 등의 주하천으로의 부하가 결정되면 이 요소들은 HYMO(Williams and Hann, 1972)와 유사한 명령 구조를 사용해 유역의 하천망을 통하여 추적된다. 또한 하천에서의 흐름을 추적하는 외에도, SWAT 모형은 하천 및 하상에서의 화학물질 거동도 모형화 한다.

SWAT에서 수문순환의 추적(routing phase of The hydrologic cycle)은 크게 두 가지로 나누어진다. 첫 번째는 주 하천 및 하도에서의 추적을 나타내며 이는 홍수, 유사, 영양물질, 농업화학물질 등을 추적할 수 있다. 두 번째는 저수지 추적으로 저수지의 유출량, 저수지 영양물질, 저수지 유입 유사 등을 추적할 수 있다. Fig. III-3은 이와 같은 하천 내에서의 다양한 추적과정을 보여준다.

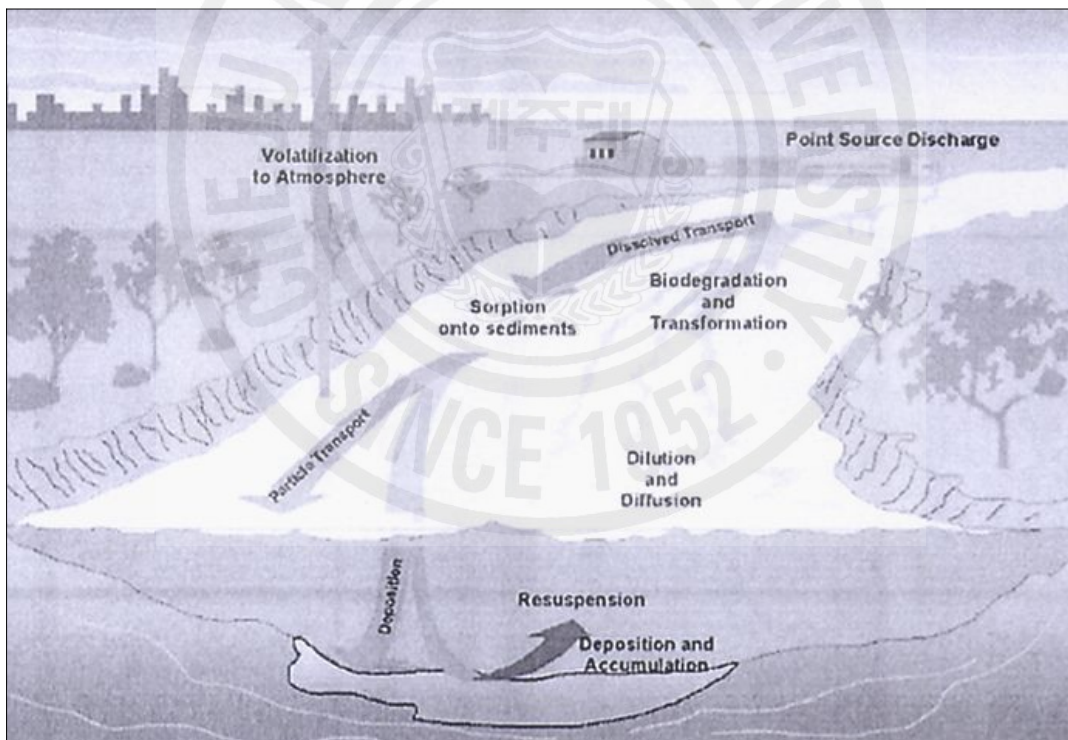


Fig. III-3 Tracing process of SWAT model about the river(Arnold, 2000)

2.3 기상

유역의 기상(climate)은 물수지를 조절하고 수문순환의 여러 성분 중에 상대적으로 중요한 사항을 결정하는 수분 및 에너지를 제공한다. SWAT에서 필요한 기상 변수

들은 일강수량, 최고/최저온도, 일사량, 풍속 및 상대습도 등이다. 이들 요소의 값들은 관측 자료로부터 입력되거나 모의 기간 중에 모의 발생된다.

1) 에너지

강수와 같은 시스템을 설명하는데 있어서 수문순환에서 물의 이동을 조절하는 인자로 일사량과 온도(temperature)와 같은 에너지(energy)를 들 수 있다. 일사량과 온도는 강설을 포함하는 모형 내 과정에 중요한 영향을 미친다. 증발이 유역 내 물의 중요한 전이 요소이기 때문에 물수지를 정확히 모의하는데 있어서 에너지의 유입은 매우 중요한 부분이다.

① 일사량

일사량(solar radiation)을 계산하기 위해 SWAT에서는 태양과 지구와의 거리, 태양과 지구와의 기울기, 태양의 일출·한낮·일몰 등의 초기자료를 유역의 위·경도 자료를 가지고 계산한다. SWAT 모형에서는 증발산량을 산정하는 과정에서 위도 자료 및 일조시간을 입력 자료로 사용한다. 일조시간과 위도 자료가 입력 자료로 들어가서 소유역에 대한 일 태양 복사량을 구할 수 있다. SWAT 모형에서 제시하는 순복사량은 다음과 같다.

태양 입사 복사량(H_0)

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{SC} E_0 [\omega T_{SR} \sin \delta \sin \Phi + \cos \delta \cos \Phi \sin(\omega T_{SR})] \quad (3.2)$$

여기서, E_0 : 태양 궤도의 이심률 상관 계수

I_{SC} : 태양상수 ($4.92 MJ m^{-2} h^{-1}$), H_0 : 대기권 밖의 일사량 ($MJ m^{-2} d^{-1}$)

T_{SR} : 일출 시간 ($T_{SR} = + \frac{\cos^{-1}[-\tan \delta \tan \Phi]}{\omega}$), Φ : 지리학적 위도

ω : 지구 자전 각속도 ($0.268 rad h^{-1}$), δ : 태양 입사각

구름에 의한 차단을 고려한 입사복사량 (H_{MX})

SWAT 모형에서는 구름에 의한 차단 효과를 대략 20%로 가정하고 있다. 이를 보정한 지표면에 유입되는 입사복사량의 최대치를 다음과 같이 계산한다.

$$H_{MX} = 30.0 E_0 [\omega T_{SR} \sin \delta \sin \Phi + \cos \delta \cos \Phi \sin(\omega T_{SR})] \quad (3.3)$$

여기서, H_{MX} : 맑은 날 지표면에 도달 가능한 복사량

순 단파 복사량 $((1 - \alpha) \cdot H_{day})$

SWAT 모형에서는 순 단파 복사량을 토양성분, 식생분포, 눈의 피복 상태의 함수에 의한 일 알베도(albedo)값을 가지고 계산한다.

- 등가의 물로 환산한 눈의 양이 5mm 보다 크면,

$$\alpha = 0.8$$

- 눈의 양이 0.5mm 보다 작고 HRU에 식물의 생장이 없으면

$$\alpha = \alpha_{soil} (\alpha_{soil}: \text{토양 알베도})$$

- 눈의 양이 0.5mm 보다 작고 식물의 생장이 있을 경우

$$\alpha = \alpha_{plant} \cdot (1 - cov_{soil}) + \alpha_{soil} \cdot cov_{soil} \quad (3.4)$$

$$cov_{soil} = \exp(-5 \times 10^{-5} \cdot CV)$$

여기서, cov_{soil} : 토양 피복 인덱스, CV : 지표위의 바이오매스와 잔류물 ($kg\ ha^{-1}$)

순 장파 복사량(H_b) (Doorenbos and Pruitt, 1977)

$$H_b = -[0.9 \cdot \frac{H_{day}}{H_{MX}} + 0.1] \cdot [0.34 - 0.139\sqrt{e}] \cdot \sigma \cdot T_k^4 \quad (3.5)$$

여기서, H_b : 순 유입 장파 복사량, T_k : 평균 온도(Kelvin)

σ : Stefan-Boltzmann 상수 ($4.903 \times 10^{-9} MJm^{-2}K^{-4}d^{-1}$) e : 증기압

일 순 복사량(H_n)

$$H_n = (1 - \alpha) \cdot H_{day} + H_b \quad (3.6)$$

여기서, H_n : 순 복사량, H_{day} : 단파 복사량

H_b : 순 유입 장파 복사량, α : 단파 반사율

② 온도

온도(temperature)는 물리적, 화학적, 생물학적 과정에 다양한 영향을 미치며, 식

물의 생장은 온도와 매우 밀접한 관계가 있다. SWAT 모형 전반에 걸쳐 온도는 증발산 및 토양 온도에 영향을 미치는 중요한 요소이다.

일대기 온도(Daily air temperature) : SWAT 모형은 일 최대 기온과 일 최저 기온을 입력 자료로 요구한다. 온도 자료는 직접 입력되거나 모형 내에서 모의 될 수 있다. 온도 자료는 모형의 정확성에 매우 큰 영향을 미친다. SWAT에서는 유역과 가까운 지점의 온도 자료를 사용하도록 되어 있다.

시 대기 온도(Hourly air temperature) : 일대기 온도를 가지고 시 대기 온도를 생성하기 위해서는 식 (2.7)과 같은 계산이 필요하다.

$$T_{hr} = \overline{T_{av}} + \frac{T_{mx} - T_{mn}}{2} \cdot \cos(0.2618 \cdot (hr - 15)) \quad (3.7)$$

여기서, T_{hr} : 일의 hr 시간동안의 온도 (°C), $\overline{T_{av}}$: 일 평균 기온 (°C)

T_{mx} : 일 최고 기온 (°C), T_{mn} : 일 최저 기온 (°C)

토양 온도(Soil temperature) : 토양 온도는 토양내에서 물의 이동 및 잔류물의 감소율에 영향을 준다. 일평균 토양 온도는 지표면과 각 토양층의 중심에서 계산된다. Fig. III-4 는 지표면으로부터 5cm, 300cm 깊이에서의 토양 온도와 대기온도를 비교한 것이다.

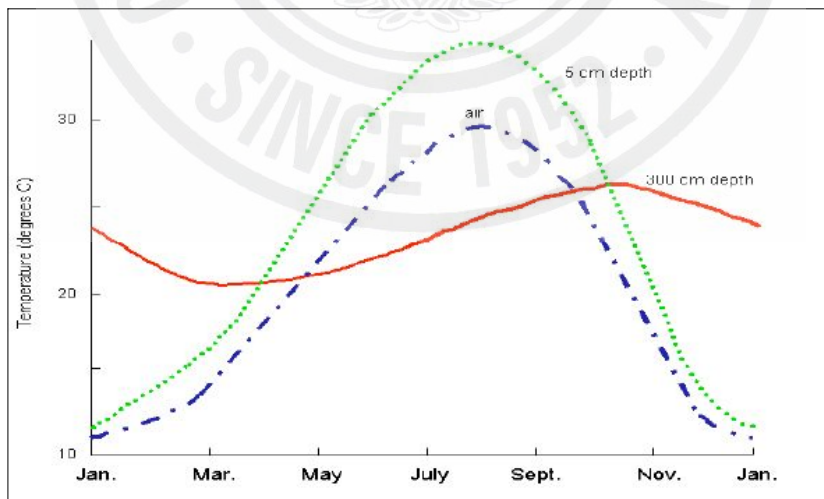


Fig. III-4 Average atmosphere temperature and land temperature for 4 year
지표면의 온도는 눈의 피복, 식물의 피복과 잔류물 피복, 나지 지표면 온도, 전날의 지표면 온도의 함수로 계산되며, 토양층의 온도는 지표면 온도, 연평균 기온과 기상조건에 의한 온도의 변화가 더 이상 일어나지 않는 토양 깊이 등의 함수로 계

산된다. 토양심(damping depth)은 습기가 있는 깊이를 의미하며 요적밀도(bulk density)와 토양수분량에 의해 좌우된다.

지표면의 온도는 식 (3.8)을 이용하여 계산한다.

$$T_{ssurf} = bcv \cdot T_{soil}(1, d_n - 1) + (1 - bcv) \cdot T_{basl} \quad (3.8)$$

여기서, T_{ssurf} : 현재일의 지표면의 온도 (°C)

bcv : 토양 피복에 따른 영향의 가중치, T_{basl} : 식생이 없는 지표면의 온도

$T_{soil}(1, d_n - 1)$: 하루 전 첫 번째 토양층의 온도 (°C)

토양층의 온도는 식 (3.9)를 이용하여 계산되며, 일반적으로 ℓ 은 0.80을 사용하고 df 는 토양층의 중간부터 토양심까지의 깊이의 비를 이용하여 계산된다.

$$T_{soil}(z, d_n) = \ell \cdot T_{soil}(z, d_n - 1) + [1.0 - \ell] \cdot [df \cdot \overline{T_{AAair}} - T_{ssurf}] + T_{ssurf} \quad (3.9)$$

여기서, $T_{soil}(z, d_n)$: d_n 해의 일 동안 깊이 z 에서의 토양 온도(°C)

ℓ : lag (0.0-1.0), $T_{soil}(z, d_n - 1)$: 이전의 토양층에서의 토양 온도

df : 지표 아래로의 토양 온도에 영향을 주는 깊이 인자

$\overline{T_{AAair}}$: 연평균 대기 온도(°C), T_{ssurf} : 그 날의 지표면 온도

수온(Water temperature) : 수온은 하천에서의 생물학적 과정과 수질의 모의 과정에서 필요한 입력요소이다. SWAT에서는 하천에서의 일평균 온도 계산 방법으로 Stefan and Preud' homme(1993)에 의해 개발된 식 (3.10)을 사용한다.

$$T_{water} = 5.0 + 0.7 \overline{T_{av}} \quad (3.10)$$

여기서, T_{water} : 수온(°C), $\overline{T_{av}}$: 그날의 평균 기온

③ 풍속(Wind speed)

SWAT 모형의 잠재 증발산과 증산 작용을 계산하기 위하여 Penman-Monteith 방정식을 사용할 때 필요한 입력 변수이다. SWAT에서는 풍속에 대한 정보를 지표면으로부터 1.7m의 관측소로부터 얻어진 자료로 가정한다.

증산을 계산하기 위하여 Penman-Monteith 방정식을 사용할 때, 측정자료는 차단(Canopy) 작용의 상부에서 측정된 자료로 사용하지만 SWAT에서는 차단 높이를

최소 1m로 규정하여 사용한다. 차단 높이가 1m를 초과할 경우, 원 풍속 자료는 식 (3.11)을 이용하여 새로운 값으로 전환된다.

$$z_w = h_c + 100 \quad (3.11)$$

여기서, z_w : 풍속 측정 높이(cm) , h_c : 차단 높이(cm)

지표면 부근의 고도에 대한 풍속의 변동성은 Haltiner and Martin(1957)이 제안한 식 (2.12)를 이용한다.

$$u_{z_2} = u_{z_1} \cdot \left[\frac{z_2}{z_1} \right]^{0.2} \quad (3.12)$$

여기서, u_{z_1} : 높이 z_1 (cm)에서의 풍속 (ms^{-1})

u_{z_2} : 높이 z_2 (cm)에서의 풍속 (ms^{-1})

2) 기상발생기

SWAT에서는 기상 자료들을 직접 관측 자료로 입력하거나 기상발생기(weather generator)를 통해 월 평균 값들에 의해 모의 발생된 일 기상 요소들을 사용한다. 각 소유역마다 기상 자료세트가 모의 발생된다. 강수량을 모의 발생하기 위해 Nicks(1974)가 개발한 모델을 사용하는데 이 모델은 관측자료 중 결측 부분을 채우는데도 사용된다. 기상발생기에 의해 모의되는 기상요소는 Table III-3 과 같다.

Table III-3 Method of weather generator

요소	모의 생성 방법
강수 (Precipitation)	난수(0-1)의 비교에 의한 습윤일과 건조일을 정의하기 위해 1차 마코프체인을 사용
대기온도 (Air Temperature)	정규분포에 의해 생성, 최고기온과 일사량은 강수조건일 때는 하향, 건조 조건일 때는 상향
일사량 (Solar Radiation)	정규분포에 의해 생성, 최고기온과 일사량은 강수 조건일 때는 하향, 건조 조건일때는 상향
풍속 (Wind Speed)	수정지수방정식으로 주어진 월평균 풍속을 가지고 일평균 풍속으로 모의
상대습도 (Relative Humidity)	월 평균값으로부터 일평균습도를 구하기 위해서 삼각형 분포를 사용

3) 눈

SWAT은 일평균 기온을 이용하여 강수량을 강우 또는 눈(snow)으로 구분한다. 강설과 강수를 구분하는 임계온도 (T_{s-r})는 사용자가 임의로 지정 가능하다. 만약 일 평균 기온이 임계온도보다 낮을 경우 HRU에 내리는 강우는 눈으로 규정되고, 강설량은 등가의 물로서 snow pack에 더해진다.

눈의 피복(Snow cover) : SWAT에서는 사용자가 지역의 100%가 눈에 덮이는 임계적설심(threshold snow depth)을 정한 후 한 소유역의 적설심이 이 값 이하로 되면, 눈의 피복도는 면적감소곡선(areal depletion curve)에 의해 비선형적으로 줄어들며 식 (3.13)과 같다.

$$sno_{cov} = \frac{SNO}{SNO_{100}} \cdot \left(\frac{SNO}{SNO_{100}} + \exp(cov_1 - cov_2 \cdot \frac{SNO}{SNO_{100}}) \right)^{-1} \quad (3.13)$$

여기서, sno_{cov} : HRU의 눈에 의해 덮여있는 비

SNO : snow pack의 등가의 물 깊이 (mmH_2O)

SNO_{100} : 100%가 눈으로 덮이는 임계 깊이 (mmH_2O)

cov_1, cov_2 : 면적감소곡선의 형상 매개변수(shape parameter)

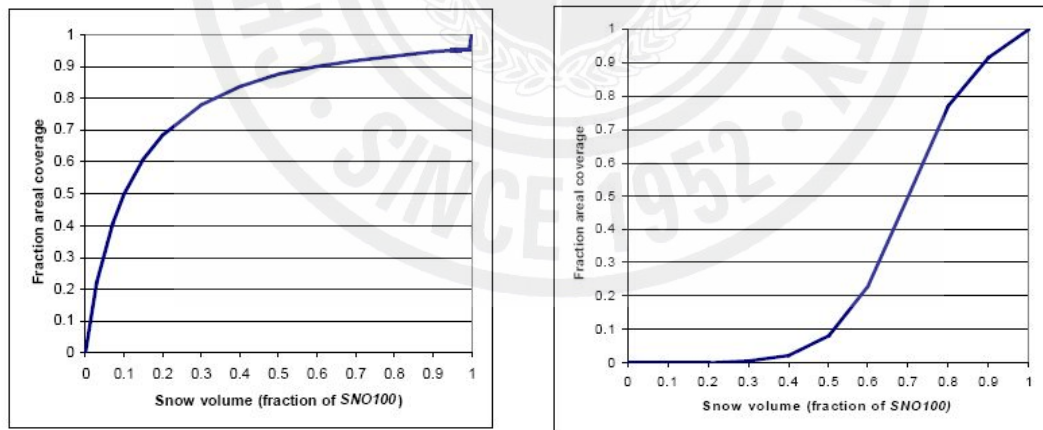


Fig. III-5 In case of 50% coverage, dimension-decreasing curve according to the change of SNO_{100}

용설(Snow melt) : 용설은 대기, snow pack의 온도, 녹는 속도, 눈의 피복 면적 등의 함수로 계산된다. 녹은 눈은 강수와 마찬가지로 유출과 침투를 산정한다. 용설의 경우, 강우 에너지는 0으로 되고 침투 유출량은 24시간 내에 일정하게 녹는 것으로 갖으며 추정하며 식 (3.14)와 같다.

$$SNO_{melt} = b_{melt} \cdot sno_{cov} \cdot \left(\frac{T_{snow} + T_{mx}}{2} - T_{melt} \right) \quad (3.14)$$

여기서, SNO_{melt} : 용설량 (mmH_2O) , b_{melt} : melt factor ($mmH_2O/day \cdot ^\circ C$)

T_{snow} : snow pack의 온도($^\circ C$) , T_{melt} : 용설의 상태가 변화하는 온도($^\circ C$)

2.4 수문

강수가 내리면 식물의 가지나 잎에 의해 차단되고 부착되거나 지표면에 떨어진다. 지표면의 물은 토양층으로 침투되거나 유출로서 지표면을 흐른다. 상대적으로 빠르게 실개천으로 흐르게 되고 단시간에 작은 하천을 이룬다. 침투된 물은 토양 내에서 부착되고 증발산 되거나 지하 통로를 통하여 지표수 부분으로 점진적으로 움직인다. 이와 같은 SWAT 모형의 HRU에서 모의되는 물 입자의 이동의 잠재적 경로는 Fig. III-6 과 같다.

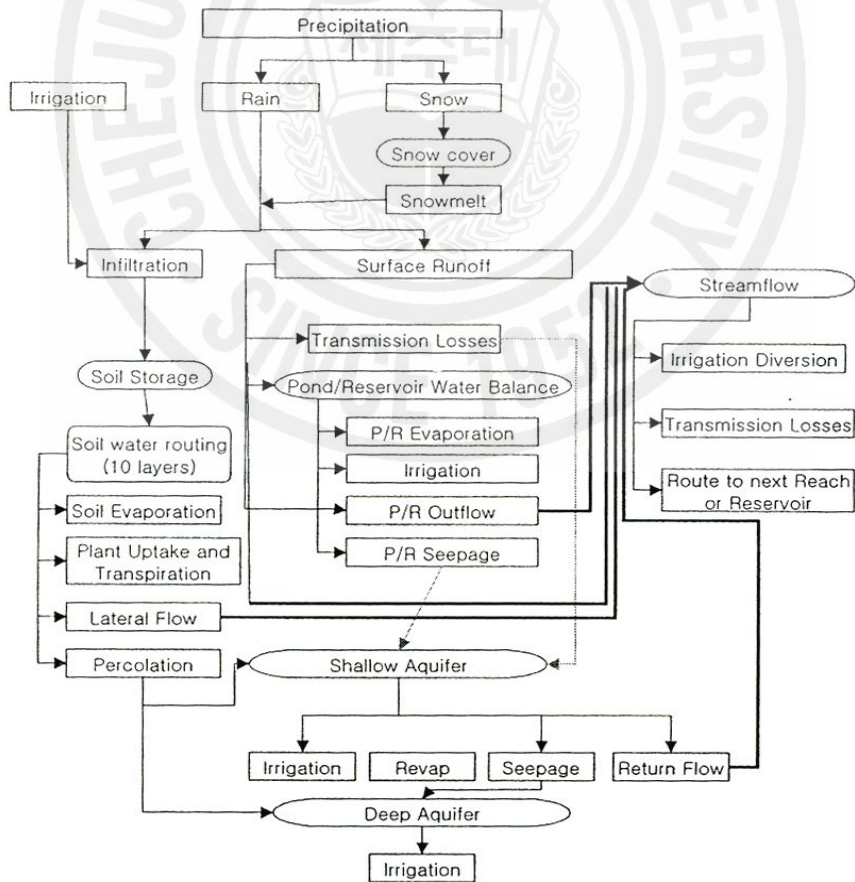


Fig. III-6 Approximate path of water particle in SWAT model

1) 지표 유출

지표면 유출(surface runoff)은 지표면으로부터의 수분공급량이 침투율을 초과할 때 발생한다. 처음에 수분이 건조한 토양으로 공급될 경우 공급율과 침투율은 유사하나 토양이 젖어감에 따라 침투율은 감소할 것이다. 공급율이 침투율보다 높아지면, 요면이 채워지고, 요면이 가득 채워진 후 계속해서 공급율이 침투율보다 높게 되면, 지표면 유출이 시작된다. SWAT에서는 지표면 유출을 평가하기 위해서 SCS 유출곡선법(SCS, 1972)과 Green & Ampt 침투법(1911)의 두 가지 방법을 제공하며 일 또는 시간 강우량을 이용하여 각 HRU별 지표 유출량과 침투 유출량을 모의한다.

① 유출량 : SCS 유출곡선법

SCS 유출 곡선법은 1950년대에 일반적으로 사용되기 시작한 경험모형으로, 미국 전역에 걸친 농촌 소유역에서의 강우-유출 관계를 나타내는 20년 이상의 연구결과이다. 이 방법은 유역의 토양특성과 식생피복상태, 토양 처리상태 및 토양의 수문학적 조건 및 선행강우로 인한 토양의 조건 등을 고려하여 유효우량을 산정하는 비교적 정확한 방법이다.

SCS 유출곡선식은 식 (3.15)와 같다. (SCS, 1972)

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (3.15)$$

여기서, Q_{surf} : 누가유출량 또는 초과 강우 (mmH_2O)

R_{day} : 일 강우량 (mmH_2O), S : 저류 매개변수 (mmH_2O)

I_a : 지면 저류, 차단, 등을 포함하는 초기손실 (mmH_2O)

저류 매개변수(S)는 토양, 토지이용, 관리, 경사 등의 변화에 따라 공간적으로 변화하고, 토양수분함량의 변화에 따라 시간적으로 변화한다. 저류 매개변수는 식 (3.16)으로 정의된다. 일반적으로 초기손실 I_a 는 보통 $0.2S$ 와 같으며 이를 식 (3.15)에 대입하면 식 (3.17)이 되며 유출은 $R_{day} > I_a$ 일 경우에만 발생한다.

$$S = 25.4 \left(\frac{100}{CN} - 10 \right) \quad (3.16)$$

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} - 0.8S)} \quad (3.17)$$

그러나 실제 토양의 성질의 양적인 표현이 어렵기 때문에 SCS는 토양의 침투능을

기준으로 수문학적 토양군(Table III-4)과 유역의 토지이용 상태 및 식생 피복 처리 상태(Table III-5)를 분류하였다.

Table III-4 Classification of soil group in SCS runoff curve method

토양형	토양의 성질
A	낮은 유출율, 침투율이 매우 크고 자갈이 있는 부양질, 매우 양호한 배수조건
B	침투율이 대체로 크고, 돌 및 자갈이 섞인 사질토, 양호한 배수조건
C	침투율이 대체로 작고, 가는 사질토, 불량한 배수조건
D	높은 유출율, 점토질 토양, 불투수성, 매우불량한 배수조건



Table III-5 Runoff curve index of natural region, CN (AMC-II, $I_a=0.2S$)

토지 이용 상태	피복 처리 상태	토양의 수문학적 조건	토양형			
			A	B	C	D
Fallow	Straight row	-	77	86	91	94
Row crops	Straight row	Poor	72	81	88	91
	Straight row	Good	67	78	85	89
	Contoured	Poor	70	79	84	88
	Contoured	Good	65	75	82	86
	Contoured and terraced	Poor	66	74	80	82
	Contoured and terraced	Good	62	71	78	81
Small grains	Straight row	Poor	65	76	84	88
	Straight row	Good	63	75	83	87
	Contoured	Poor	63	74	82	85
	Contoured	Good	61	76	81	84
	Contoured and terraced	Poor	61	72	79	82
	Contoured and terraced	Good	59	70	78	81
Close-seeded legumes or rotation meadow	Straight row	Poor	66	77	85	89
	Straight row	Good	58	72	81	85
	Contoured	Poor	64	75	81	85
	Contoured	Good	55	69	78	83
	Contoured and terraced	Poor	63	73	80	83
	Contoured and terraced	Good	51	67	76	80
Pasture or range		Poor	68	79	86	89
		Fair	49	69	79	84
		Good	39	61	74	80
	Contoured	Poor	47	67	81	88
	Contoured	Fair	25	59	75	83
	Contoured	Good	6	35	70	79
Meadow		good	30	58	71	78
Woods		Poor	45	66	77	83
		Fair	36	60	73	79
		Good	25	55	70	77
Forest	Very sparse	-	56	75	86	91
Farmstead		-	59	74	82	84
Roads	Dirt	-	72	82	87	89
	Hard surface	-	74	84	90	92
Commecial and Business Area	85% impervious	-	89	92	94	95
Industrial Area	72% impervious	-	81	88	91	93
Residentia Area	65% impervious	-	77	85	90	92
	30% impervious	-	59	71	86	86

② 유출 체적: Green & Ampt 침투법

Green & Ampt 공식은 지표면에서의 과잉수를 가정하여 침투를 예측하기 위해 개발되었다(1911). 토양층의 균질하고 선형함수가 토양층 안에서 균일하게 분포한다고 가정된다. 물이 토양층으로 침투하면, 습윤점 접촉면 위의 토양은 완전히 포화된다고 가정한다. Fig. III-7 은 실제 침투의 양상과 Green & Ampt 공식에 의해 모의된 침투 양상의 차이를 나타낸다.

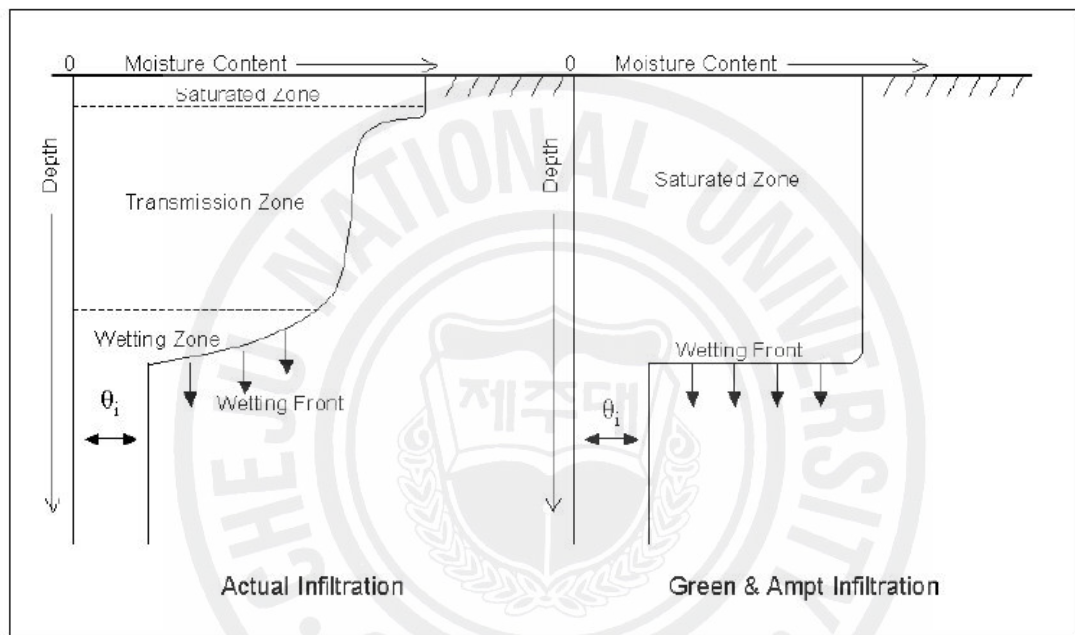


Fig. III-7 Difference of the actual infiltration and the infiltrating aspect of Green & Ampt formula (Arnold, 2000)

SWAT 모형에서는 Mein Larson(1973)에 의해 개발된 Green & Ampt 공식을 이용하여 침투량으로 저류시간을 모의하는 방법을 이용하고 있으며, 이를 위해 사용하는 일단위 이하(sub-daily)의 강우자료를 입력해야 한다.

Green & Ampt Mein Larson 침투율은 식 (3.18)과 같다.

$$f_{\infty, t} = K_e \cdot \left(1 + \frac{\Psi_{wf} \cdot \Delta\theta_v}{F_{\infty, t}} \right) \quad (3.18)$$

여기서, $f_{\infty, t}$: 시간 t에서의 침투율(mm/hr) , K_e : 유효수리전도도(mm/hr)

Ψ_{wf} : 습윤점 접촉면의 토양수분흡입력(mm)

$\Delta\theta_v$: 습윤점 접촉면에서 토양수분함량의 체적변화율(mm/mm)

$F_{\infty,t}$: 시간 t에서의 누적 침투량(mm)

③ 침투 유출량(Peak runoff rate)

침투 유출량은 수정 합리식에 의해 정해진다. 즉, 합리식은 강우강도 I의 강우가 순간적으로 시작되고 무기한 지속되면, 모든 소유역에 유출구의 흐름에 기여하는 도달시간(t_c)까지 유출량은 증가한다는 개념에 근거하고 있다. 수정 합리식에서는 침투 유출량은 도달시간 t_c 동안 발생하는 강우량은 추계학적 기법을 이용한 전체 일강우량의 함수로 추정된다. 소유역의 도달시간은 지표와 하천 흐름을 고려하여 manning's 공식을 이용하여 산정된다.

2) 증발산

증발산(evapotranspiration)은 지면에서 증발되는 수증기량과 식물의 잎에서 대기로 증산(蒸散)되는 수증기량 등 물이 대기 중의 수증기로 되는 모든 과정을 의미한다. SWAT에서는 Ritchie(1972)가 제안한 식으로 토양과 식물로부터의 증발을 계산하며, 잠재 토양 수분 증발은 잠재 증발산과 엽면적 지수의 함수로 추정된다. 또한 실제 토양 수분 증발은 토양심과 수분량의 지수함수에 의해 산정된다. 식물의 증산은 잠재증발산과 엽면적지수의 선형 함수에 의해 모의된다.

① 차단저류(Canopy storage)

차단저류는 식물의 표면에 의해 차단된 물을 의미하며 식물 표면에 부착되어 증발되는데 사용되고 침투, 지표유출, 증발산에 중요한 영향을 미친다. 지표면 유출을 계산하는 경우, SCS 곡선 지수 방법을 사용할 때는 차단저류가 고려되지만 침투와 유출을 산정하는데 Green & Ampt와 같은 방법을 사용할 때는 차단저류를 별도로 구분되어 고려되어야 한다.

SWAT에서는 사용자가 토지 피복에 대한 최대엽면적지수(LAI)를 고려하여 차단 저장될 수 있는 최대값을 입력하도록 되어 있으며 계산식은 식 (3.19)와 같다.

$$can_{day} = can_{mx} \cdot \frac{LAI}{LAI_{mx}} \quad (3.19)$$

여기서, can_{day} : 주어진 날에 차단저류되는 최대수량(mm/day)

can_{mx} : 식생이 완전히 성장했을 때의 차단 최대수량(mm)

LAI_{mx} : 주어진 날의 최대엽면적지수

② 잠재증발산(Potential evapotranspiration)

잠재증발산(Potential EvapoTranspiration; PET)은 무한의 토양수분의 공급이 가능하고, 이류나 열저류 효과가 없이 성장하는 식생으로 균일하게 피복된 넓은 유역으로부터의 증발산이 발생하는 비율(Thornthwaite, 1948)이다. 증발산 비율은 많은 식생 표면특성에 따라 영향을 받기 때문에 Penman(1956)은 PET를 「지면을 완전히 덮고, 균일한 높이와 물 부족이 전혀 없는 상태에서의 녹색 작물에 의해 증산되는 수분량」 이라고 정의하였다.

SWAT에서는 PET를 산정하기 위해 Penman-Monteith 방법(Monteith, 1965; Allen, 1986), Priestley-Taylor 방법(Priestley와 Taylor, 1972) 그리고 Hargreaves 방법(Hargreaves 등, 1985)을 적용하고 있다.

세 방법에 따라 필요한 입력 자료가 각각 다르며 각 입력 자료는 Table III-6과 같다.

Table III-6 Input data according to PET calculating method

Method	입력 자료
Penman-Monteith Method	기온, 상대습도, 태양복사열, 풍속
Priestley-Taylor Method	기온, 상대습도, 태양복사열
Hargreaves Method	기온

Penman-Monteith Method : Penman-Monteith 방법은 증발산을 유지하기 위한 에너지와 수증기를 제거하기 위한 기작의 강도, 공기역학적저항 및 표면저항의 요소들로 구성되어 있으며 Penman-Monteith 방정식은 다음 식 (3.20)과 같다.

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{\neq t} - G) + \rho_{air} \cdot c_p \cdot [e_z^0 - e_z] / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_d / r_a)} \quad (2.20)$$

여기서, λ : 잠열강도 ($MJm^{-2}d^{-1}$), E : 증발율의 깊이(mm/d)

Δ : 포화수증기압-온도 곡선의 기울기 de/dT (kPa/°C)

$H_{\neq t}$: 순복사량(net radiation) ($MJm^{-2}d^{-1}$), G : 지열플럭스 ($MJm^{-2}d^{-1}$)

ρ_{air} : 공기밀도 (kg/m^3), c_p : 일정 압력에서의 비열 ($MJm^{-2}d^{-1}$)

e_z^0 : 높이 z 에서의 포화수증기압(kPa), e_z : 높이 z 에서의 수증기압(kPa)

γ : 습도상수(the psychrometric constant) ($kPa/^\circ C$), r_c : 식생피복저항(s/m)

r_a : 대기층의 확산저항(공기역학저항) (s/m)

Priestley-Taylor Method : Priestley와 Taylor(1972)는 지표면이 습한 경우 사용할 수 있는 식(3.21)을 개발하였다. 주위 환경이 습한 경우, 다음과 같이 공기역학 요소는 제거하고, 에너지 요소는 계수($\alpha_{pet}=1.28$)를 곱하였다.

$$\lambda E_0 = \alpha_{pet} \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot (H_{\neq t} - G) \quad (3.21)$$

여기서, λ : 기화잠열(MJ/kg), E_0 : 잠재증발산(mm/d)

α_{pet} : 계수, Δ : 포화수증기압-온도 곡선의 기울기 $de/dT(kPa/^\circ C)$

γ : 습도상수($kPa/^\circ C$), $H_{\neq t}$: 순복사량 ($MJm^{-2}d^{-1}$)

G : 지열 플럭스 ($MJm^{-2}d^{-1}$)

Priestley-Taylor 식은 낮은 이류조건에서의 잠재증발산 산정에 적용될 수 있다. 따라서, 에너지 수지의 이류항이 중요한 반건조 또는 건조지역에서는 Priestley-Taylor 식을 사용함으로써 잠재증발산이 낮게 산정될 수도 있다.

Hargreaves Method : Hargreaves 방법은 California Davis 지역의 cool-season Alta fescue 잔디종에 대한 8년 동안의 침루계 자료로부터 유도되었다(Hargreaves, 1975). 이후 몇 번의 개선이 이루어졌고(Hargreaves와 Samani, 1982, 1985), SWAT 에서 사용된 형태는 1985년 발표되었다(Hargreaves 등, 1985).

$$\lambda E_0 = 0.0023 \cdot H_0 \cdot (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} \cdot (\overline{T_{av}} + 17.8) \quad (3.22)$$

여기서, λ : 기화잠열(MJ/kg), E_0 : 잠재증발산(mm/d)

H_0 : 대기권밖 복사열 ($MJm^{-2}d^{-1}$), T_{mx} : 주어진 날의 최고기온($^\circ C$)

T_{mn} : 주어진 날의 최저기온($^\circ C$), $\overline{T_{av}}$: 평균기온($^\circ C$)

③ 실제증발산(Actual evapotranspiration)

잠재증발산이 결정되면 실제증발산이 계산된다. SWAT에서는 우선 식생피복에 의해 차단되는 강우로부터 증발을 계산한 다음, Richtie(1972)의 방법과 비슷한 접근법으로 최대 증산량, 최대 승화/토양 증발량을 계산한다. 그 후, 실제 승화량과 토양으로부터의 실제증발량이 계산된다. HRU에 눈이 있는 경우에는 승화가 일어나고, 그렇지 않은 경우에는 토양으로부터의 증발만 일어난다.

차단된 강우의 증발(Evaporation of Intercepted Rainfall) : SWAT에서는 실제증발량을 산정할 때, 피복저류로부터 가능한 많은 수분을 제거한다.

만약 잠재증발산(E_0)가 피복에 고인 강우량(R_{INT})보다 적으면,

$$E_a = E_{cam} = E_0 \quad (2.23)$$

$$R_{INT}(f) = R_{INT}(i) - E_{cam} \quad (2.24)$$

여기서, E_a : 유역에서 발생하는 실제증발산량 (mmH_2O)

E_{cam} : 피복에 고인 강우에 의한 증발량 (mmH_2O), E_0 : 잠재 증발산량 (mmH_2O)

$R_{INT}(i)$: 피복에 고인 초기 강우량 (mmH_2O)

$R_{INT}(f)$: 피복에 남은 최종 강우량 (mmH_2O)

만약 잠재증발산량이 피복에 고인 물의 양보다 많다면,

$$E_{cam} = R_{INT}(i) \quad (2.25)$$

$$R_{INT}(f) = 0 \quad (2.26)$$

피복에 고인 물이 증발된 후 남은 증발 수요량($E_a = E_0 - E_{cam}$)은 식생과 눈/토양 등으로 할당된다.

승화와 토양 증발(Sublimation and Evaporation from the Soil) : 승화와 토양 증발의 양은 차광(shading)의 정도에 의해 좌우된다. 최대 승화 및 토양 증발량은 다음과 같은 관계에 따라 식생의 수분 사용(plant water use)기간 동안 감소된다.

$$E'_s = \min[E_s, \frac{E_s \cdot E'_0}{E_s + E_t}] \quad (2.27)$$

여기서, E'_s : 식생 수분 사용을 고려한 최대 승화 및 토양 증발량 (mmH_2O)

E_s : 주어진 날에 대한 최대 승화 및 토양 증발량 (mmH_2O)

E'_0 : 피복에 고인 강우 증발에 대한 조정된 잠재증발산량 (mmH_2O)

E_t : 주어진 날의 증산량 (mmH_2O)

(3) 토양수(Soil Water)

토양속으로 들어간 물은 여러 가지의 경로를 따라 이동하면서, 식물의 생장을 통 하거나 증발에 의해 소모된다. 토양수(Soil water)는 토양체의 바닥까지 침투되어 대수층에 충전되며, 토양수의 이동은 최종적으로 측방으로 이동하여 하천수에 기여 하게 된다.

측방흐름(Lateral Flow) : 중간 유출이라고도 불리는 측방 지표하 흐름은 포화된 암석층의 상부를 따라 하천유출에 기여하는 흐름을 의미한다. 일반적으로 토양층 (0-2M)에서의 측방 지표하 흐름은 재배분과 동시에 계산되며 운동과 저류 모형 (kinematic storage model)을 이용하여 각 토양층에서의 깊이에서 불투수 또는 준투 수성 토층을 가지는 지역에서 중요하다. 이런 지역에서의 강우는 불투수층을 만날 때까지 수직으로 침투하고 침투한 물은 포화지대를 형성하면서 불투수층 위에 저장 된다. 이 포화지대가 측방 지표하 흐름에 대한 수원이 된다.

SWAT에서는 지표하 흐름의 모의를 위해 Sloan 등 (1983)에 의해 개발되고 Sloan 과 Moore (1984)에 의해 정리된 동역학적 저류모형(kinematic storage model)을 채택하였다. 이 모형은 급한 경사를 따라 흐르는 2차원 단면에서의 지표하 흐름을 모 의하며 Fig. III-8의 완전 경사면을 이용하여 질량 물수지를 적용한다.

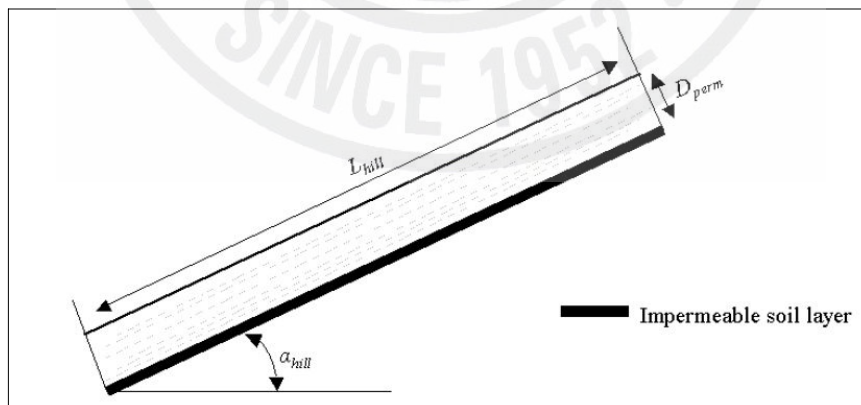


Fig. III-8 Perfect inclined plane of concep (Arnold, 2000)

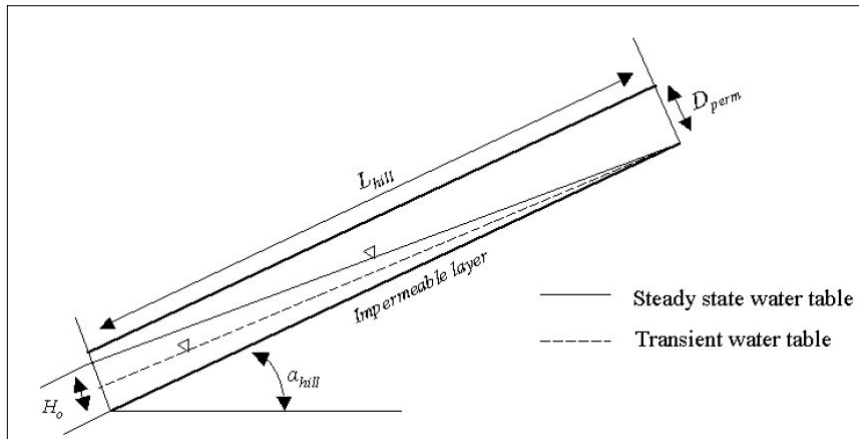


Fig. III-9 Movement of number field in the dynamic undercurrent model

포화된 측방 흐름의 동역학적 접근을 포화대에서의 유선이 불투수 경계와 평행하고, 수리경사도가 바닥경사와 동일하다고 가정하면 Fig. III-9로부터 단위면적당 경사면의 포화대에 저장된 배수 가능한 물의 부피를 계산할 수 있다.

경사면 출구에서의 순유출, Q_{lat} 은 다음 식 (3.28)로 나타난다.

$$Q_{lat} = 0.024 \cdot \left(\frac{2 \cdot SW_{lv, excess} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\Phi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (3.28)$$

여기서, Q_{lat} : 경사면 출구에서의 유출 (mmH_2O/day)

$SW_{lv, excess}$: 단위면적당 경사면 포화대의 저장량 (mmH_2O)

K_{sat} : 포화 수리전도도(mm/h), Φ_d : 배수가능한 토양 공극률(mm/mm)

L_{hill} : 경사면 길이(m), slp : 단위거리

4) 지하수

지하수(groundwater)는 대기압보다 높은 압력, 즉 양압(Positive Pressure)을 받고 있는 포화지대의 물로서, 수체로부터의 침윤(seepage)에 의해 함양 되기도 하지만, 주로 침투(infiltration)와 침루(percolation)를 통해 저류된다.

① 지하수 시스템(Groundwater System)

지하수 포화대 안에는 높은 수리전도도(high conductivity)를 가진 곳과 낮은 수리전도도(Low conductivity)를 가진 곳이 나타나게 된다. 이런 층을 대수층이라고 하며 대수층은 「수문학적으로 물을 충분히 저장하고, 충분히 빠르게 운송할 수 있는

지질학적 단위」로 정의된다(Dingman, 1994). 비피압 대수층은 대수층의 상부가 지하수위인 경우를 말하며, 지하수위는 수압과 대기압이 같아지는 깊이로서 정의된다. 피압 대수층은 상부에 피압층과 하부에 수리전도도가 대수층에 비해 매우 작은 값을 갖는 지질 구조로 되어 있는 대수층을 말한다. Fig. III-10 은 두 가지 형태의 대수층을 나타낸 것이다.

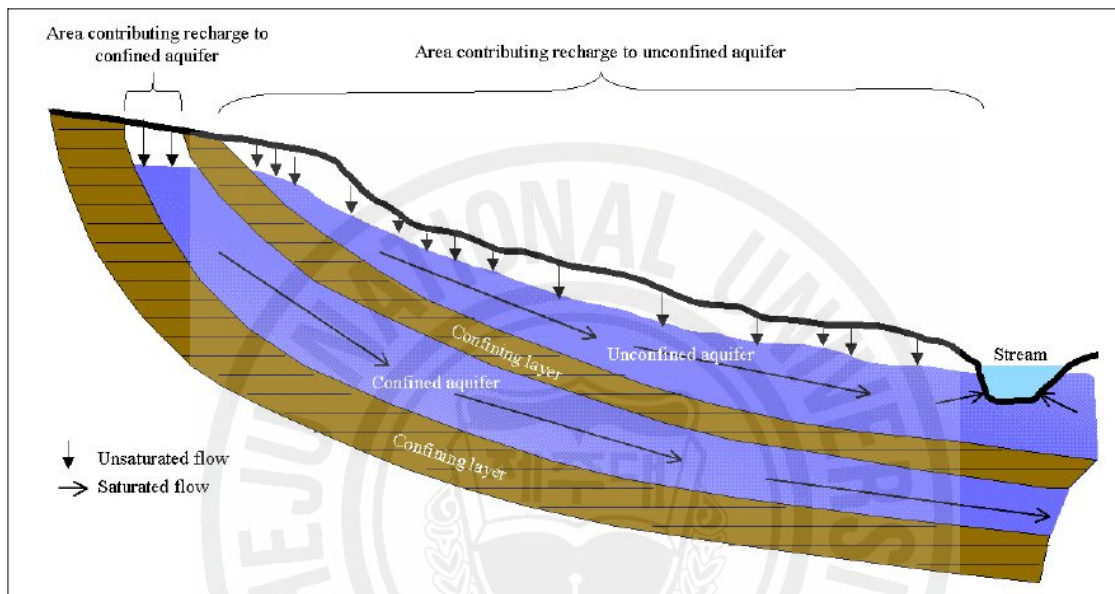


Fig. III-10 Oppressed/not-oppressed Aquifer(Dingmanm 1994)

비피압 대수층으로의 함양은 지표면의 상당 부분으로부터 지하수면까지 침투를 통하여 발생한다. 이와 대조적으로, 지표로부터 침투에 의한 피압 대수층으로의 함양은 피압 대수층의 상류단에서만 일어나는데, 상류단에서는 대수층을 포함하는 지질학적 구조가 지표에 노출되어 있고, 수위가 존재하는 비피압 흐름을 나타낸다.

② 얇은 대수층(Shallow Aquifer)

얇은 대수층의 물수지 식은 다음과 같다.

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrg} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{deep} - w_{pump,sh} \quad (3.29)$$

여기서, Q_{gw} : I일의 주하천으로 유입되는 지하수량 (mmH_2O)

$aq_{sh,i}$: I일의 얇은 대수층 저류량 (mmH_2O)

$aq_{sh,i-1}$: I-1일의 얇은 대수층 저류량 (mmH_2O)

w_{rchrg} : I일의 대수층 함양 수량 (mmH_2O)

w_{revap} : I일의 물 부족으로 인하여 토양지대로 이동하는 양 (mmH_2O)

w_{deep} : I일의 얇은 대수층에서 깊은 대수층으로 침투되는 양 (mmH_2O)

$w_{pump.sh}$: I일의 양수에 의해 얇은 대수층에서 배수되는 양 (mmH_2O)

③ 깊은 대수층(Deep Aquifer)

깊은 대수층에 대한 물수지는 다음과 같다.

$$aq_{dp, i} = aq_{dp, i-1} + w_{deep} - w_{pump, dp} \quad (3.30)$$

만약 깊은 대수층이 관개용수 또는 유역 밖으로의 물 사용을 위한 수자원으로 지정된다면, 모형에서는 깊은 대수층의 총 체적까지 제거되도록 물의 모양을 모의할 것이다. 깊은 대수층으로 들어간 물의 양은 미래 물수지 계산에서 고려되지 않으며, 시스템으로부터의 손실로서 고려될 수 있다.

5) 토지 피복/식물 성장(LAND COVER/PLANT GROWTH)

SWAT은 모든 종류의 토지피복(land cover)상태를 모의하기 위하여 하나의 식물 성장(plant growth)모형을 사용한다. 이 모형은 일년생 식물과 다년생 식물에 대하여 다르게 적용된다. 일년생 식물은 식생 초기부터 수확기까지 또는 누가 열단위 식물에 대한 잠재 열단위와 같아질 때까지 성장한다. 다년생 식물은 일년 내내 뿌리 조직을 유지하고, 겨울철에는 휴기기에 들어간다. 이러한 식물의 성장은 대기 온도에 따라 성장과 휴지를 반복하게 된다.

잠재 성장(Potential growth) : 특정일에서 식물 바이오매스(biomass)의 잠재 증가는 이상적인 성장조건에서의 바이오매스로 정의된다. 하루 동안의 잠재적인 바이오매스의 증가는 식물에서 흡수한 에너지와 이 에너지를 바이오매스로 전환하는 식물의 효율함수로 계산된다. 에너지 흡수는 일사량과 식물의 엽면적지수(LAI)의 함수로 추정된다.

성장 제약조건(Growth constraints) : 잠재 식물 성장과 생산량은 주변 환경에 처한 제약조건 때문에 대개는 이루어지지 않는다. 모형에서는 물과 영양물질, 온도에 의한 스트레스를 평가한다.

6) 침식

침식(erosion)과 유사량은 수정범용토양침식공식(Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE, Williams, 1975)에 의해 각 HRU에 대해서 추정된다. USLE가 침식에너지의 지표로서 강우를 사용하는 반면에 수정범용토양침식곡선(MUSLE)은 침식과 유사량을 모의하기 위해 유출총량을 사용한다. MUSLE를 사용함으로써 모형의 예측정도를 향상시킬 수 있고, 운송율(delivery ratio)의 필요가 없어졌으며, 단일 호우사상에 대한 유사량의 추정이 계산될 수 있다. SWAT모형의 수문부분 과정에서 각 소유역의 유출 체적과 침투 유출량을 제공하고, 이를 이용 유출 침식 에너지를 변수를 산정하는데 이용한다.

7) 영양물질

SWAT은 유역에서 질소와 인의 여러 형태로 나타나는 전이와 이동을 추적할 수 있다. 토양에서 질소의 전이는 그림 (3-11)와 같이 질소 순환에 의해 지배를 받으며, 인의 전이도 그림 (3-12)과 같이 인 순환에 의하여 조절된다. 영양물질(nutrients)은 주 하천에 유입되고 지표 유출 및 측방 지하유출에 의하여 하류로 운송된다.

질소(Nitrogen) : HRU에 대한 SWAT에서 모형화된 여러 과정과 토양내의 다양한 질소 저장 공간이 Fig. III-11 에 설명되어 있다. 식물이 질소를 사용하는 것은 식물 성장 항목에서 설명한 수요와 공급의 접근 방법을 사용하여 추정된다. 식물의 사용 외에도, 질산염과 유기 질소는 물의 흐름에 의하여 토양으로부터 제거될 수 있다. 유출수와 측방 흐름 및 침투에 포함된 NO_3-N 의 총량은 물의 체적과 그 토양층에서 질산염의 평균 농도의 곱으로 추정된다. 유사에 부착된 유기 질소의 운송을 표현하기 위하여 McElroy 등(1976)과 Williams 와 Hann(1978)의 수정된 부하함수에 의하여 계산된다. 부하함수는 토양 상층의 유기 질소의 농도와 유사량 및 농축률에 의해 일별 유기 질소 유출 손실량을 추정한다. 농축률은 유사 내의 유기 질소의 농도를 토양 내의 농도로 나눈 것이다.

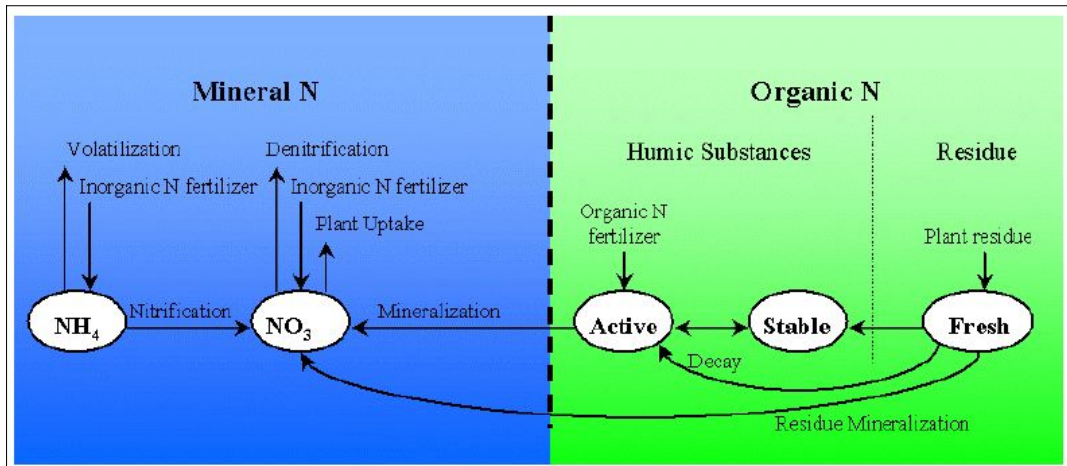


Fig. III-11 Transition process of nitrogen in SWAT

인(Phosphorus) : SWAT에서 모형화된 각 HRU에서의 여러 가정과 인의 다양한 보존 형태는 Fig. III-12와 같이 나타난다.

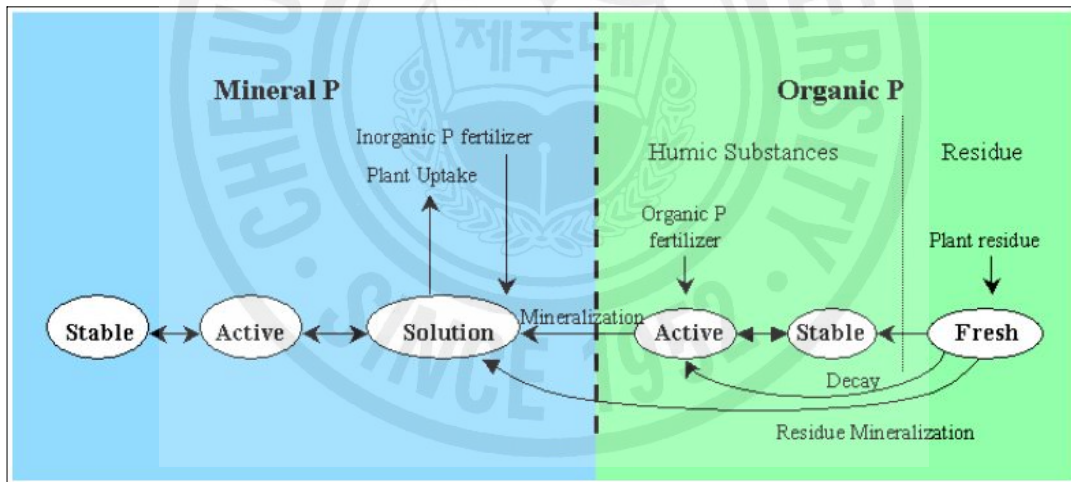


Fig. III-12 Transition process of phosphorus in SWAT

질소와 마찬가지로 인 역시 수요와 공급의 접근 방법을 사용하여 추정되며 식물의 사용 외에도, 용해 인과 유기 인은 물의 흐름에 의하여 토양으로부터 제거될 수 있다. 인은 이동하는 영양물질이 아니며 단 지표 유출과 토양의 상층 10mm내에 있는 용해 인은 이동될 수 있다.

8) 살충제

SWAT에서는 살충제(pesticides)의 유역 내에서의 화학적 거동을 연구하기 위하여 살충제의 이동을 각 HRU별로 적용한다. 살충제의 이동을 지표 유출을 통한 이동과 침투에 의한 토양층과 대수층으로의 이동으로 구분하여 모의한다. 수문순화에서 살충제의 이동은 용해성(solubility), 반감기(degradation half-life)를 따라서 조절되며 이는 GEEAMS(Leonard et al., 1987)를 이용하여 모의된다. 식물 낙엽과 토양의 살충제는 적절한 반감기를 가지며 지수 함수적으로 줄어든다. 물과 유사에 의한 살충제의 이동은 각 홍수 사상마다 계산되고 살충제의 토양으로의 이동은 침투가 발생할 때 마다 각 토양층마다 추정되며 각 과정은 Fig. III-13과 같다.

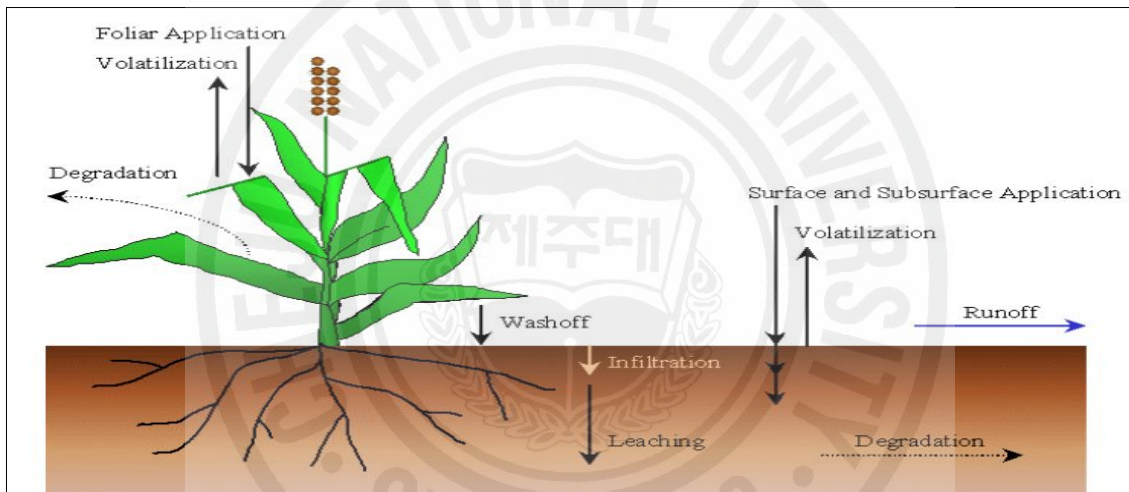


Fig. III-13 Transition process of insecticide in SWAT

9) 관리

SWAT은 사용자가 각 HRU별로 여러 가지 관리(management) 방법을 다양하게 적용시킬 수 있다. 식물의 성장기간의 시작과 끝, 그리고 비료와 살충제의 양 등을 구체적으로 정할 수 있으며 관개 시기 등도 결정할 수 있다. 또한 기본적인 관리 방법 외에도 목축, 비료 및 공급 등의 다양한 관리조건들을 적용시킬 수 있다.

2.5 추적

1) 주 하천 및 하도에서의 추적

주 하천에서의 흐름의 추적(routing)은 물, 유사, 영양물질 및 유기 화학물질 등 네

가지 부분에 대해서 모의한다. SWAT에서는 유속과 유량을 정의하기 위하여 Manning식을 사용하고 있다. 유출은 변동저류추적법 또는 Muskingum 하도추적법을 이용하여 하천망을 통해 추적된다. 변동저류추적법과 Muskingum 하도추적법 모두 운동파(kinematic wave) 모형의 변형들이다.

변동저류추적법(Variable Storage Routing Method) : Williams(1969)에 의해 개발된 변동저류추적법은 주어진 하도구간에 대하여, 식 (3.31)과 같은 연속방정식에 기초를 두고 있다.

$$V_{\in} - V_{out} = \Delta V_{stored} \quad (3.31)$$

여기서, V_{\in} : 시간 간격 동안의 유입량(m^3H_2O)

V_{out} : 유출량(m^3H_2O) , V_{stored} : 저류량의 변화(m^3H_2O)

이 식을 시점과 종점에서의 시간 간격 동안의 평균 유입율을 이용한 식으로 전개하면 식 (3.32)가 된다.

$$q_{out,2} = SC \cdot q_{\in,ave} + (1 - SC) \cdot q_{out,1} \quad (3.32)$$

여기서, $q_{out,2}$: 종점에서의 유출량(m^3/s) , $q_{out,1}$: 시점에서의 유출량(m^3/s)

$q_{\in,ave}$: 시간 간격 동안의 평균 유입량(m^3/s)

SC : 저류계수($\frac{2 \cdot \Delta t}{2 \cdot TT + \Delta t}$, TT ; 유하시간)

Muskingum 추적법(Muskingum Routing Method) : Muskingum 추적법은 그림 3.??와 같이 쐐기(wedge)저류와 대형(prism)저류의 합으로서 나타낼 수 있다. 대형저류량은 유출량에만 비례하나 쐐기 저류량은 유입량과 유출량의 차에 비례한다고 가정한다. 이러한 가정을 사용하여 대형 저류량은 유량의 함수로서, $K \cdot q_{out}$ 으로 쐐기 저류량은 $K \cdot X \cdot (q_{\in} - q_{out})$ 으로 표시 가능하며, 이때 X는 하도 저류량을 결정하는데 있어서 유입량과 유출량의 상대적인 중요도를 조절하는 가중치이다. 총저류량은 다음 식 (3.33)으로 나타낼 수 있고 식 (3.33)을 연속방정식으로 편입하면 다음과 같이 식 (3.24)로 간단하게 나타낼 수 있다.

$$V_{stored} = K \cdot q_{out} + K \cdot X(q_{\in} - q_{out}) \quad (2.33)$$

$$q_{out,2} = C_1 \cdot q_{\in,2} + C_2 \cdot q_{\in,1} + C_3 \cdot q_{out,1} \quad (2.34)$$

여기서, K : 하도에 대한 저류시간 상수(s) , X : 가중치

$q_{out,2}$: 종점에서의 유출량(m^3/s) , $q_{out,1}$: 시점에서의 유출량(m^3/s)

$q_{\in,2}$: 종점에서의 유입량(m^3/s), , $q_{\in,1}$: 시점에서의 유입량(m^3/s) 이고,

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2 \cdot K \cdot X}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t}$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2 \cdot K \cdot X}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t}$$

$$C_3 = \frac{2 \cdot K \cdot (1 - X) - \Delta t}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t}$$

여기서 $C_1 + C_2 + C_3 = 1$ 이다.

① 홍수 추적(Routing)

물이 하류로 흘러가면서 증발과 하상을 통한 이동과 같은 손실이 발생한다. 농업과 인위적 행동에 따른 하천의 물의 소모와 같은 잠재적인 손실도 발생한다. 하천에서 흐름은 유역 내에 떨어지는 직접적인 강우와 점 공급원에 의해서 더해지는 유출수 등에 의하여 보충된다. 흐름은 변동저류계수방법과 Muskingum 추적 방법에 의하여 모의된다.

② 유사 추적(Sediment Routing)

하천에서 유사의 이송은 퇴적과 침식의 두 가지 과정의 상호 및 동시작용에 의하여 조절된다. SWAT에서 한 하도 구간에서 운송될 수 있는 최대 유사량은 하천의 침투 유속의 함수로 구할 수 있다.

③ 영양물질 추적(Nutrient Routing)

하천에서 영양물질의 전환은 하천 내에서의 모형의 수질 성분에 의해서 조절된다. 영양물질의 추적을 위해 SWAT에서는 하천 내 동역학적 방법을 QUAL2E(Brown and Barnwell, 1987)로부터 적용하여 하천 내에서 용해되거나 유사에 부착되어 이동하는 영양물질을 추적할 수 있다. 유사에 부착된 영양물질은 하천바닥에 퇴적하고 용해된 영양물질은 물과 함께 하류로 이동한다.

④ 하천 내 살충제 추적(Channel Pesticide Routing)

HRU에서는 여러 종류의 살충제를 적용 가능하나 하천에서는 하나의 살충제에 대해서만 추적한다. 이는 모의 과정이 복잡하기 때문이다. 영양물질처럼, 하천의 총

살충제 부하는 용해된 것과 유사에 부착된 것으로 구분한다.

2) 저수지 추적

저수지에서의 물수지는 유입량, 유출량, 저수표면에서의 강수량, 증발량, 저수지 바닥으로의 침투량과 취수 등을 포함한다.

① 저수지 유출량(Reservoir Outflow)

SWAT에서 저수지 유출량을 추정하기 위해 관측 유출량을 직접 입력하는 방법과 소규모의 저수지에 대해 사용자가 방류량을 직접 입력하는 방법, 그리고 대규모로 관리되는 저수지에 대해서 사용자가 저수지의 월별 목표 저수량을 결정하여 입력하는 방법이 있다.

② 유사 추적(Sediment Routing)

유사는 하천의 상부에서 유입되거나 소유역내의 지표 유출에 의해서 저수지에 유입된다. 저수지의 유사 농도는 유입량, 유출량, 저수지내의 저류량의 체적과 농도에 의한 연속방정식에 의해 추정된다. 저수지 방류량의 유사량은 저수지 방류량의 체적과 저수지의 부유사 농도의 곱으로 계산된다.

3. SWAT모형의 연구동향

Arnold 등 (1996)은 Illinois 유역의 중부와 서부에 있는 3개의 소유역에 SWAT 모형을 적용하였다. 표면유출량, 지하수량, 지하수의 증발산량, 토양의 증발산량, 지하수 함양량, 지하수위 높이 등 기존에 구축된 관측자료와 모형의 결과를 비교함으로써 SWAT 모형의 적용가능성을 확인하였으며 그 결과 SWAT 모형을 통하여 유역단위의 다양한 토지이용 관리를 할 수 있다는 결론을 내린 바 있다.

Sophocleous 등 (1999)은 SWAT 모형과 지하수 모형인 MODFLOW 모형을 결합하여 SWATMOD 모형을 개발하고 Kansas 지역의 중남부에 위치한 Rattlenake Creek 유역에 적용하였다. SWATMOD 모형은 표면유출, 지하수, 하천과 지하수층

의 상호 물의 이동 등을 모의할 수 있는 모형으로서 Rattlesnake Creek 유역에 적용한 결과 모형의 적용가능성을 확인하였지만 홍수기 모의에는 다소 미약함을 보였다. 따라서 SWATMOD 모형은 건기 시 유역의 물 순환 모의 및 수자원 관리에만 이용이 가능하다는 한계가 있다.

FitzHugh 등 (2000)은 SWAT 모형 사용 시 유역을 분할하였을 때 분할된 유역의 크기와 개수가 총 유출량과 총 유사량에 미치는 영향을 분석하였다. Dane 주의 Pheasant Branch 유역에 적용한 결과 유역을 더 작게 나누어 소유역의 개수를 늘리어서 소유역의 면적을 줄인 결과 유역출구지점에서의 총 유출량에는 거의 영향을 미치지 않지만 총 유사량의 경우는 이와 달리 최대 44% 정도가 감소함을 보여 유역분할개수가 유사량에 민감하게 반응함을 밝혀내었다. 하지만 소유역을 몇 개로 분할해야 타당한지는 밝혀내지 못했다.

Fohrer 등 (2002)은 독일의 산악지역인 Aar 유역에 농업경제 (agricultural economy) 모형인 ProLand 모형과 생태 (ecology) 모형인 Yell 모형 그리고 수문모형인 SWAT-G 모형을 이용하여 토지이용변화에 대해 세 가지 모형의 결과를 동시에 고려하였다. 농업지역이 늘어나고 산림지역이 줄어들면 노동력이 더 필요하게 되고 동시에 농업생산량이 증가하게 되며 조류과인 *E. citrinella*의 서식지가 증가하게 되지만 잠재홍수위험도는 증가하게 됨을 정량적으로 밝혔다.

Lenhart 등 (2003)은 독일의 Frankfurt 북서쪽에 위치한 중간규모 유역인 Dill 유역에 SWAT-G 모형을 이용하여 토지이용변화에 따른 유출량과 영양물질의 변화량을 정량적으로 산정하였다. 산림이 감소하고 초지가 증가하여도 유출량과 유사량의 변화에 미치는 영향은 그다지 크지 않았지만 질산염의 양은 크게 증가한다는 것을 도출하였다.

Tripathi 등 (2004)은 인도의 동쪽에 위치한 미 계측 소유역인 Nagwan 유역에 기상자료 발생기 (weather generator)를 이용하여 SWAT 모형을 모의하였다. SWAT 모형의 기상자료 발생기는 1차 Markov chain 을 이용하여 월 자료를 발생시키는데 생성된 자료를 Student's t-test 한 결과 관측 강우량의 평균과 모의된 강우량의 평균은 95%의 신뢰수준에서 통계적으로 동일함을 밝혔다. 따라서 월 단위의 강우자료를 발생하여 강우-유출모의와 유사량 모의가 가능하며 미 계측 소유역의 계획 및 관리가 가능함을 도출하였다.

Luzio 등 (2005)은 GIS 자료의 질이 소유역의 유출량과 유사량에 미치는 영향을

SWAT 모형을 이용하여 연구하였다. Mississippi 주의 북쪽에 위치한 Goodwin Creek 유역에 지형고도자료 (Digital Elevation Model)로서 30m × 30m 해상도 자료와 90m × 90m 해상도 자료를, 토지이용자료로서 해상도 30m × 30m 의 1987년 Landsat-5 Thematic Mapper 자료, 해상도 30m × 30m 의 1992년 Landsat-5 Thematic Mapper 자료와 해상도 30m × 30m 의 1997년 1/250,000 shape-polygon 자료를 사용하였고, 토양자료로서 1995년 격자형태 자료와 1992년 shape-polygon 형태의 1/250,000 자료를 사용하였다. 그 결과 해상도가 낮은 지형고도자료를 사용한 경우 소유역에서는 유출량이 감소함을 확인하였지만 대유역에서는 큰 영향을 미치지 못함을 도출하였고, 정밀하지 못한 토지이용도를 사용한 경우 토양침식과 유사량의 예측에 많은 영향을 미치기 때문에 소유역에서는 낮은 해상도의 지형고도자료와 정밀하지 못한 토지이용도를 사용하지 말 것을 강조하였다.

강두기 등 (2003)은 유역 내 저수지 (reservoir), 저류지 (pond) 등의 저류시설물들과 하도저류 (bank storage)등이 연속유출에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수영강 및 용담댐 유역에 다양한 시나리오를 작성하고 AVSWAT 2000 모형을 적용하였다. 모의결과 저수지의 경우 침투계수가 증가할수록 평균유출량이 감소함을 확인하였고 조절능력이 없는 저류지의 경우 저류지 용량이 하류의 연속유출에 미치는 영향은 크지 않음을 밝혔으며 하도저류의 경우 홍수기에는 하도에서 지하수로의 손실을 갈수기에는 지하수로부터 하도로의 충전효과를 확인하였다.

장철희 등 (2003)은 SWAT 모형이 국내유역의 토지이용 및 토양특성을 적절히 반영하는가에 대한 평가를 하기 위하여 용담댐 유역에 AVSWAT 2000 모형을 적용하였다. 모의결과와 관측자료를 통해 모형의 보정 및 검정을 실시하였으며 국내 유역에 적용 가능함을 도출하였다.

김학관 등(2004)은 SWAT 모형과 HSPE 모형의 유출특성을 비교분석하기 위해 발안저수지 유역의 HP#6 소유역에 모형을 적용하고 관측자료와 모의결과를 보정 및 검증하였다. HSPE 모형의 모의유출량이 SWAT 모형보다 실측치에 더 유사한 값을 보였으나 두 모형의 우열의 차이는 미비하여 두 모형 모두 적용성이 있는 것으로 평가하였다.

김남원 등 (2004a)은 준 분포형 지하수 유출모형인 SWAT 모형과 3차원 지하수 유동모형인 MODFLOW 모형의 완전 연동형 결합모형인 SWAT-MODFLOW 모형을 독자적인 방식에 따라 개발하였다. SWAT 모형의 지하수 모형성분은 집중형이

므로 분포형 매개변수와 변화하는 양수량, 지하수위의 변화 등을 고려하지 못하고, MODFLOW 모형은 주요 입력자료인 지하수 함양량의 정확한 산정이 어렵다는 한계를 안고 있다. SWAT 모형의 HRU를 MODFLOW 모형의 격자로 대응시키기 위해 DEM을 이용한 HRU-GRID 변환기법을 개발하였으며, 수문성분 교환은 지하수 함양량의 전달과정과 하천 네트워크-대수층간의 상호작용을 고려하였다.

SWAT-MODFLOW 결합모형을 이용함으로써 지표수나 지하수 모형만으로는 해결되지 않는 하천-대수층간의 경계유량을 고려한 유출해석이 가능하다.

김남원 등 (2004b)은 연속유출모형인 SWAT 모형과 도시지역의 유출해석에 주로 이용되는 SWMM 모형의 RUNOFF 블록을 결합함으로써 전월유역은 물론 도시유역의 유역특성을 고려할 수 있는 SWAT-SWMM 모형을 개발하였다. 이 모형은 대부분의 소유역에서는 SWAT 모형을 이용하고, 특별히 지정된 도시지역에 한하여 SWMM 모형을 이용하는 모형으로서 SWAT 모형에 SWMM 모형이 포함된 형태이다.

Table III-7 는 SWAT 모형의 사용과 개발에 대한 국내·외 연구동향이다.

Table III-7 Domestic · international research trend about the used and the development of SWAT model

연구자	사용 또는 개발한 모형	내용	보정방법
Arnold 등 (1996)	SWAT	Illinois 유역의 물수지 분석을 통하여 다양한 토지이용관리를 하기 위하여 SWAT 모형을 사용	Trial & Error Method
Sophocleous 등 (1999)	SWATMOD	SWAT 모형과 지하수 모형인 MODFLOW를 조합하여 SWATMOD 모형을 개발	Trial & Error Method
FitzHugh 등 (2000)	SWAT	유역의 크기와 소유역의 개수가 유량과 유사량에 미치는 영향을 분석하기 위해 SWAT 모형을 사용	알 수 없음
Eckhardt 등 (2001)	SWAT-G	SWAT 모형의 매개변수를 자동보정하기 위하여 SCE(Shuffled Complex Evolution)알고리즘을 포함한 SWAT-G 모형을 개발	SCE-Algorithm
Fohrer 등 (2002)	SWAT-G	SWAT-G 모형을 이용하여 토지이용변화에 따른 수문반응의 효과를 분석	알 수 없음
Lenhart 등 (2003)	SWAT-G	SWAT-G 모형을 이용하여 토지이용변화가 유출량과 영양물질량의 변화에 미치는 영향을 분석	알 수 없음
Tripathi 등 (2005)	SWAT	SWAT 모형에 내장되어 있는 weather generator를 이용하여 발생시킨 강우를 미 계측 소유역에 적용	알 수 없음
Luzio 등 (2005)	SWAT	GIS 자료의 질이 소유역의 유출량과 유사량에 미치는 영향을 연구	Calibration 하지 않았음
강두기 등 (2003)	AVSWAT 2000	유역내 저류시설물들이 연속유출에 미치는 영향을 분석	알 수 없음
장철희 등 (2003)	AVSWAT 2000	국내유역에 AVSWAT 2000 모형의 적용가능성을 평가하기 위하여 용담댐 유역에 AVSWAT 2000 모형을 적용	알 수 없음
김남원 등 (2004a)	SWAT-MODFLOW	SWAT 모형과 3차원 지하수 유동모형인 MODFLOW 모형의 완전 연동형 결합모형인 SWAT-MODFLOW 모형을 개발	알 수 없음
김남원 등 (2004b)	SWAT-SWMM	연속유출모형인 SWAT 모형과 도시지역의 유출해석에 이용되는 SWMM 모형을 결합함으로써 SWAT-SWMM 모형을 개발	Calibration 하지 않았음
김학관 등 (2004)	SWAT, HSPE	유출량에 대하여 SWAT 모형과 HSPE 모형의 비교분석을 실시함	Trial & Error Method

IV. SWAT 모형의 입력자료 분석 및 구축

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 존재 하지 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 모형을 적용하기 위하여 필요한 대상유역의 자료는 Table IV-1 과 같다.

Table IV-1. Weather input data of the basin to be studied

Station data	Input data			
	천미천	외도천	용포천	연외천
Pa_pre.dbf	Seo_P 등	Jeju_P 등	Gosan_P 등	Seo_P 등
Pa_climate.dbf	Seo_C	Jeju_C	Gosan_C	Seo_C
Pa_hum.dbf	Seo_H	Jeju_H	Gosan_H	Seo_H
Pa_solar.dbf	Seo_S	Jeju_S	Gosan_S	Seo_S
Pa_wind.dbf	Seo_W	Jeju_W	Gosan_W	Seo_W

1.1 기상자료 분석

연구대상 지역의 기상자료는 제주도기상청 관할 4개 지점(제주, 서귀포, 성산포, 고산) 자료를 사용하였으며 각 관측소 현황은 Table IV-2 와 같다.

Table IV-2. Status of meteorological post of the basins to be studied

관측소	위도	경도	해발고도(m)	관측개시일
제주	33° 30' N	126° 32' E	20.0	1923. 5
서귀포	33° 15' N	126° 34' E	50.5	1961. 1
성산포	33° 23' N	126° 53' E	18.6	1971. 5
고산	33° 29' N	126° 16' E	71	1988. 5

제주 관측소는 1923년부터 관측을 시작하였으며 현재 제주도 건입동 소재에 위치해 있으며 Table IV-3은 제주 기상관측소의 월별 기상자료의 기후 평년값을 나타내고 있다.

Table IV-3. Weather data by month of Jeju meteorological post

	평균기온 (°C)	최저기온 (°C)	최고기온 (°C)	강수량 (mm)	상대습도 (%)	일조 (hr)	평균풍속 (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 IV-4~6 까지는 각각 서귀포, 성산포, 고산 기상관측소의 월별 기상자료의 기후 평년값을 나타내고 있다.

Table IV-4. Weather data by month of Seogwipo meteorological post

	평균기온 (℃)	최저기온 (℃)	최고기온 (℃)	강우량 (mm)	상대습도 (%)	일조시간 (hr)	평균풍속 (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 IV-5. Weather data by month of Sungsanpo meteorological post

	평균기온 (℃)	최저기온 (℃)	최고기온 (℃)	강우량 (mm)	상대습도 (%)	일조시간 (hr)	평균풍속 (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 IV-6. Weather data by month of Gosan meteorological pos

	평균기온 (℃)	최저기온 (℃)	최고기온 (℃)	강우량 (mm)	상대습도 (%)	일조시간 (hr)	평균풍속 (m/s)
Jan	6.3	3.9	8.6	47.9	69.3	95	9.7
Feb	6.5	4.1	8.9	42	70.9	125	9.3
Mar	9.2	6.6	12	78.6	72.3	164.9	7.7
Apr	13.3	10.5	16.3	82	75.2	202.4	6.4
May	16.8	14.2	19.8	112.6	80.9	213.8	5.6
Jun	20.4	18.2	23.1	141	87	161.7	4.7
Jul	24.8	22.9	27.2	160	89.2	191.9	5.2
Aug	26.1	23.8	28.8	196.8	85	218.3	5.2
Sep	22.9	20.6	25.7	120.3	78.2	190.6	5.6
Oct	18	15.6	20.9	30.8	71.2	210	6.6
Nov	13.4	10.7	16.4	58.2	70	160	7.6
Dec	8.8	6.3	11.4	24.5	68.2	120.7	8.8

1.2 강우량 자료의 분석

연구대상 유역의 강우량 자료는 각 유역별로 제주 재난안전대책본부 강우량 자료 기상청 강우량 자료를 사용하였다. 천미천 유역은 유역면적이 127.64 km² 에 이르는 제주도내 최대 하천이며 모델 적용기간을 1999. 1. 1~2006. 12. 31 로 지정하여 적용하였다. 다른 유역 각각의 면적은 외도천 유역 44.54 km², 옹포천 유역 20.09 km², 연외천 유역 19.61 km² 이며 모형의 적용기간을 2000. 1. 1~2007. 9. 30 로 지정하여 적용하였다(Table IV-7).

Table IV-7. Basin dimension and the status of rainfall observatory at the basins to be studied

유역	유역면적 (km ²)	적용기간	강우관측소 현황
천미천	127.64	1999. 1. 1~ 2006. 12. 31	성산포, 성관악, 남원, 표선, 성읍1리, 교래, 수망, 송당, 서귀포
외도천	44.54	2000. 1. 1~ 2007. 9. 30	제주, 어승생, 향파두리, 어음, 천백고지, 애월
옹포천	20.09	2000. 1. 1~ 2007. 9. 30	고산, 한림, 애월, 어음, 한경
연외천	19.61	2000. 1. 1~ 2007. 9. 30	서귀포, 송산동, 돈네코

각 유역별로 모형의 적용기간에 맞추어 Table IV-7 의 강우관측소 자료를 이용하여 모형의 강우 입력자료를 구축하였으며 각각의 유역 강우관측소별 적용기간동안의 월별 강우 자료는 Table IV-8~11, Fig. IV-1~4 와 같다.

Table IV-8. Rainfall data by month of rainfall observatory at the basin of Chunmi river (1999~2006, for 8 years)

	교래	송당	성읍	표선	수망	남원	성판악	관음사	성산포	서귀포
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

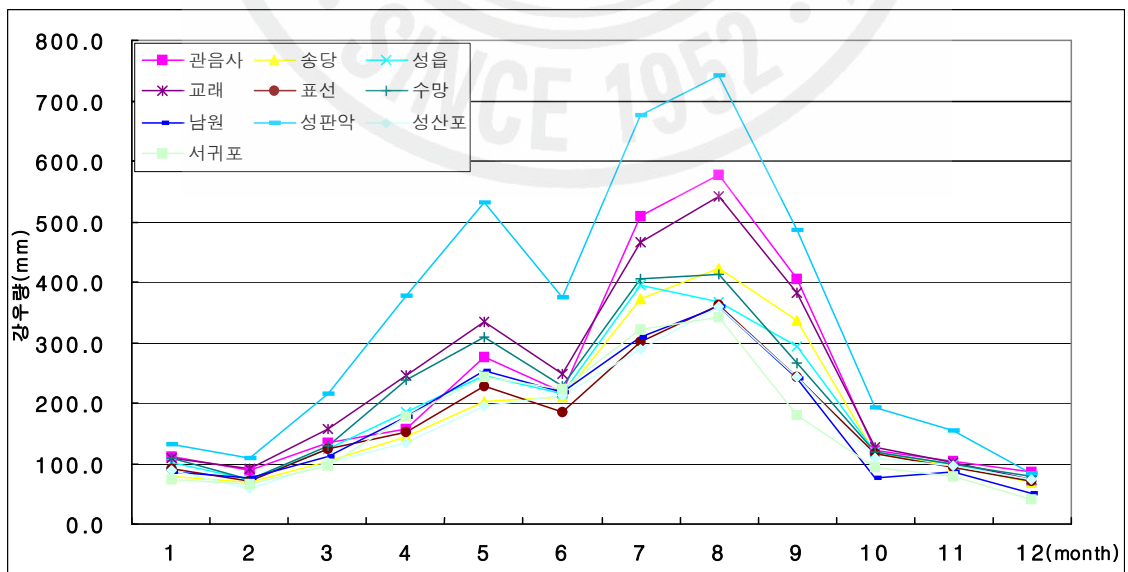


Fig. IV-1. Precipitation by month and by precipitation observatory of Chunmi river basin

Fig. IV-1에서 천미천 유역 강우관측소별 월별 강우 패턴은 각 관측소별로 일관성을 띄고 있으며 7~9월 사이 가장 많은 강우량을 보이고 있다. 가장 고지대에 위치한 성판악 지역이 가장 많은 월별 강우를 보였다.

Table IV-9. Rainfall data by month of rainfall observatory at the basin of Oaedo river (2000~2006, for 7 years)

	항파두리	어음	애월	천백고지	어승생	제주
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

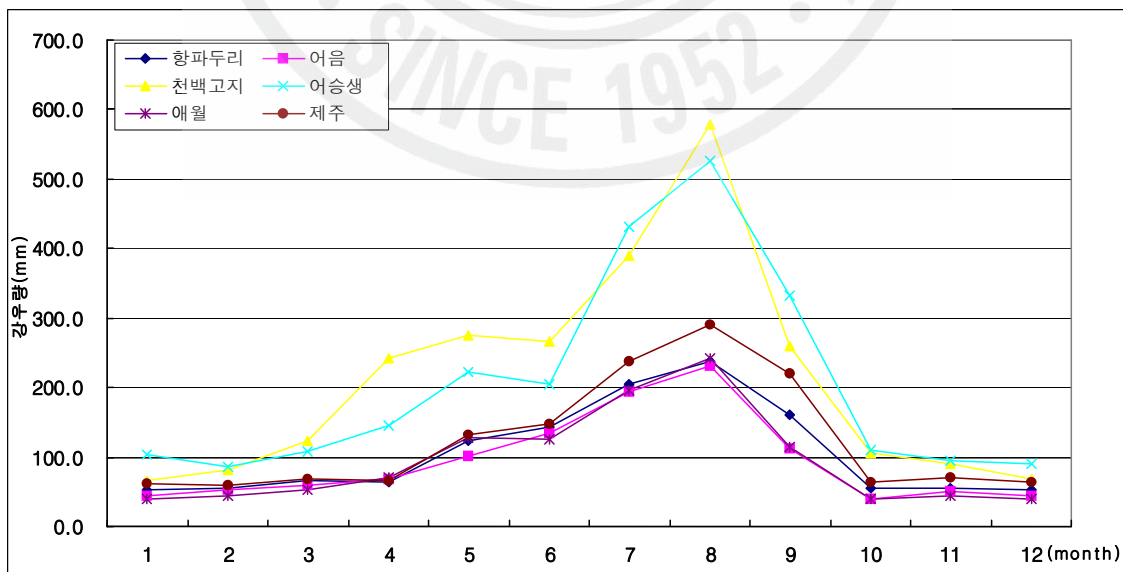


Fig. IV-2. Precipitation by month and by precipitation observatory of Oaedo river basin

Fig. IV-2에서 외도천 유역 강우관측소별 월별 강우패턴은 전체적으로 일정하며 고지대에 위치한 천백고지와 어승생의 월별 강우량이 많게 나타났다.

Table IV-10. Rainfall data by month of rainfall observatory at the basin of Ongpo river (2000~2006, for 7 years)

	한림	한경	고산	애월	어음
Jan	38.4	45.6	43.6	40.7	44.4
Feb	47.1	48.1	46.1	44.6	52.3
Mar	47.8	60.3	55.9	53.1	59.0
Apr	61.9	81.6	81.3	69.6	67.7
May	131.0	134.1	121.9	126.7	102.2
Jun	133.6	136.7	141.2	126.4	133.8
Jul	198.0	209.1	202.5	196.9	192.9
Aug	247.8	237.9	224.8	241.6	230.1
Sep	103.9	106.6	108.6	114.6	112.2
Oct	45.3	52.7	56.1	40.2	39.9
Nov	52.6	49.3	64.0	43.0	51.1
Dec	40.7	43.4	40.4	39.9	43.1

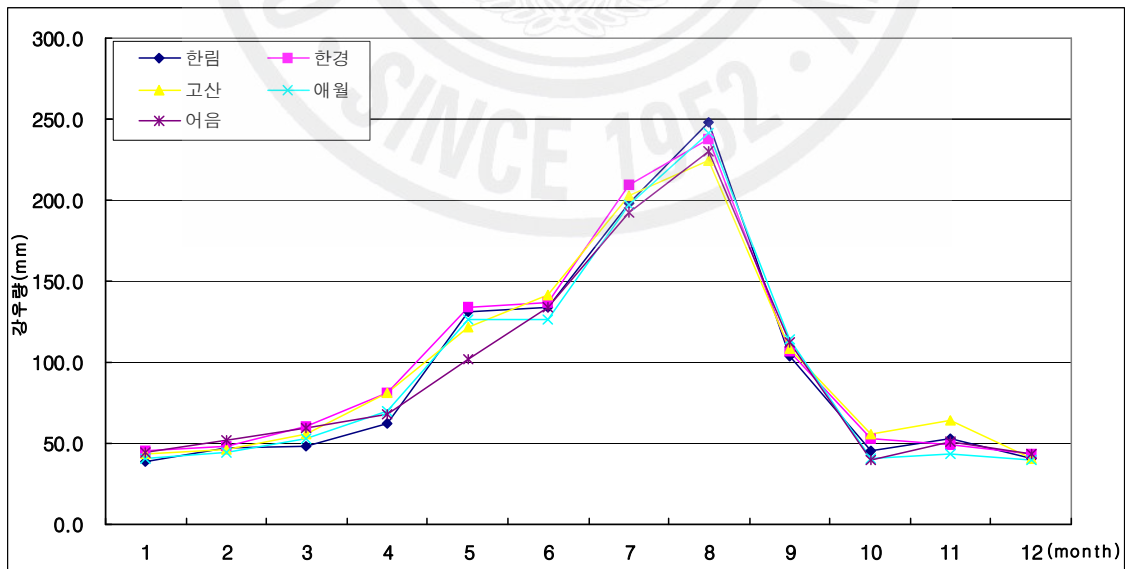


Fig. IV-3. Precipitation by month and by precipitation observatory of Ongpo river basin

가장 낮은 지역에 위치한 옹포천 유역 강우관측소별 월별 강우패턴은 모든 관측소가 거의 일정하며 관측소별 강우량의 차이도 거의 일정하게 나타났다(Fig. IV-3).

Table IV-11. Rainfall data by month of rainfall observatory at the basin of Yeonoae river (2000~2006, for 7 years)

	서귀포	송산동	돈네코
Jan	69.1	64.1	82.1
Feb	69.3	60.6	93.9
Mar	90.6	77.7	119.3
Apr	188.9	207.9	263.7
May	235.4	231.2	387.1
Jun	211.7	176.2	259.0
Jul	237.5	215.3	309.3
Aug	294.8	292.6	433.6
Sep	160.7	158.0	234.2
Oct	97.5	95.6	134.6
Nov	82.7	71.9	93.4
Dec	43.8	44.0	71.1

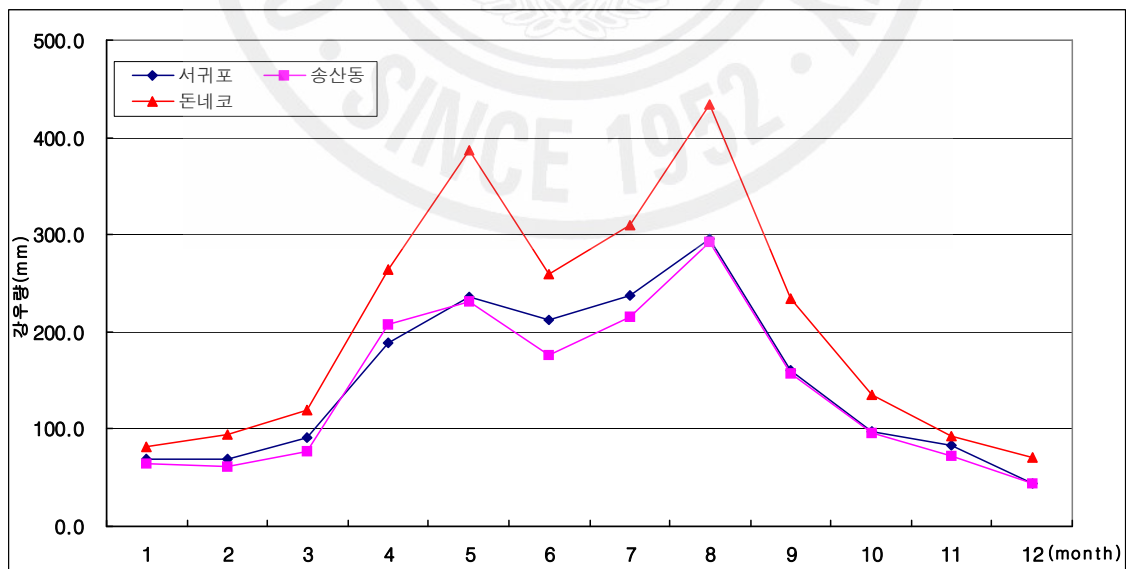


Fig. IV-4. Precipitation by month and by precipitation observatory of Yeonoae river basin

연외천 유역 강우관측소별 월별 패턴은 전체적으로 일정하였으며 고지대에 위치한 돈네코 지역이 많은 강우량을 나타냈다(Fig. IV-4).

2. 대상유역의 GIS 자료 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 형태는 모형 내부에서도 모의되기 때문에 DEM, 토지피복도, 토양도 자료를 구축하였다.

2.1 DEM(수치고도자료) 구축

모델의 수문 시스템에서 속성정보는 경사도, 경사방향, 토지이용, 토지피복 등을 포함한다. 이러한 공간정보의 기본 틀을 제공하는 기본도인 DEM(Digital Elevation Model)은 수치지도에서 추출한 등고선을 이용하여, 1초(30m) 간격의 격자단위로 표고값을 표현한 자료로서 USGS에서 전 세계를 대상으로 구축한 수치고도자료이다.

대상유역의 DEM은 환경부에서 제공하는 30m×30m 해상도의 DEM을 arcInfo 를 이용해 가공하여 사용하였다. DEM 분석결과 제주도는 0~1950 표고를 가지고 있으며, 유역 평균표고는 283.69m, 유역의 평균 경사는 9.04%로 확인되었다(Fig. IV-5).

천미천 유역은 유역평균 표고가 394m, 유역평균 경사가 7.11%이며, 외도천 유역은 유역평균 표고가 468m, 유역평균 경사가 17.12% 이다. 또한 옹포천 유역의 유역평균 표고는 188m, 유역평균 경사는 4.86%로 비교적 완만한 경사를 보이며, 연외천 유역의 유역평균 표고는 313.5m, 유역평균 경사는 11.07% 이다. 각각의 유역별 표고분석 결과는 Table IV-12~15 에 나타내었다.

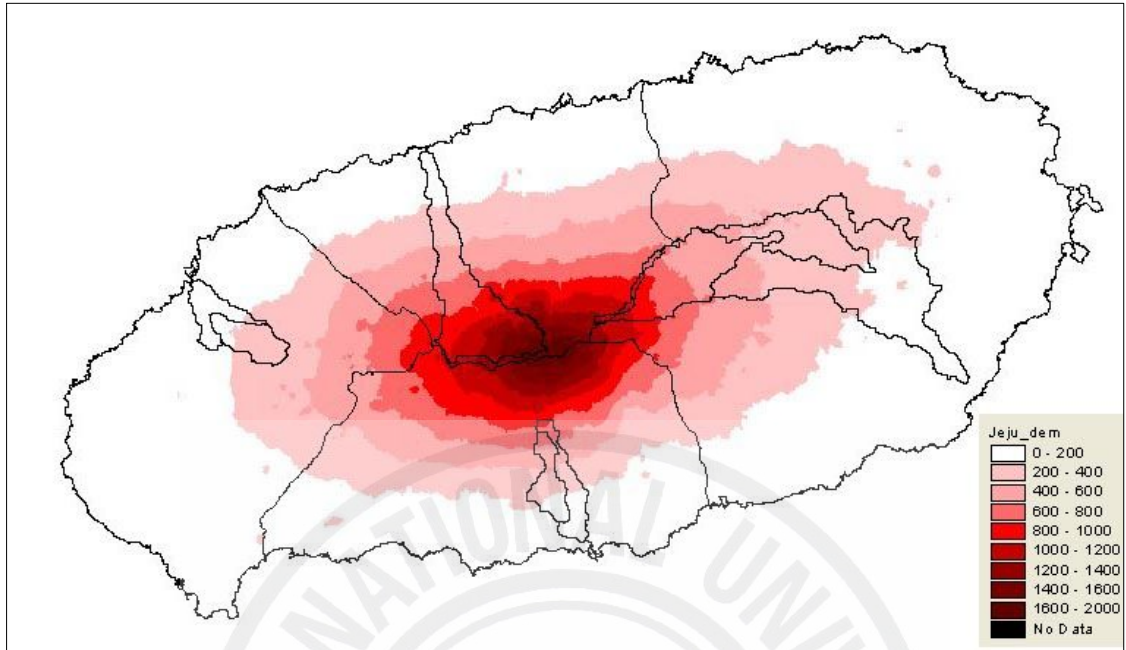


Fig. IV-5. DEM of basin to be studied

Table IV-12. Result of altitude analysis at the basin of Chunmi river

Altitude (m)	Watershed area (km ²)	Percentage (%)	Accumulation Watershe area (km ²)	Accumulation Percentage (%)
0-200	32.24	25.26	32.24	25.26
200-400	52.20	40.90	84.45	66.16
400-600	26.55	20.80	111.00	86.96
600-800	10.28	8.05	121.27	95.01
800-1000	4.72	3.70	125.99	98.71
1000-1200	1.39	1.09	127.38	99.80
1200<	0.26	0.20	127.64	100.00

Table IV-13. Result of altitude analysis at the basin of Oaedo river

Altitude (m)	Watershed area (km ²)	Percentage (%)	Accumulation Watershe area (km ²)	Accumulation Percentage (%)
0-300	6.69	15.02	6.69	15.02
300-600	6.77	15.19	13.46	30.21
600-900	9.32	20.93	22.78	51.14
900-1200	11.59	26.03	34.37	77.17
1200-1500	6.39	14.34	40.76	91.51
1500<	3.78	8.49	44.54	100

Table IV-14. Result of altitude analysis at the basin of Ongpo river

Altitude (m)	Watershed area (km ²)	Percentage (%)	Accumulation Watershe area (km ²)	Accumulation Percentage (%)
0-100	4.52	22.49	4.52	22.49
100-200	6.81	33.89	11.33	56.38
200-300	5.99	29.8	17.31	86.18
300-400	2.77	13.79	20.08	99.97
400<	0.01	0.03	20.09	100

Table IV-15. Result of altitude analysis at the basin of Yeonoae river

Altitude (m)	Watershed area (km ²)	Percentage (%)	Accumulation Watershe area (km ²)	Accumulation Percentage (%)
0-200	8.10	41.33	8.10	41.33
200-400	6.29	32.08	14.40	73.41
400-600	2.86	14.6	17.26	88.01
600-800	1.99	10.16	19.25	98.17
800<	0.36	1.83	19.61	100

2.2 토지피복도(Landuse map)

토지피복도는 국가수자원관리 종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>) 제공하는 토지피복자료를 이용하였다. 이용된 토지피복자료는 2000년 Landsat 위성영상을 이용하여 피복 분류된 자료이며, shape 파일의 형태로 되어있다.

연구대상유역의 각 하천유역별로 토지피복도(Landuse map)자료를 Arcview 프로그램을 이용하여 구축하였으며, 유역별로 격자크기는 100m×100m 으로 설정하여 모형의 입력자료로 사용하였다(Fig. IV-6).

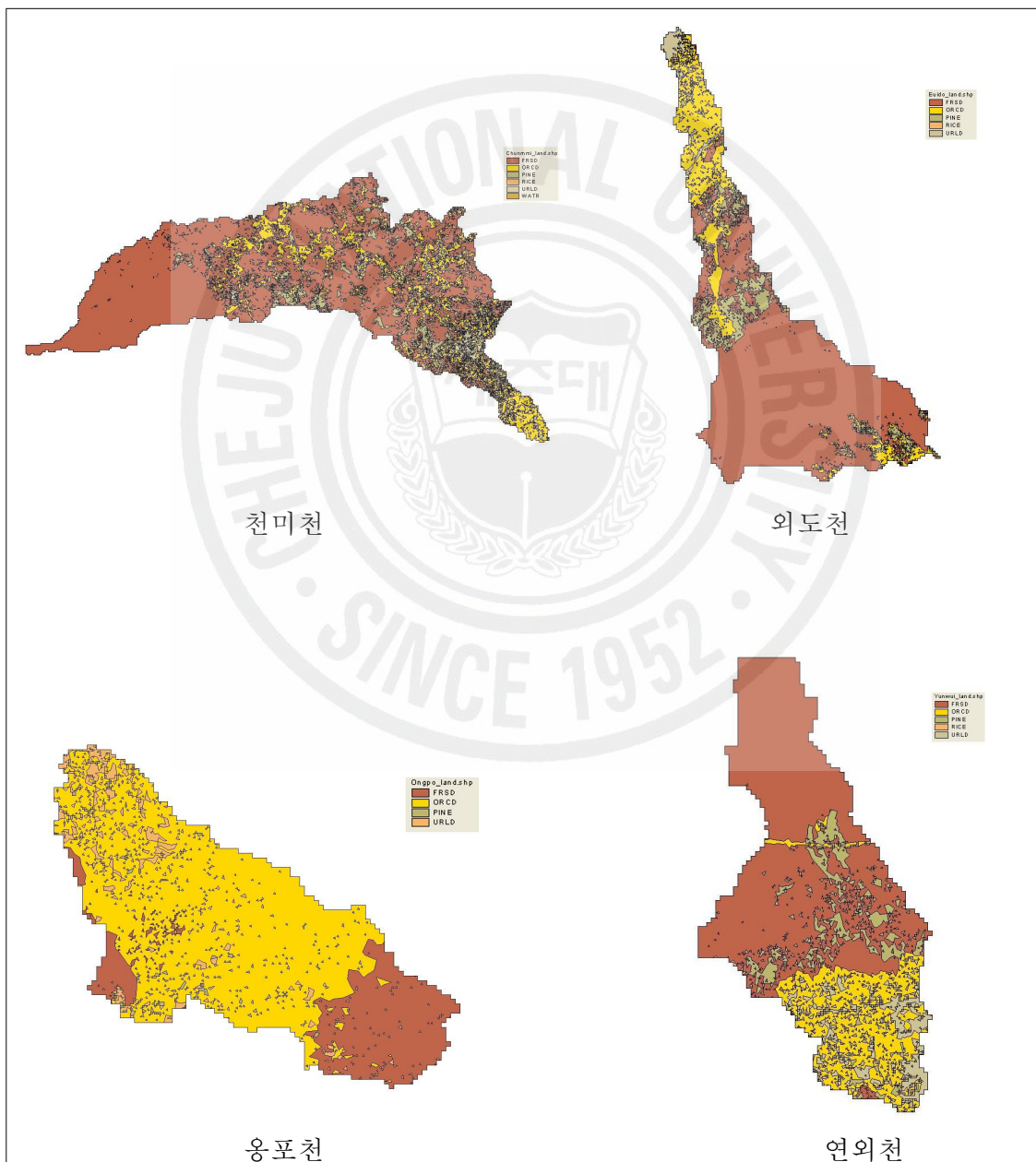


Fig. IV-6. Land-cover map of basin to be studied

천미천 유역의 토지피복상태는 산림지역이 전체의 68.05%를 차지하고 있으며, 밭, 초지, 시가지 순으로 토지 피복 상태가 나타났다(Table IV-16).

Table IV-16. Ground coverage state at the basin of Chunmi river

구 분	면적(km ²)	비율(%)
논	0.01	0.01
초지	11.14	8.73
밭	25.4	19.9
산림	86.86	68.05
시가지	4.24	3.32

외도천 유역은 산림지역이 전체 70.77%를 차지하고 있으며 , 밭, 초지, 시가지 순으로 토지 피복 상태가 나타났다(Table IV-17).

Table IV-17. Ground coverage state at the basin of Oaedo river

구 분	면적(km ²)	비율(%)
논	0.07	0.16
초지	4.71	10.58
밭	7.31	16.42
산림	31.52	70.77
시가지	0.92	2.07

Table IV-18 에서 옹포천 유역은 밭인 지역이 전체의 68.87%를 차지하며 산림, 시가지, 초지 순으로 토지 피복 상태가 나타났고, Table IV-19 에서 연외천 유역은 산림지역이 전체의 62.91%를 차지하며 밭, 초지, 시가지 순으로 토지 피복 상태가 나타났다.

Table IV-18. Ground coverage state at the basin of Ongpo river

구 분	면적(km ²)	비율(%)
초지	0.30	1.48
밭	13.84	68.87
산림	4.56	22.7
시가지	1.40	6.95

Table IV-19. Ground coverage state at the basin of Yeonoae river

구 분	면적(km ²)	비율(%)
논	3.68	0.14
초지	2.22	11.32
밭	1.35	18.78
산림	12.37	62.91
시가지	0.03	6.86

2.3 토양도(Soiltype map)

토양도(Soil Type Map) 자료는 농업과학기술원에서 제공하는 농업토양정보시스템 (ASIS) 제공하는 1:25000 정밀 토양도를 토양통별로 구분하여 입력자료로 구축하였다. 토양도 역시 shape 파일로 되어있으며 토지이용도와 마찬가지로 속성값으로 분류를 하였다.

토지피복자료와 같은 방법으로 연구대상구역의 각 하천유역별로 토양도(Soiltype map)자료를 Arcview 프로그램을 이용하여 구축하였으며, 유역별로 격자크기는 100m×100m 으로 설정하여 모형의 입력자료로 사용하였다(Fig. IV-7).

천미천 유역은 35개의 토양통 중에서 평대통이 27.15 %를 차지하고 있으며, 노로, 미악, 남원, 녹산 통이 비교적 많은 분포를 보이고 있으며, 외도천 유역은 31개의 토양통 중에서 흑악통이 27.69% 차지하고 있으며, 오라, 한경, 적악, 군산 통이 비교적 많은 분포를 보이고 있다. 옹포천 유역은 25개의 토양통 중에서 구좌통이 24.29%로 가장 많은 비율을 보이고 있으며, 중엄, 오라, 사라, 동귀 통이 많은 분포를 보이고 있다. 연외천 유역은 30개의 토양통 중에서 흑악통이 20.69% 로 가장 많은 비율을 보이고 있으며, 오라, 아라, 제주, 중문 통이 많은 분포를 보이고 있다.

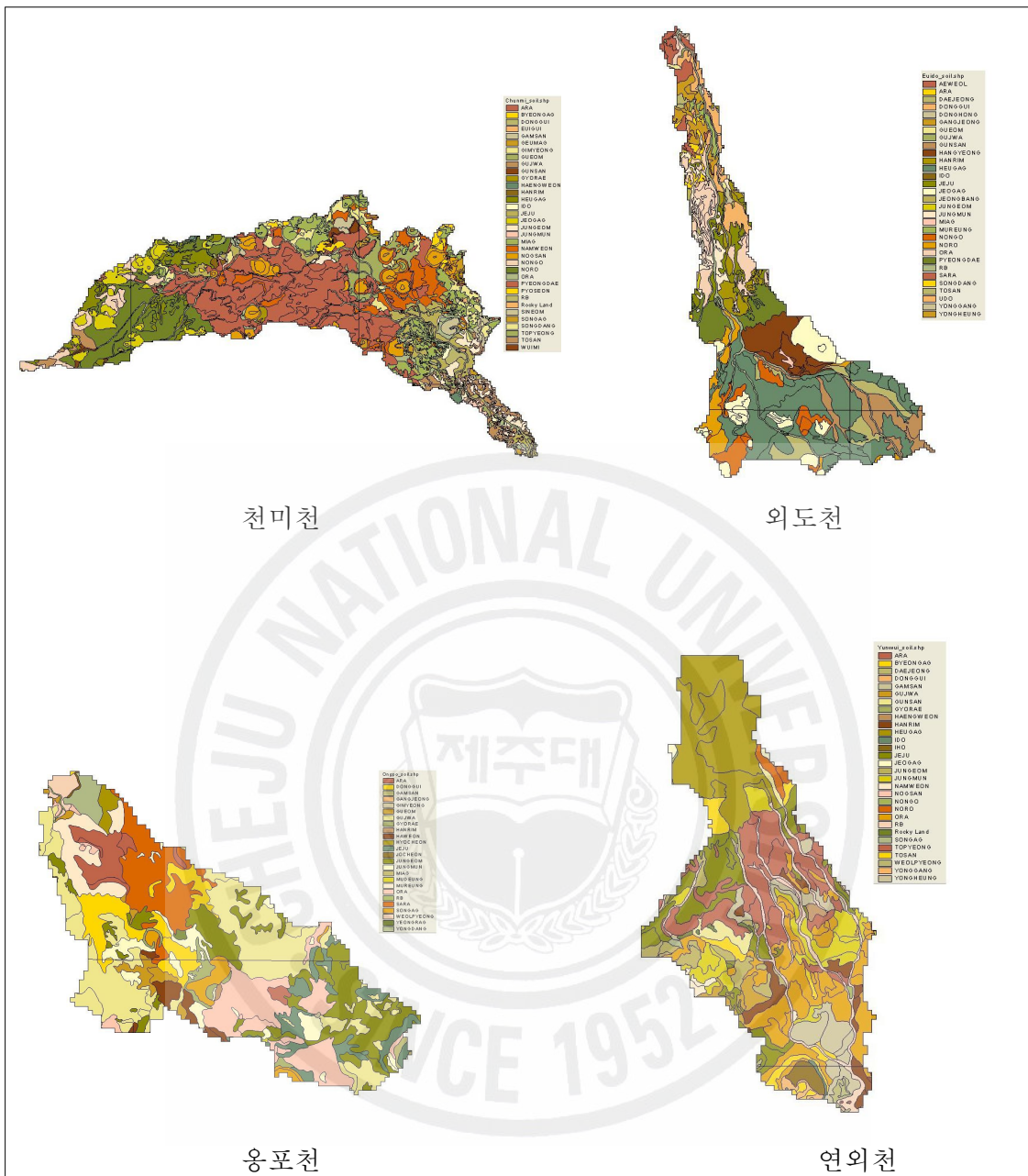


Fig. IV-7. Soil map of basin to be studied

Table IV-20. Rate and dimension by soil series at the basis of Chunmi river

구 분	면적(km ²)	비율(%)
GUJWA	3.51	2.75
MIAG	10.20	7.99
GIMYEONG	1.56	1.22
PYEONGDAE	34.65	27.15
JUNGEOM	3.36	2.63
GUEOM	0.65	0.51
RB	4.19	3.28
JEJU	6.39	5.01
JUNGMUN	0.40	0.31
IDO	0.32	0.25
ORA	2.23	1.75
GEUMAG	0.37	0.29
GYORAE	0.82	0.64
HAENGWEON	0.69	0.54
EUIGUI	0.10	0.08
ARA	0.08	0.06
SONGAG	1.16	0.91
NAMWEON	8.39	6.57
NOGSAN	6.55	5.13
PYOSEON	1.53	1.2
SONGDANG	3.32	2.6
TOPYEONG	4.60	3.6
WUIMI	0.70	0.55
GAMSAN	0.87	0.68
SINEOM	1.42	1.11
Rocky Land	0.15	0.12
DONGGUI	0.49	0.38
HEUGAG	5.14	4.03
NORO	13.91	10.9
JEOGAG	5.13	4.02
HANRIM	0.20	0.16
NONGO	3.06	2.4
BYEONGAG	0.06	0.05
TOSAN	1.11	0.87
GUNSAN	0.31	0.24

Table IV-21. Rate and dimension by soil series at the basis of Oaedo river

구 분	면적(km ²)	비율(%)
HEUGAG	12.33	27.69
GUNSAN	2.80	6.28
RB	1.75	3.92
TOSAN	2.01	4.51
NORO	1.79	4.01
NONGO	2.05	4.61
JEOGAG	3.01	6.76
SARA	0.55	1.24
DAEJEONG	0.14	0.31
YONGGANG	0.01	0.03
ORA	3.10	6.96
AEWEOL	0.49	1.1
GUJWA	0.08	0.17
DONGGUI	1.23	2.77
GUEOM	0.07	0.16
GANGJEONG	0.26	0.59
JUNGMUN	1.60	3.6
HANRIM	1.46	3.28
YONGHEUNG	1.03	2.32
MUREUNG	0.29	0.64
ARA	0.49	1.1
JEJU	1.39	3.12
IDO	0.01	0.03
JUNGEOM	0.08	0.17
JEONGBANG	0.08	0.17
UDO	0.70	1.57
DONGHONG	0.05	0.12
PYEONGDAE	2.50	5.61
HANGYEONG	3.05	6.84
SONGDANG	0.03	0.06
MIAG	0.12	0.26

Table IV-22. Rate and dimension by soil series at the basis of Ongpo river

구 분	면적(km ²)	비율(%)
GUJWA	4.88	24.29
DONGGUI	1.56	7.77
JUNGMUN	1.01	5.02
GUEOM	0.37	1.86
SARA	1.76	8.74
GYORAE	0.30	1.48
SONGAG	0.48	2.41
JUNGEOM	3.04	15.14
ORA	2.59	12.9
JEJU	0.93	4.61
HAWEON	0.39	1.96
HANRIM	0.01	0.07
ARA	0.91	4.51
GIMYEONG	0.01	0.03
GAMSAN	0.06	0.31
MIAG	0.01	0.03
YONGDANG	0.35	1.75
JOCHEON	0.03	0.14
WEOLPYEONG	0.23	1.14
RB	0.02	0.1
HYOCHEON	0.22	1.1
MUREUNG	0.88	4.37
YEONGRAG	0.06	0.28

Table IV-23. Rate and dimension by soil series at the basis of Yeonoae river

구 분	면적(km ²)	비율(%)
JUNGEOM	0.78	3.96
JEJU	2.01	10.25
ORA	2.93	14.92
BYEONGGAG	0.50	2.55
IHO	0.24	1.2
IDO	0.02	0.11
YONGHEUNG	0.95	4.84
RB	0.94	4.77
HANRIM	0.75	3.82
WEOLPYEONG	0.03	0.14
DONGGUI	0.05	0.28
DAEJEONG	0.09	0.46
HEUGAG	4.06	20.69
GUNSAN	0.37	1.91
JEONGAG	0.04	0.21
NORO	0.19	0.95
TOSAN	0.27	1.38
NONGO	0.04	0.21
JUNGMUN	1.57	7.99
ARA	2.81	14.32
GAMSAN	0.36	1.84
NOGSAN	0.08	0.42
HAENGWEON	0.06	0.32
Rocky Land	0.04	0.18
SONGAG	0.02	0.11
NAMWEON	0.10	0.53
GUJWA	0.32	1.63

V. SWAT 모형의 제주도 주요하천 적용

1. 매개변수 민감도 분석

1.1 매개변수 추정

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 매개변수를 식별하는 것이다. 그래서 가장 비슷한 값으로 잘 수행하는 해를 선택하고 더 정확하게 매개변수를 추정하여 효율성을 높이는 것이다.

물리학적 매개변수는 매개변수보정의 대상이 되지 않으므로 수문학적 매개변수 중 유출에 관련된 매개변수를 민감도분석을 실시할 매개변수로 선정하였다. SWAT 모형의 매개변수(Table V-1) 중에서 유출 및 증발산에 영향을 미치는 지하수 매개변수 4개, HRU 관련 매개변수 1개, HRU 정보관련 매개변수 1개, 하천의 피복 등에 관련 매개변수 3개, 토양관련 매개변수 2개, 유역 Input 관련 매개변수 2개, 총 13개의 매개변수를 선정하였다.

Table V-2는 민감도 분석을 위해 선정한 매개변수를 정리한 것이다. 매개변수별 상한값 및 하한값과 기준값, 그리고 변동범위를 나타낸다. 민감도 분석과정은 선정한 매개변수의 상한값과 하한값을 결정한 후 상한값과 하한값의 중간값으로 기준값을 설정하여 일정한 범위 ($\pm 25\%$)씩 단계적으로 변화시키면서 민감도 분석을 실시하였다.

제주도 하천 특성에 맞추어 건천인 유역과 비건천인 유역을 나누어서 민감도 분석을 실시하였으며, 건천인 유역에는 직접유출량을 기준으로 하여 민감하게 영향을 주는 매개변수를 추출하였다. 또한 비건천인 유역에는 각각의 매개변수가 직접유출, 총 유출량에 대하여 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 민감도 분석을 하였다.

Table V-1. Parameter in SWAT model

분 류	매개변수	하한치	상한치	
Crop.dat	USLE_C	0.001	0.5	토지피복에 따른 피복 계수
Basin input	SMFMX	0	10	6월21일의 용해 요소
	SMFMN	0	10	12월21일의 용해 요소
	SPCON	0.0001	0.01	토사이동 방정식에서의 계수
	SPEXP	1	1.5	토사이동 방정식에서의 계수
	NPERCO	0	1	질산 침투 계수
	PRERCO	10	17.5	인산 침투 계수
	PHOSKD	100	200	토양의 인성을 구분하는 계수
Chemical	SOL_LABP	0	100	토양층에서의 초기 NO ₃ 농도
	SOL_ORGN	0	10000	토양층에서의 초기 산화질소 농도
	SOL_ORGP	0	4000	토양층에서의 초기 산화인 농도
	SOL_NO3	0	5	토양층에서의 초기 NO ₃ 농도
Ground water	ALPHA_BF	0	1	기저유출 감수 상수
	GWQMN	0	5000	기저유량에 대한 얇은 대수층의 임계 수분량
	GW_REVAP	0.02	0.2	얇은 대수층의 REVAP 계수
	REVAPMN	0	500	침투에 대한 얇은 대수층의 임계 수분량
HRU General	ESCO	0	1	토양증발 보상계수
	SLOPE	0.0001	0.6	소유역의 평균 경사도 계수(%)
	SLSUBBSN	10	150	경사의 길이(m)
	n			매닝의 조도계수
Soil	TLAPS	0	50	온도 변동 계수
	SOL_AWC	0	1	토양층 유효수분량
Main channel	CH_COV	-0.001	1	하천의 피복 요소
	CH_EROD	-0.05	0.6	하천의 침식성 요소
	CH_K2	-0.01	150	하천에서의 수리전도도 계수
Management	BIOMIX	0	1	생물학적 혼합계수
	USLE_P	0.1	1	USLE 경험계수
	CN_2	35	98	AMC-II 에서의 SCS 유출곡선지수

Table V-2. Value for analyzing the sensitiveness of hydrological parameters related to runoff

매개변수	하한값	-25(%)	기준값	25(%)	상한값
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

1.2 민감도 분석

연구대상 유역에서 건천인 천미천 유역에 Table V-2에서 추정된 매개변수 13개를 기준치에서 $\pm 25\%$ 씩 변화를 시키면서 민감도 분석을 실시하였다. 건천인 유역은 보정을 위한 실측 유출자료가 직접유출량 이므로 직접유출량에 대한 13개 매개변수들을 민감도 분석 하였다.

건천 유역의 매개변수 민감도 분석을 실시한 결과 가장 민감한 매개변수는 AMC-II 조건의 SCS 유출곡선지수인 CN2 로 나타났다. CN2 값이 증가함에 따라 직접유출량은 지수 함수적으로 증가하였으며, SOL_AWC 가 기준값에서 변화할수록 10% 정도의 직접유출량의 변화를 보임을 확인하였다. 또한 ESCO 도 기준값에서 변화할수록 5%정도의 변화를 확인하였으며, 직접유출량에 대해서 위의 3가지 매개변수를 제외한 나머지 매개변수들은 어떠한 반응도 보이지 않았다(Fig. V-1).

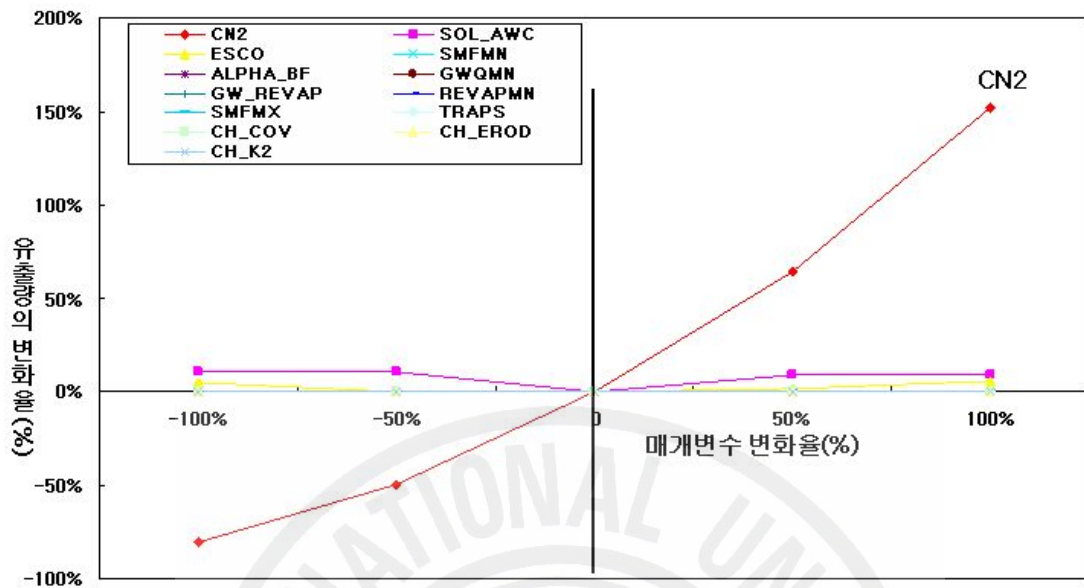


Fig. V-1. Rate of change of direct runoff according to the rate of change of parameter of the basin of a dry stream

Table V-3. Rate of change of direct runoff according to the rate of parameter at the basin of a dry stream

매개변수	하한값	-25%	0	+25%	상한값
CN2	-0.807	-0.492	0.000	0.643	1.519
SOL_AWC	0.108	0.106	0.000	0.092	0.092
ESCO	0.048	-0.003	0.000	0.014	0.059
SMFMN	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ALPHA_BF	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
GWQMN	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
GW_REVAP	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
REVAPMN	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SMFMX	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
TRAPS	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
CH_COV	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
CH_EROD	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
CH_K2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

상시 하천 유역의 매개변수 민감도 분석을 실시한 결과 직접유출량에 대하여 반응하는 매개변수는 건천 유역과 마찬가지로 CN2, SOL_AWC, ESCO 등이 반응을 하였다(Fig. V-2).

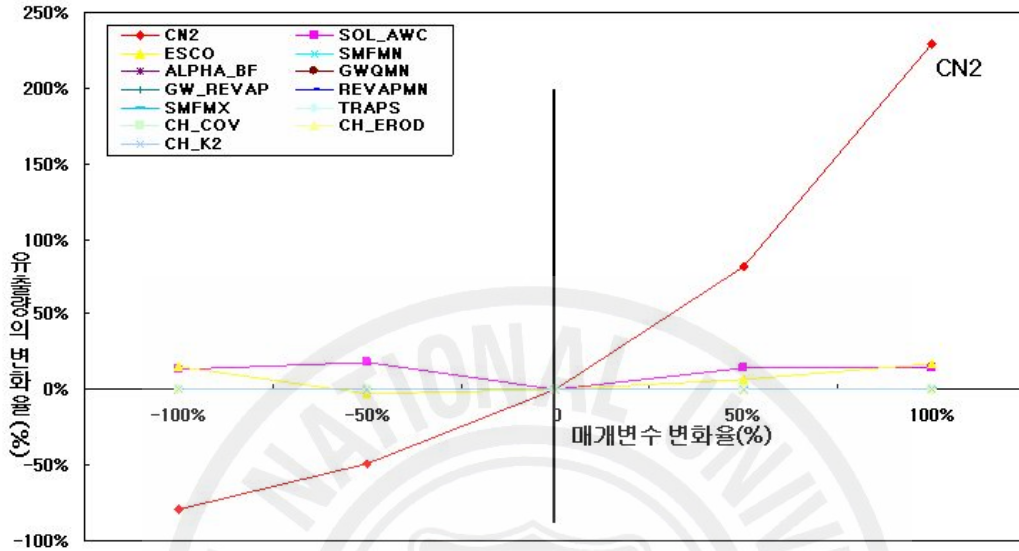


Fig. V-2. Rate of change of direct runoff according to the rate of change of parameter of the basin of a river

Table V-4. Rate of change of direct runoff according to the rate of parameter at the basins except for a river

매개변수	하한값	-25%	0	+25%	상한값
CN2	-0.793	-0.485	0.000	0.815	2.288
SOL_AWC	0.494	0.633	0.000	0.503	0.503
ESCO	0.155	-0.027	0.000	0.069	0.172
SMFMN	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ALPHA_BF	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
GW_QMN	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
GW_REVAP	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
REVAPMN	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SMFMX	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
TRAPS	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
CH_COV	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
CH_EROD	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
CH_K2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

상시 하천 유역의 총 유출량에 대하여 반응을 보인 매개변수는 SOL_AWC, CN2, GWQMN, ESCO, ALPHA_BF, GW_REVAP, REVAPMN 으로 총 7개의 매개변수가 총 유출량에 대하여 민감한 반응을 보였다(Fig. V-3). 가장 민감하게 반응을 보인 토양층 유효수분량이 SOL_AWC 는 기준값에서 하한값에 가까워질수록 20% 이상의 총 유출량이 증가하는 경향을 보였으며, AMC-II 조건의 SCS 유출곡선 지수인 CN2 는 기준값에서 상한값에 가까워질수록 15% 정도의 총 유출량이 증가하는 경향을 보였다. 또한 기저유출 감수 상수인 ALPHA_BF 는 총 유출량에 대하여 반응을 보이지 않다가 하한값에 대하여는 -16%정도의 총 유출량이 감소하는 경향을 보였으며, 기저유출에 대한 얇은 대수층의 임계 수분량인 GWQMN 은 기준값에서 상한값으로 증가할수록 -1% 정도 총 유출량이 감소하는 경향을 보이고 하한값으로 하락할수록 16% 정도 총 유출량이 증가하는 경향을 보였다. 토양증발 보상계수인 ESCO, 얇은 대수층의 REVAP 계수인 GW_REVAP, 침루에 대한 얇은 대수층의 임계 수분량인 REVAPMN 은 각각 5% 미만의 반응을 나타냈다(Table V-5).

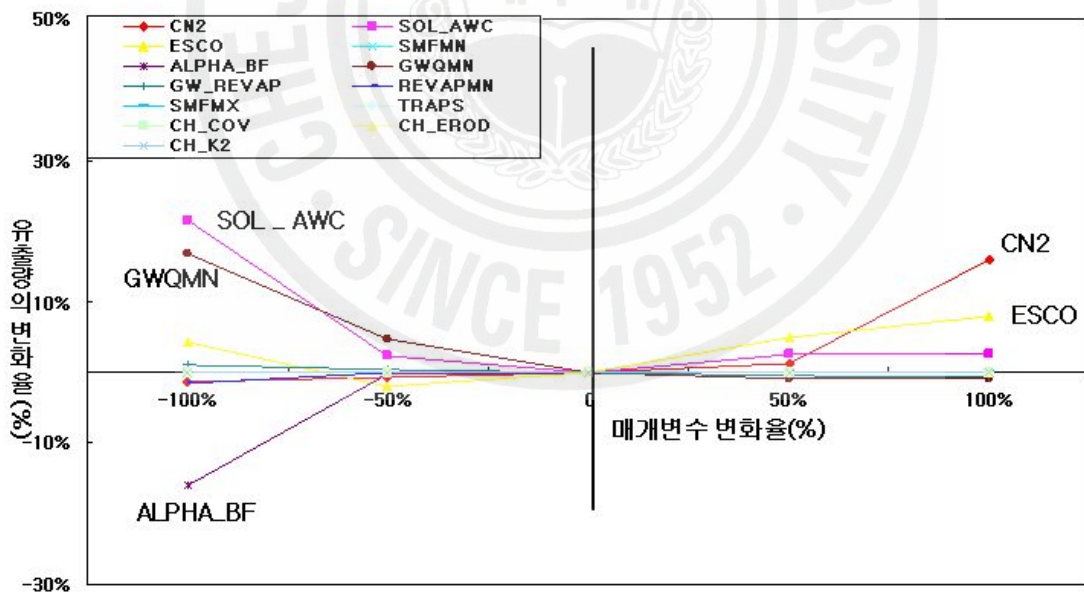


Fig. V-3. Rate of change of total runoff according to the rate of change of parameter of the basin of a river

Table V-5. Rate of change of total runoff according to the rate of parameter at the basins except for a river

매개변수	하한값	-25%	0	+25%	상한값
CN2	-0.013	-0.007	0.000	0.013	0.159
SOL_AWC	0.216	0.024	0.000	0.026	0.026
ESCO	0.043	-0.020	0.000	0.049	0.079
SMFMN	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ALPHA_BF	-0.160	-0.001	0.000	0.000	0.001
GWQMN	0.169	0.048	0.000	-0.009	-0.009
GW_REVAP	0.010	0.005	0.000	-0.004	-0.006
REVAPMN	-0.016	0.000	0.000	0.000	0.000
SMFMX	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
TRAPS	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
CH_COV	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
CH_EROD	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
CH_K2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

1.3 목적함수

목적함수는 수문자료의 특성이나 모형의 제한사항 등을 고려하여 선정하여야 하는데, 적용되는 목적함수에 따라 매개변수 조합이 달라지게 된다. 대상 모형의 특성(연속사상 or 단일사상)과 평가의 목적(유출용적 or 침투유량)에 따라 적용할 수 있는 기준은 다양하다. 일반적으로 유출량의 추적에 이용되는 목적함수는 주요 분석 대상이 홍수 유출량이나 갈수 유출량이나에 따라 달라지게 된다. 본 연구에서는 SWAT 모형의 모의결과의 적합성을 판단하기 위하여 평균제곱근 오차와 모형 효율성 계수를 사용하였다.

1) 평균제곱근 오차 (Root Mean Square Error, RMSE)

평균제곱근 오차 지표는 자료의 수에 무관하고 해석하고자 하는 변량과 같은 차원을 갖는 지표이다(Wood, 1974). 즉, 모형수행의 결과가 평균적으로 어느 정도의 유량만큼 오차가 발생하는지를 나타내는 지표로 일종의 평균치라고 할 수 있다. 본 연구에서 사용한 목적함수(f_s)는 식 (5.1)과 같다.

$$f_s = \text{RMSE} \quad (5.1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (OQ_i - SQ_i)^2}{N}}$$

여기서, $OQ_i =$ 관측유량

$SQ_i =$ 모의유량

$N =$ 시간간격의 수

2) 모형 효율성 계수(Model Efficient, ME)

모형 효율성 계수(ME)는 Nash와 Sutcliffe(1970)가 제안한 통계적 기준으로 편의를 줄일 수 있는 무차원 계수이다. 모의된 수문곡선이 실측 수문곡선과 잘 일치할수록 1에 가까워지는 단순 명료한 성질이 있으며, 이 값이 음수이면 실측값의 평균을 사용하는 것이 모형에 의해 예측된 값을 이용하는 것보다 낫다는 의미이다. Server와 Dezetter(1991)는 이 효율식이 수문곡선의 전체적인 적합성을 반영하는데 가장 우수한 목적함수임을 밝혔다. 본 연구에서는 식 (5.2)와 같이 모형효율성 계수(ME)를 목적함수 (f_s)로 활용하였다.

$$f_s = ME \quad (5.2)$$

$$ME = \frac{F_0^2 - F^2}{F_0^2}$$

$$F^2 = \sum_{i=1}^N (M_{ob} - OQ_i)^2$$

$$F_0^2 = \sum_{i=1}^N (SQ_i - OQ_i)^2$$

여기서, $OQ_i =$ 관측유량

$SQ_i =$ 모의유량

$N =$ 시간간격의 수

$M_{ob} =$ 관측유량의 평균

2. 모형의 보정 과 적용

2.1 천미천 유역

천미천 유역의 모형의 결과를 보정·검정하기 위해서는 실측 유량 관측 자료가 필요하지만 천미천 유역은 항시 건천의 형태를 띠기 때문에 연속적 유출 자료는 확보할 수 없었다. 그래서 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 V-6). 보정 결과 1999년부터 2006년까지 평균 직접 유출율은 22%였으며 2회의 평균제곱근 오차는 13.09였다. 실측자료의 부재로 인하여 2회의 평균제곱근 오차(RMSE)는 계산할 수 있었으나, 연간 통계치의 평균제곱근 오차(RMSE)와 모형의 효율성 계수(ME) 는 계산할 수 없었다.

Table V-6. Corrected parameter of the basin of Chunmi river

입력파일	매개변수	정의	보정값	범위
*.mgt	CN2	AMC-II 에서의 SCS 유출곡선지수	▽8	35~98
*.sol	SOL_AWC	토양층 유효수분량	△0.03	0~1
*.hru	ESCO	토양증발 보상계수	△0.25	0~1

그러나 실측 유출자료가 턱없이 부족한 천미천 유역에 모형의 적용성을 판단할 수 있는 지표로는 년도별 직접 유출율(%) 자료 밖에 없었기 때문에 제주도 수문지질·지하수자원 종합조사(Ⅲ)의 표선유역 평균 직접유출율과 비교 하였다. 기존의 1993~2002년 의 직접 유출율 폭은 17~31 % 로 평균치는 22% 로 나타났으며, 모형의 보정 결과 1999~2006년 의 직접 유출율 폭은 13~28%로 평균치는 22%로 나타났다. 직접 유출율은 비교적 적합하게 맞지만 이러한 결과는 많은 실측 자료를 바탕으로 하여 결과치를 검정해야만 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이라 사료된다.

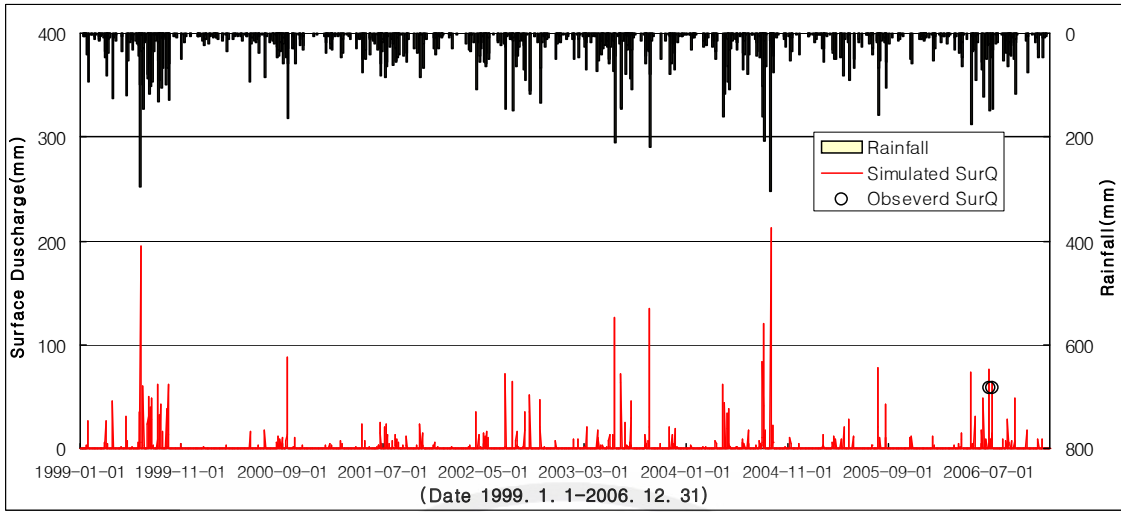


Fig. V-4. Result of direct runoff simulation of the basin of Chunmi river
 Table V-7. Result of simulation by year of the basin of Chunmi river

년도	강우량 (mm)	직접유출량 (mm)	년도	강우량 (mm)	직접유출량 (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

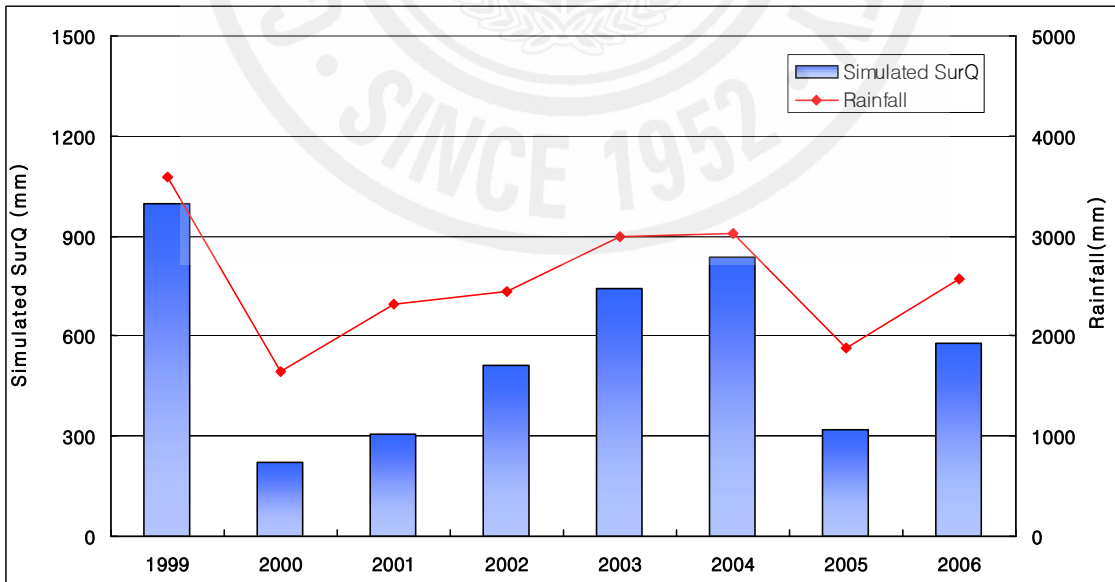


Fig. V-5. Result of simulation by year of the basin of Chunmi river

2.2 외도천 유역

외도천 유역은 2007년 강우 발생 시의 유출량 자료를 바탕으로 하여 보정을 하였다. 외도천 하류지점에는 평상시에도 수위 0.084m 정도의 유출이 발생하지만 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(Ⅲ)의 외도천 유역 평상시 유출의 수위-유량 곡선의 상관계수 R 값이 0.6 이므로 모형의 보정에는 사용하지 않았다. 강우발생시 직접 실측한 관측자료인 2007년 7회 관측자료를 바탕으로 보정을 하였다. 모형의 보정 순서는 먼저 유역 출구 지점에서의 총 유출량을 보정한 후 CN2값을 -6정도 줄여서 고정한 후 ALPHA_BF 값을 하한값인 0.02에 맞추었고, SOL_AWC +0.03, ESCO +0.45 상향하여 보정하였다(Table V-7). 보정 결과 평균제곱근오차(RMSE)는 14.92 로 나타났으며, R² 는 0.93, 모형효율성계수(ME)는 0.70으로 나타났다(Fig. V-6).

Table V-8. Corrected parameter of the basin of Oaedo river

입력파일	매개변수	정의	보정값	범위
*.mgt	CN2	AMC-II 에서의 SCS 유출곡선지수	▽6	35~98
*.sol	SOL_AWC	토양층 유효수분량	△0.03	0~1
*.hru	ESCO	토양증발 보상계수	△0.45	0~1
*.gw	ALPHA_BF	기저유출 감수 상수	▽0.028	0~1

그러나 이러한 결과는 평상시에 발생하는 기저유출량의 실측자료를 확보하고 연속적인 유출량자료를 확보한 후에 검정을 한다면 좀 더 확실한 결과값이 나올 것이라 사료된다.

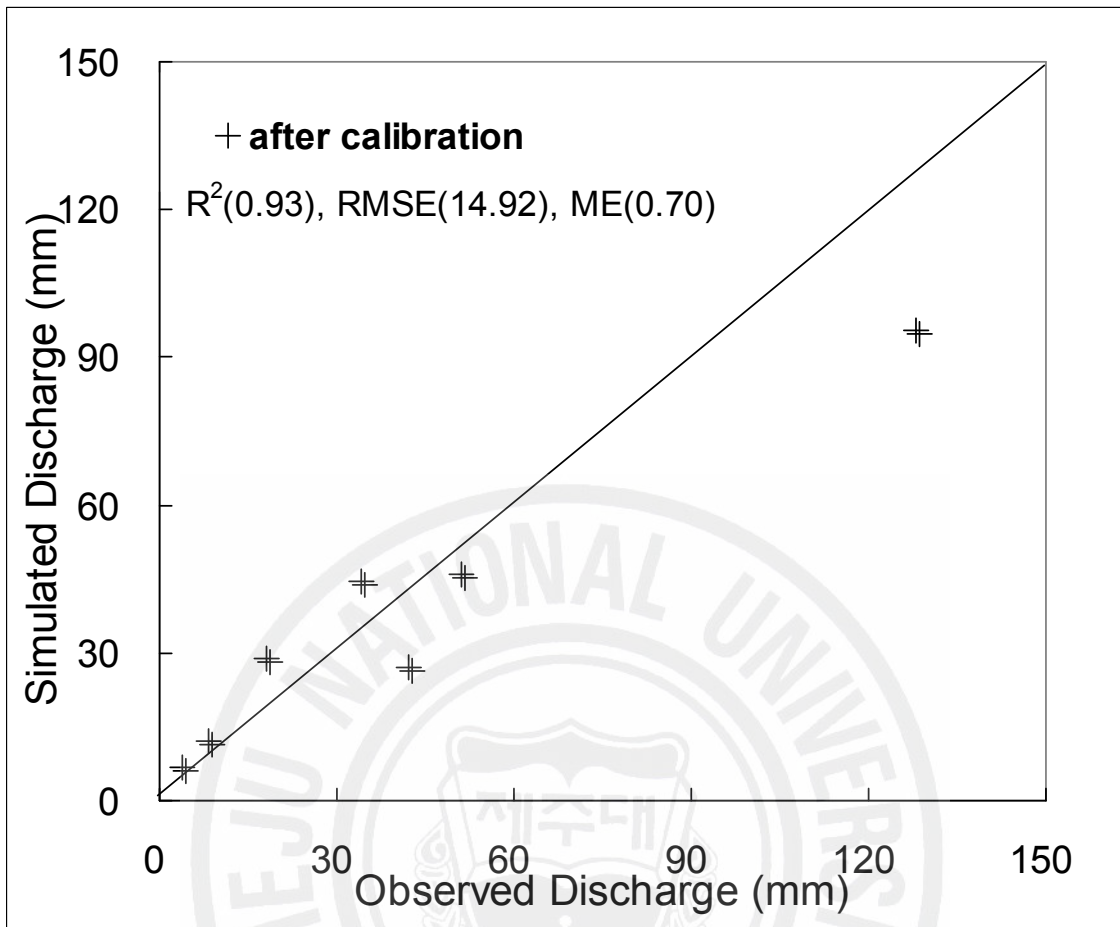


Fig. V-6. Result of correcting the model of the basin of Oaedo river

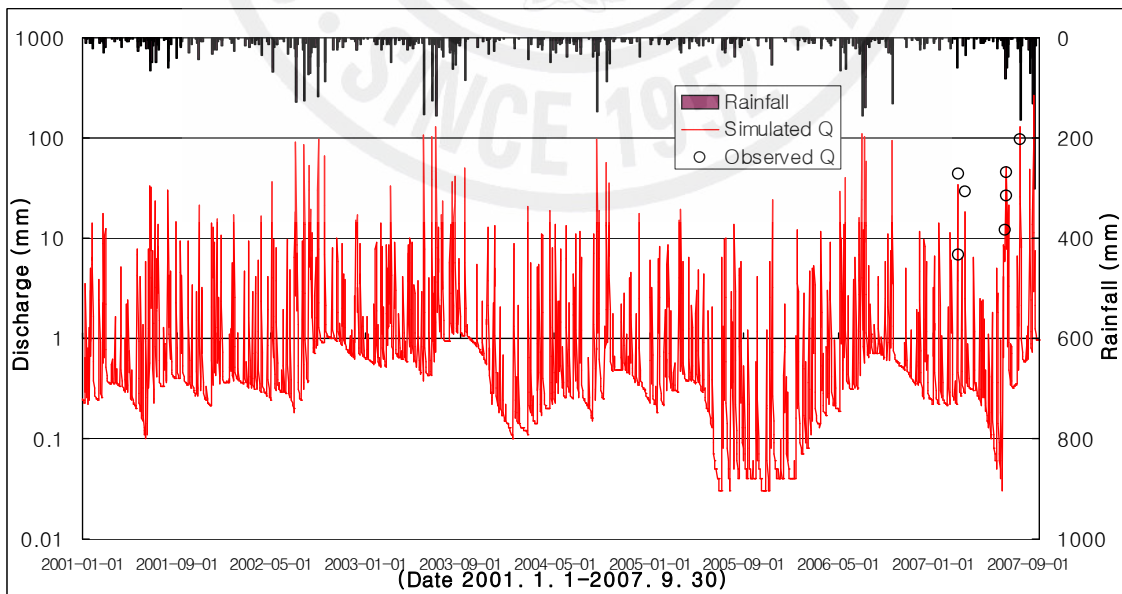


Fig. V-7. Result of runoff simulation of the basin of Oaedo river

2.3 옹포천 유역

옹포천 유역은 2002~2003년의 유출량 자료(문, 2004)를 이용하여 보정·검정을 하였다. 관측값의 대부분이 기저유출성분으로 관측값이 모의값에 비하여 조금 높은 경향을 보인 옹포천 유역에는 CN2를 -7, SOL_AWC를 -0.05, REVAPMN을 +250, ESCO +0.95 상승하여 모의결과값을 보정하였다. 보정 결과 RMSE 0.62, R² 0.86, ME 0.56 로 나타났다(Fig. V-8).

Table V-9. Reinforced parameter at the basin of Ongpo river

입력파일	매개변수	정의	보정값	범위
*.mgt	CN2	AMC-II 에서의 SCS 유출곡선지수	▽7	35~98
*.sol	SOL_AWC	토양층 유효수분량	▽0.05	0~1
*.hru	ESCO	토양증발 보상계수	△0.95	0~1
*.gw	REVAPMN	침루에 대한 얇은 대수층의 임계 수분량	△250	0~500

옹포천 유역은 관측값이 33회 정도로 비교적 많은 관측값을 보유하고 있지만 관측값의 대부분이 1~4mm에 이르는 값이 대부분이다. 현재 옹포천 유역은 홍수시에 유출량을 관측하지 않으므로 평상시 유출량 즉, 기저유출량을 가지고 보정을 실시하였으므로 모형효율성계수(ME)값은 높게 나타나지 않았다. 그러나 비강우시 유출량에 대해서는 많은 관측자료를 바탕으로 하여 R2 값이 0.86에 이르는 높은 수치를 보였기에 강우 시 발생하는 유출량 자료를 보완하여 모형을 구축한다면 좋은 결과를 보일 것이라 사료된다.

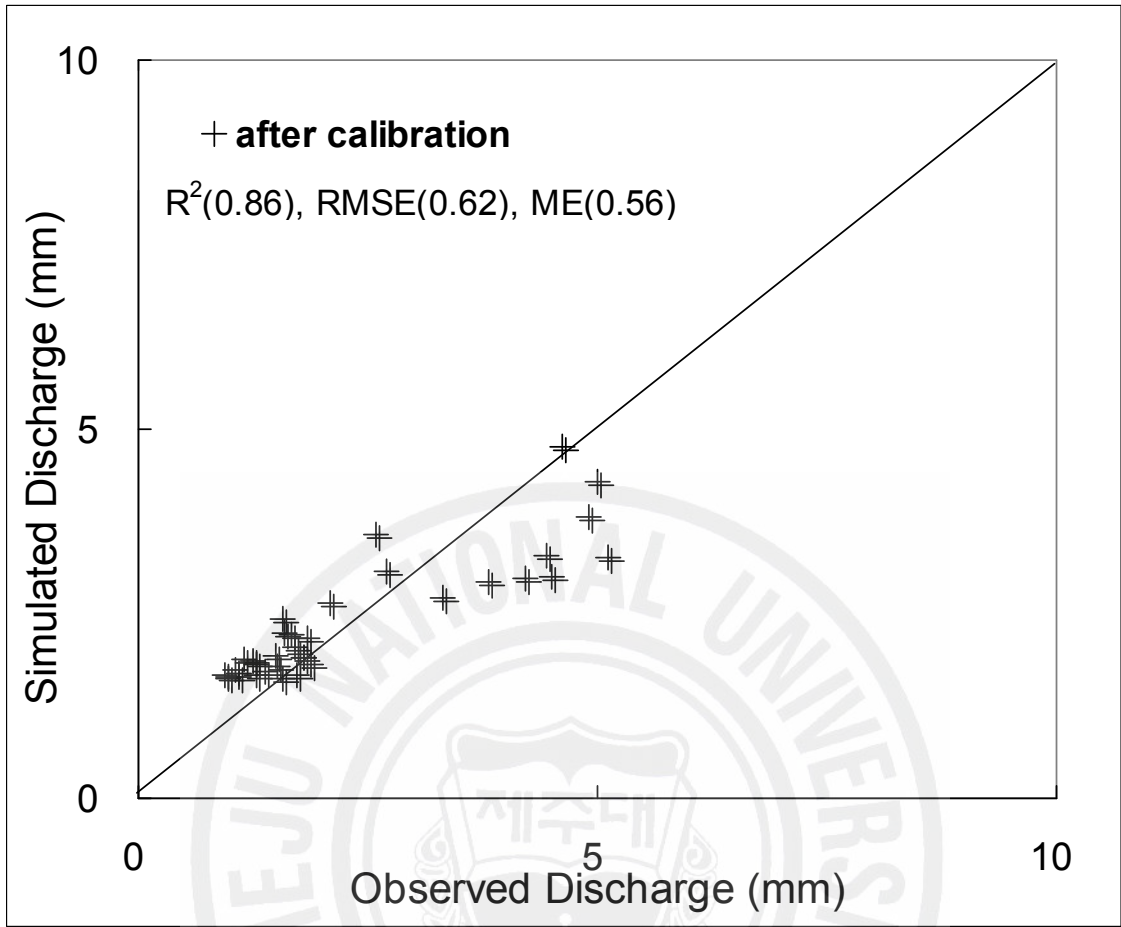


Fig. V-8. Result of correcting the model of the basin of Ongpo river

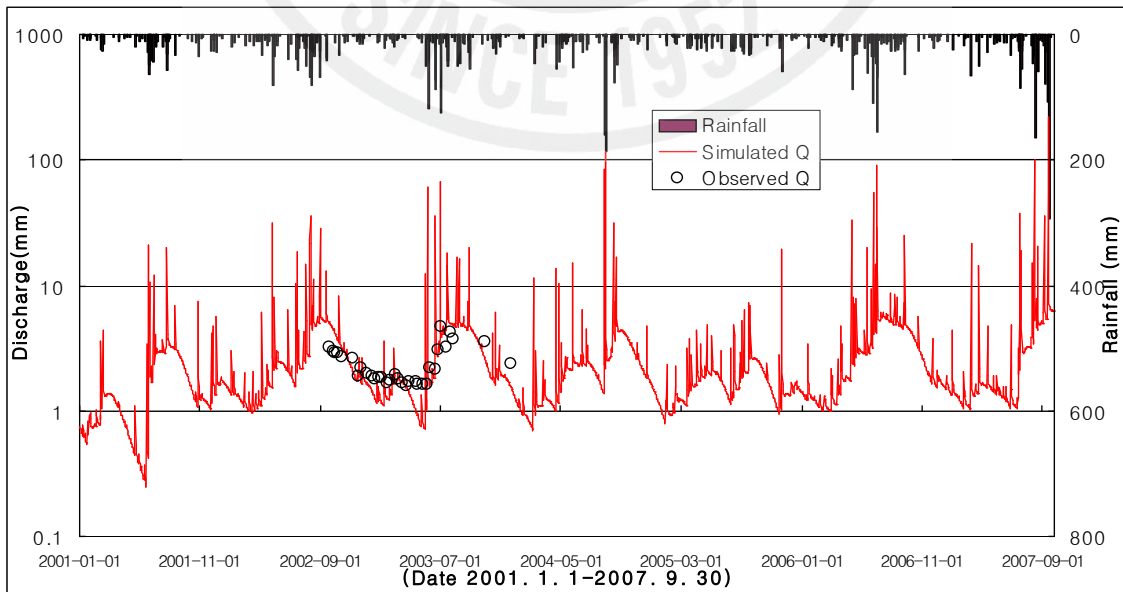


Fig. V-9. Result of runoff simulation of the basin of Ongpo river

2.4 연외천 유역

연외천 유역은 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(Ⅲ)의 유출량 자료와 2003년 유출량자료(문, 2004)를 이용하여 모형적용결과를 보정·검정 하였다. 모형의 보정 순서로는 먼저 유역의 출구 지점에서의 총 유출량을 보정한 후에 CN2값 모든 소유역에 대하여 하향 조정하여 고정 시켰다. SOL_AWC 값을 -0.05 하향, REVAPMN 450 상향, ESCO +1 상향, GW_REVAP 하한값으로 조정하여 모형을 보정하였다(Table V-9).

Table V-10. Reinforce parameter at the basin of Yeonoae river

입력파일	매개변수	정의	보정값	범위
*.mgt	CN2	AMC-II 에서의 SCS 유출곡선지수	▽8	35~98
*.sol	SOL_AWC	토양층 유효수분량	▽0.05	0~1
*.hru	ESCO	토양증발 보상계수	△1	0~1
*.gw	REVAPMN	침투에 대한 얇은 대수층의 임계 수분량	△450	0~500
*.gw	GW_REVAP	얇은 대수층의 REVAP 계수	▽0.02	0.02~0.2

연외천 유역은 관측값의 대부분이 기저유출량이지만 2003년 23회 정도를 보유하고 있으며 2~10mm정도의 관측값을 보이므로 모형은 좋은 결과를 보였다. R² 값이 0.85, 평균제곱근오차(RMSE) 값이 0.99, 모형효율성계수(ME) 값이 0.83 에 이르는 모의 결과가 나왔다. 그러나 연외천 유역 역시 많은 강우발생시의 유출량 자료가 존재하지 않아서 홍수시의 모의 결과값과는 검정할 수 없었다. 홍수시의 유출량 자료가 보완되어 모형을 정확하게 검정한다면 연외천 유역에서 모형의 활용성은 대단히 좋을 것이라 사료된다.

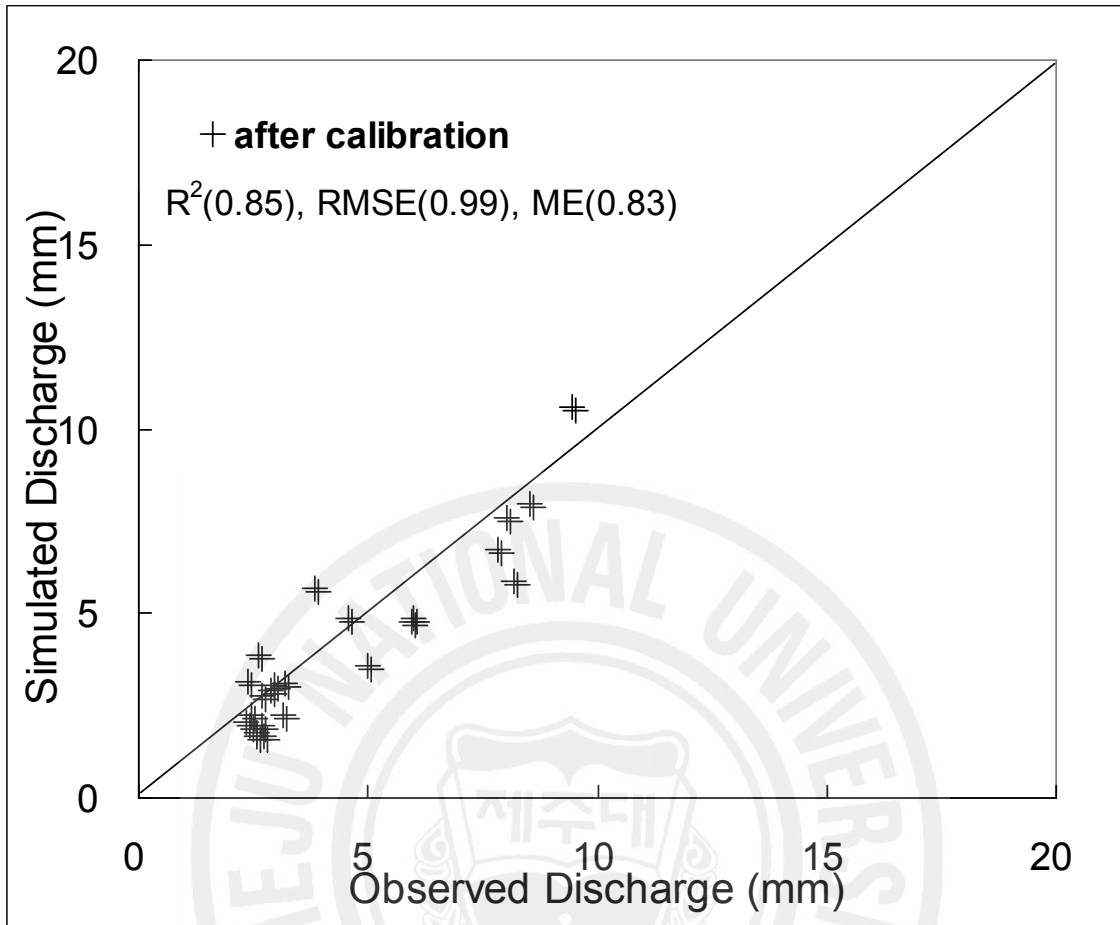


Fig. V-10. Result of correcting the model of the basin of Yeonoae river

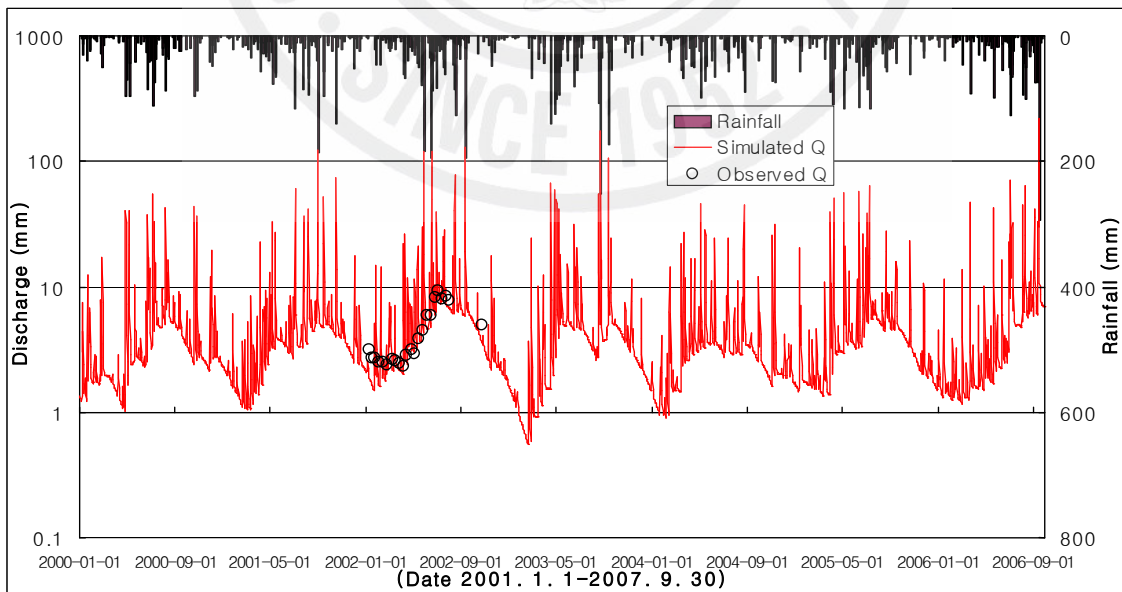


Fig. V-11. Result of runoff simulation of the basin of Yeonoae river

VI. 결 론

제주도 수자원은 육지부와는 상이한 수문지질학적 특성으로 인해 대부분 지하수에 의존하고 있으나, 지표수의 이용과 개발, 하천에 대한 유량관측과 수문모델을 적용하여 하천 유출량을 산정한 연구는 거의 없는 편이다. 제주도에서는 처음으로 준분포형 강우-유출 모형인 SWAT 모형을 주요 하천(천미천, 외도천, 옹포천, 연외천)에 적용하여 유역내의 유출량을 산정한 결과는 다음과 같다.

1) SWAT 모형의 입력 자료인 수문·기상 자료인 강우, 최고·최저기온, 태양복사량, 풍속, 습도 등을 천미천 유역(1999. 1. 1 ~ 2006. 12. 31), 외도천 유역(2000. 1. 1 ~ 2007. 9. 30), 옹포천 유역(2000. 1. 1 ~ 2007. 9. 30), 연외천 유역(2000. 1. 1 ~ 2007. 9. 30)에 적용하였다. 또한, 실제 하천의 형상과 함께 SWAT 모형의 입력 자료로서 DEM(Digital Elevation Model), 토지이용도(Land Use Map), 토양도(Soil Type Map)등의 지형자료를 구축하였다.

2) 4개 유역을 건천·상시하천 유역으로 구분하여 모형의 수문학적 매개변수 중 유출에 관련된 매개변수를 추정하여 민감도 분석을 실시한 결과 건천 유역에서 직접 유출량에 가장 많은 영향을 미치는 매개변수는 CN2로 나타났다. 상시하천 유역 또한 건천 유역과 마찬가지로 방법으로 직접유출량과 총 유출량의 민감도 분석을 실시한 결과 총 유출량에 영향을 미치는 매개변수로는 CN2, SOL_AWC, ESCO 등이 있으며, 직접유출량에 가장 많은 영향을 미치는 매개변수는 CN2였다.

3) 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 직접 유출율(%)과 비교·검정한 결과 적용기간의 평균 직접 유출율은 22%정도로 기존의 표선유역 평균 유출률(22%)과 비슷한 값을 보였다.

5) 외도천 유역은 평상시 하류지점에서 0.084m 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, RMSE는 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-유량곡선을 통하여 정확한 보정·검정을 통하여 산정하여야만 한다.

6) 용포천 유역은 2002~2003년 비 홍수시 유출량 자료를 이용하여 모형을 보정·검정한 결과 상관계수 R^2 0.86, 평균제곱근오차(RMSE)는 0.62로 나타났다. 그러나 관측 값의 대부분이 1~4mm의 기저유출량이기 때문에 모형효율성계수(ME) 0.56으로서 값은 작게 나타났다.

7) 연외천 유역은 2003년 유출량 자료를 이용하여 모형을 보정·검정한 결과 상관계수 R^2 0.85, 평균제곱근오차(RMSE)는 0.99로 나타났다. 1~10mm 내외의 관측값을 이용하여 검정하였으며 모형 효율성계수(ME)는 0.83 으로 나타났다.

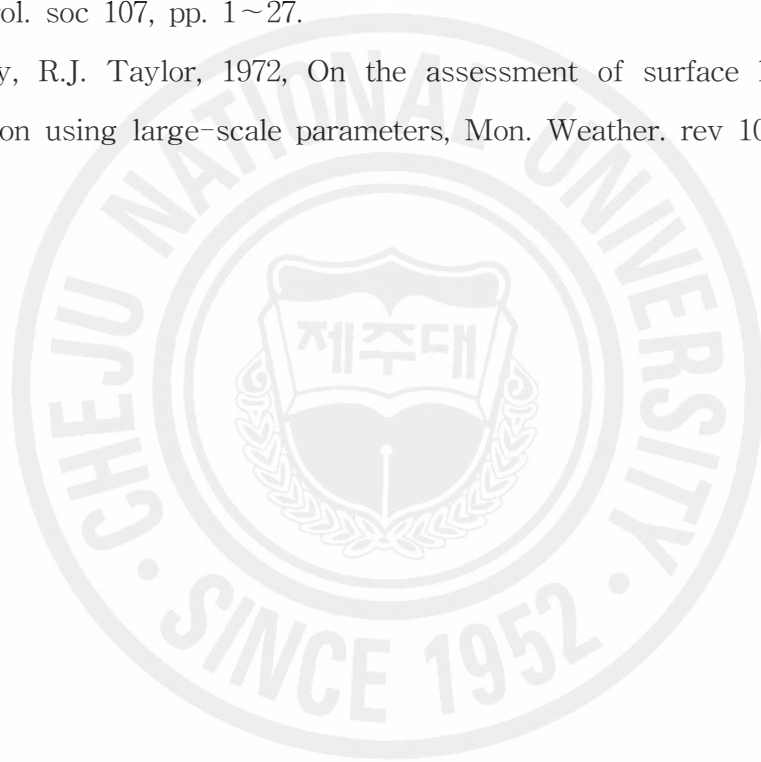
이상의 결과들로부터 제주도 유역에 4개 유역(천미천, 외도천, 용포천, 연외천)에 대하여 장기 유출량을 산정한 결과 SWAT 모형은 장기 일 유출량 모의에 대하여 전체적으로 우수한 결과를 보이고 있다. 향후 많은 보다 많은 유출량 자료를 확보하여 본 연구의 결과와 비교·검정하여 SWAT 모형을 구축한다면 제주도 하천의 장기 일 유출량 모의를 할 수 있을 것이라 판단된다. 또한 SWAT 모형을 바탕으로 SWAT-MODFOLW 지표수-지하수 통합모형, 유사량 산정 모형 등의 연구를 진행할 수 있을 것이다. 이와 같은 연구수행은 제주도 유역 전반의 통합관리 측면에서 뛰어난 적용성과 폭넓은 활용 및 우수한 연구결과를 도출할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 신문주, 2006, SWAT 모형을 이용한 안양천 유역의 유량확보와 수질개선에 대한 방안, 서울대학교 대학원 석사학위논문. pp. 6~13. pp. 13~17.
- 장대원, 2004, GIS 기반의 SWAT 모형을 이용한 하천 유출량 모의, 인하대학교 대학원 석사학위 논문. pp. 50~63.
- 양성기, 2007, 지구의 수권과학, 구미서관, pp. 177~288.
- 한국건설기술연구원, 2006, 제1회 SWAT-KOREA 컨퍼런스.
- 김남원, 원유승, 정일문, 2004, 완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형 (1) 모형의 개발, 2004년도 한국수자원학회논문집 Vol. 37 No.6, pp. 499~507.
- 김남원, 원유승, 2004, SWAT-SWWM 결합모형의 개발, 2004 한국수자원학회논문집 Vol. 37 No. 7, pp. 589~598.
- 강동균, 2005, 소양강댐 상류 내린천 유역에서 SWAT을 이용한 BMP의 유사발생 저감 효과의 분석, 강원대학교 대학원 석사학위논문, pp. 20~25.
- 문덕철, 2004, 제주도 주요하천의 기저유출량 산정에 관한 연구, 제주대학교 대학원 석사학위논문, pp. 1~5.
- 고기원, 박원배, 2004, 제주도의 빗물이용 활성화를 위한 정책 및 제도, 제4회 빗물모의기 국제워크샵 발표자료집, pp. 49~50.
- 제주도·한국수자원 공사, 2003, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사Ⅲ, pp. 18~28.
- 오영진, 2007, 제주도 빗물의 수자원 활용화 방안에 관한 연구, 제주대학교 대학원 석사학위논문, pp. 4~5.
- 제주도, 2002, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사 Ⅱ, pp. 182~251.
- 한국건설기술연구원, 2004, 지표수 수문성분 해석기술 개발에 관한 연구, 과학기술부, pp. 64~85.
- 장철희, 김현준, 2004, 한국수자원학회 04 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 1~5.
- 김남원, 이정은, 2005, 한국수자원학회 05 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 1~4.

- 김남원, 신성철, 김철겸, 2003, SWAT 모형의 매개변수 민감도 분석, 대한토목학회 정기학술발표회, pp. 1~5.
- 윤용남, 1998, 공업수문학, 청문각
- 변창구, 양성기, 1999, 제주도 수자원의 효율적인 이용방안 연구, 제주대학교 대학원 석사학위논문, pp. 165~170.
- 김지훈, 1998, 지리정보시스템을 이용한 SWAT/GRASS 모형의 적용, 서울대학교 대학원 석사학위논문, pp. 47~56.
- 권명준, 2000, 농촌유역 하천의 수질예측을 위한 SWAT 모형과 WASP 모형의 연계운영, 서울대학교 석사학위논문, pp. 20~35.
- 엄명진, 조원철, 임해욱, 2007, 지속시간 및 표고에 따른 강우량 보정에 관한 연구, 2007 수자원학회 논문집, pp. 511~521.
- 허성구, 임경재, 2006, GIS 기반의 모형을 이용한 도암댐 유역의 산림 파편화에 따른 수환경 영향 평가, 한국지리정보학회지 9권, pp. 85~90.
- 김정근, 손경호, 2006, SWAT 모델을 이용한 갑천 유역 물수지 분석 및 도시화 영향 평가, 2006 수자원학회, pp. 130~134.
- 김미령, 2003, 제주도 하천의 하계망 분석, 제주대학교 교육대학원 석사학위논문, pp. 15~19.
- 건설기술연구원, 2002, 장기 강우-유출모형 구조비교, 수자원의 지속적확보개발기술 사업, pp. 85~96.
- 김경탁, 2003, 정밀토양도에 이용한 CN 산정에 대한 제안, 한국수자원학회지 제 36권 4호, pp. 45~53.
- 김학관, 김상민, 박승우, SWAT과 HSPF 모형을 이용한 유출특성 비교분석, 2004년도 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp.169~173.
- K. Eckhardt, J. G. Arnold, 2001, Automatic calibration of a distributed catchment model, J. Hydrol. 251, pp. 103~109.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V., 1970, River flow forecasting through conceptual models. Part 1-A discussion of principles. J. Hydrol.,10, 282~290.
- M. Diluzio, R. Srinivasan, J.G. Arnold, 2001, Arcview Interface for SWAT2000, USDA ARS, Temple, Texas.
- S.L Neitsch, J.G. Arnold, J.R. Williams, 2001, Soil and Water Assessment Tool,

- User's Manual Version 2000, USDA ARS, Temple, Texas.
- S.L Neitsch, J.G. Arnold, J.R. Williams, 2001, Soil and Water Assessment Tool, Theoretical Documentation Version 2000, USDA ARS, Temple, Texas.
- J.G. Arnold, P.M. Allen, 1996, Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds, *J. Hydrol.* 176, pp. 57~77.
- G.H. Hargreaves, Z.A. Samani, 1985, Reference crop evapotranspiration from temperature, *Applied Engineering in Agriculture* 1, pp. 96~99.
- J.L. Monteith, 1981, Evaporation and surface temperature, *Quart. J. Roy. Meteorol. soc* 107, pp. 1~27.
- C.H. Priestley, R.J. Taylor, 1972, On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters, *Mon. Weather. rev* 100, pp. 81~92.



감사의글

2년여의 시간동안 저의 학업과 연구에 많은 도움을 주신 분들이 계십니다. 이 자리를 빌어서 그분들께 진심으로 감사하다는 말을 남기고 싶습니다.

먼저 이 논문이 완성되기까지 학부과정과 대학원과정을 거쳐 오면서 많은 가르침을 주시고, 끊임없는 격려와 조언을 아끼지 않으셨던 양성기 교수님에게 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 바쁘신 와중에도 논문심사를 맡아 세심하게 검토하여주신 박상렬교수님, 이동욱교수님에게도 감사의 말씀을 드립니다. 아울러, 학부시절에서부터 대학원과정까지 많은 가르침을 주신 김남형교수님, 남정만교수님, 이병걸교수님, 김상진교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

연구실생활을 함에 있어 함께 생활하지는 않았지만 많은 부분에서 도움이 되어주고 조언을 해주었던 건이형, 덕철이형 에게 고마움을 전하고 싶고, 처음 연구실에 들어와서 논문을 완성하는 그 순간까지 함께 생활하며 많은 조언을 해주시고 힘들어서 도망치려할 때에도 다시 연구에 집중할수 있도록 위로를 해주신 태혁이형에게는 정말 진심어린 고마움을 전하고 싶습니다. 그리고 연구실 생활 내내 동고동락하며 기쁠때나 힘들때나 저와 함께해주었던 대학원동기이자 절친한 친구인 상봉이에게 진심으로 감사와 축하를 함께 보내고, 연구실에서 함께 고생하고 함께 기뻐해주었던 승호에게도 감사의 말을 전합니다. 또한 연구실에서 잡다한 일을 다 맡아서 고생한 현탁, 기석, 승환과 지금은 졸업했지만 많은 일을 했던 호성, 성운, 안수에게도 고맙다는 말을 전하고 어릴적부터 지금 연구실에서까지 내게는 큰 힘이 되어주고 항상 내편에서서 나를 응원해주고 믿어주는 사랑하는 친구 옹규에게는 언제나 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

모델링이라는 분야를 공부하며 기초부터 착실히 많은 가르침과 조언을 해주신 한국건설기술연구원의 김남원 박사님, 정일문 박사님, 이정우 박사님에게도 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 모델링을 공부하며 작은부분까지 세심히 지켜봐주신 장철희, 이정은, 이병주 선생님들에게도 감사의 말씀을 드리고 공부하는 기간동안 항상 많은 웃음으로 저를 위로해준 소혜란, 이지은 누나에게도 감사의 말을 전합니다. 제주도 수자원분야를 공부하며 신입생때부터 차근차근 많은 부분을 가르쳐 주신 한국농촌공사의 안중기 박사님과 자주 못 뵙지만 항상 뜻깊은 조언을 해주시는 박원배 박사님께 감사의 말을 전합니다. 또한 여러분야에 걸쳐서 많은 도움을 주신 물사랑회 회원님들에게도 감사의 말을 전하고, 많은 부분에서 걸쳐 조언을 아끼지 않으셨던 제주수자원본부 이병철 형님에게고 정말 감사하다는 말을 전하고 싶습니다.

학부과정에서부터 대학원과정까지 함께 지내온 승현형, 행식형, 도형형, 성룡, 향혜, 지원

에게도 감사와 축하의 말을 전하고, 변변치 않은 형을 항상 잘 따라주고 도와준 경남, 성협, 근혁, 경태와 제 장난도 잘 넘겨주고 웃어주는 종완형 에게도 진심으로 감사의 말을 전합니다. 이번에 새로히 대학원 생활을 시작하게 된 경덕, 태진, 영민, 창선, 현철, 창립, 승현, 정우에게도 열심히 하라는 말을 전하고 싶습니다. 또한 토목기사 수업을 받으면서 알게된 인연으로 지금은 누구보다도 많은 힘이 되어주시고 조언을 해주시는 길용형님에게도 진심으로 감사의 말을 전하고 싶습니다.

항상 힘든일도 자기일처럼 나서서 도와주는 고마운 친구 현구, 상훈이에게도 진심으로 감사의 말을 전하고, 바빠서 자주 보지는 못하지만 언제나 제 힘이 되어주는 석현, 은상, 은호, 일준, 건용, 동윤, 태중, 행진, 호진이게도 고마움을 전합니다. 그리고 99년도에 입학하면서부터 지금까지 항상 밝은 웃음으로 나를 대해주는 사랑스런 친구들 미화, 경남, 승희, 하영, 옥경, 승환, 태훈, 만규, 우석, 동호, 명훈, 현국, 홍석, 기혁, 정훈에게도 고마움을 전하고 싶고, 학부과정동안 같이 웃으면서 학교생활을 함께 했던 진호형, 희민형, 무철형, 성진형, 희철, 행남, 채윤, 형석, 두성, 지훈에게도 감사의 말을 전합니다. 또한 항상 친구처럼 많은 도움이 되어주고 많은것을 챙겨준 미성이에게도 고맙다는 말을 하고 싶습니다.

석사논문을 완성하기까지 정말 많은 분들이 저에게 도움을 주셨습니다. 하지만 가장 먼저 지금의 나를 있게 해주고 언제나 작은 아들을 믿고 힘이 되어주신 너무나도 사랑하는 아버지, 어머님에게는 감사한다는 말과 함께 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 세상 누구보다도 무섭지만 너무나 사랑하는 우리 형, 형수님과 항상 동생일이라면 함께 고민해주고 웃어주는 누나, 매형에게도 고맙고 사랑한다는 말을 전합니다. 항상 지쳐있는 삼촌을 웃게해주는 우리 연재, 현지, 현승과 태어날 조카들에게 이쁘게 잘크라고 말하고 싶고, 항상 바빠서 섭섭하게도 많이 하였고 가슴아프게도 많이 하였지만 항상 맘속깊이 든든한 힘이 되어준 그사람에게도 고마움과 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다. 앞으로 이 모든 분들의 기대와 사랑을 저버리지 않고 더욱더 열심히 하는 사람이 되겠습니다.

너무나 감사합니다.

2008년 1월..

정 우 열 올림