

碩士學位論文

SWAT 모형을 이용한 토지이용  
변화에 따른 유출량 모의

The background features a large, light-colored watermark of the Jeju National University logo. The logo consists of a stylized flame or leaf shape in blue, green, and grey, with a purple 'U' shape to its right. The text 'JEJU NATIONAL UNIVERSITY 1952' is written in a circular path around the logo, and 'JEJU' is written below the flame. The Korean text '제주대학교' is also visible at the bottom of the watermark.

濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

韓 雄 圭

2009

SWAT 模型을 利用한  
土地利用變化에 따른 流出量 模擬

指導教授 楊 城 基


韓 雄 圭

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2009年 2月


韓雄圭의 工學 碩士學位 論文으로 認准함

審査委員長

김 상 진 


委

員

양 성 기 

委

員

이 등 우 

濟州大學校 大學院

2009年 2月

# A runoff simulation using SWAT model depending on changes to land use

Ung-Gyu Han

(Supervised by Professor Sung-Kee Yang)

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

2009.

This thesis has been examined and approved.

Department of Civil & Ocean Engineering

GRADUATE SCHOOL

CHEJU NATIONAL UNIVERSIT

# 碩士學位論文

## 目 次

目 次 .....	i
LIST OF TABLES .....	iii
LIST OF FIGURES .....	v
Summary	
I. 서 론 .....	1
1. 연구의 배경 .....	1
2. 연구의 목적 .....	2
3. 연구의 방법 .....	3
II. 제주도의 수자원현황 .....	4
1. 우리나라의 수자원현황 .....	4
2. 제주도의 수자원현황 .....	5
3. 우리나라와 제주도의 수자원현황 비교 .....	6
III. SWAT 모형의 이론적 배경 .....	8
1. 강우-유출 모형 .....	8
2. 도시지역 장기유출 모형 .....	10
3. SWAT 모형의 이론적 배경 .....	13
2.1 SWAT 모형의 개요 .....	13
2.2 SWAT 모형의 구조 .....	13
2.3 기상 .....	15
2.4 수문 .....	16
2.5 추적 .....	26
3. SWAT 모형의 연구동향 .....	28
IV. 연구대상 유역 .....	31

1. 연구대상 유역 .....	31
2. 연구대상유역의 입체적 특성 .....	32
2.1 표고분석 .....	32
2.2 경사분석 .....	33
2.3 경사향분석 .....	34
2.4 음영기복분석 .....	35
V. SWAT 모형의 입력자료 구축 및 분석 .....	36
1. 대상유역의 수문·기상자료 .....	36
1.1 기상자료 분석 .....	36
1.2 강우자료 분석 .....	37
2. 대상유역의 GIS자료 구축 .....	39
2.1 DEM(수치고도자료) 구축 .....	39
2.2 토지피복도(Landuse map) .....	41
2.3 토양도(Soiltype map) .....	42
VI. 하천유출량변화 모의 적용 및 결과 .....	44
1. 매개변수 민감도 분석 .....	44
1.1 매개변수 추정 .....	44
1.2 민감도 분석 .....	46
1.3 목적함수 .....	48
2. 모형의 보정 및 적용 .....	50
2.1 실측치를 이용한 유출량 보정 .....	50
2.2 과거의 유출량 산정 .....	53
3. 토지이용에 따른 직접유출량 비교 .....	54
3.1 과거와 현재의 직접유출을 비교 .....	54
3.2 과거와 현재의 유출분포 비교 .....	55
3.3 과거와 현재의 유출분석 .....	55
3.4 과거와 현재의 유황분석 .....	55
VI. 결 론 .....	56

## List of Figures

Fig. I -1 Flow chart of the study contents .....	3
Fig. II -1 South Korea of water resources .....	5
Fig. II -2 Jeju Island of water resources .....	6
Fig. II -3 South Korea(a)and Jeju Island(b) of water resources (Yang, 2007) .....	7
Fig. III-1 Floodgate circulation about the part of land (Arnold, 2000) .....	14
Fig. III-2 Oppressed/not-oppressed Aquifer(Dingmann 1994) .....	24
Fig. IV-1 Basin for the study .....	31
Fig. IV-2 Altitude analysis map of the basins to be studied .....	32
Fig. IV-3 Slope analysis map of the basins to be studied .....	33
Fig. IV-4 Slope direction analysis map of the basins to be studied .....	34
Fig. IV-5 Shaded relief map of the basins to be studied .....	35
Fig. V -1 Precipitation by month and by precipitation observatory of Oaedo watershed basin .....	39
Fig. V -2 DEM of the basin to be studied .....	40
Fig. V -3 Land-cover map of basin to be studied .....	41
Fig. V -4 Soil map of basin to be studied .....	42
Fig. VI-1 Rate of change of direct runoff according to the rate of parameter at the basin of direct runoff .....	47
Fig. VI-2 Rate of change of direct runoff according to the rate of parameter at the basin of direct runoff .....	48
Fig. VI-3 Result of correcting the model of the basin of Oaedo watershed .....	51
Fig. VI-4 Result of the present runoff simulation of the basin of Oaedo watershed (date) .....	52
Fig. VI-5 Result of the present runoff simulation of the basin of Oaedo watershed (year) .....	52
Fig. VI-6 Result of the past runoff simulation of the basin of Oaedo watershed (year) .....	53

Fig. VI-7 Result of the past runoff simulation of the basin of Oaedo watershed  
 (year) ..... 54

Fig. VI-8 discharge-duration curve ..... 56



## List of Tables

Table II-1 South Korea and Jeju Island comparison of the water resources (Yang, 2007) .....	7
Table III-1 Classification of model according to hydrological process (Singh, 1995) .....	9
Table III-2 Classification of soil group in SCS runoff curve method .....	17
Table III-3 Runoff curve index of natural region, CN (AMC-II, $I_a = 0.2S$ ) .....	18
Table III-4 Input data according to PET calculating method .....	21
Table IV-1 Altitude Analysis chart of the basins to be studied .....	33
Table IV-2 Slope analysis chart of the basins to be studied .....	34
Table IV-3 Area ratio by slope direction .....	35
Table V-1 Weather input data of the basin to be studied .....	36
Table V-2 Status of meteorological post of the basins to be studied .....	37
Table V-3 Weather data by month of Jeju meteorological post .....	37
Table V-4 The status of rainfall observatory at the basins to be studied .....	38
Table V-5 Rainfall data by month of rainfall observatory at the basin of Oaedo watershed (2000~2007, for 8 years) .....	38
Table V-6 Result of altitude analysis at the basin of Oaedo watershed .....	40
Table V-7 Ground coverage state at the basin of Oaedo watershed .....	42
Table V-8 Rate and dimension by soil series at the basin of Oaedo watershed .....	43
Table VI-1 Parameter in SWAT model .....	45
Table VI-2 Value for analyzing the sensitiveness of hydrological parameters related to runoff .....	46
Table VI-3 Rate of change of direct runoff according to the rate of parameter at the basin of direct runoff .....	46
Table VI-4 Rate of change of total runoff according to the rate of parameter at the basin of direct runoff .....	48



Table VI-5 Corrected parameter of the basin of Oaedo watershed .....	51
Table VI-6 Each year the result of direct runoff simulation of the basin of Oaedo watershed(the present) .....	53
Table VI-7 Each year the result of direct runoff simulation of the basin of Oaedo watershed(the past) .....	54
Table VI-8 The past and the present comparison of direct runoff .....	55



## Summary

In an attempt to simulate the direct runoff depending on changes to the covering in the past and at present resulting from development of tourist complex and housing site, cultivation of farmland and construction of impermeable layer of road, A SWAT model, which is the semi-distributed runoff model, was applied to Oaedo watershed, a local watershed running in the north of Jeju Island in this study. In case of hydrometeorological data, the input data for SWAT model, high & low temperature, radiant quantities, wind velocity and humidity were applied after classifying them into the past (1975. 1. 1~1982. 1. 1) and present (2000. 1. 1~2007. 12. 31) data, and DEM (Digital Elevation Model) and Soil Type Map data were collected and applied. And in a bid to simulate the variation of direct runoff depending on changes to the covering, the past data (1975 Landsat satellite data) and current data (2000 Landsat satellite data) were adopted, respectively.

As a result of correction using the runoff data obtained from rainfall over 7 occasions in 2007,  $R^2$  was 0.93 and RMSE was 14.92, ME 0.70. and the direct runoff rate calculated using current data was estimated at 15~32%(22% on average), while the rate calculated using past data was 10~24%( 14% on average)

In the wake of estimating the runoff estimated using the past and current data depending on changes to the covering, impermeable land was increased double due to development at the downwatershed area of Wedocheon watershed, along with the increase in direct runoff by 8%.

As a result of simulating the daily runoff for 8 years by applying the outcome above to Oaedo watershed, a local watershed running in the north of Jeju Island, it demonstrated the good performance in general to the runoff. And more accurate estimate of runoff is expected when more sufficient runoff data is secured in addition to this study. And as part of the effort to reduce the disaster, it seems to be necessary to evaluate the effect of runoff which results from the hydrometeorological changes in the wake of urban development in a way of applying such elements as topographic features that might be affected by urban development and various land use.

# I. 서론

## 1. 연구의 배경

제주도는 연평균 강우량이 1,975mm에 달하는 우리나라 최대의 다우지역이지만 투수성이 좋은 다공질 화산암류 및 화산회토로 이루어져 있어 총 강우량의 48.5%에 이르는 빗물이 지하로 침투하여 대부분의 하천들이 건천을 이루고 있다(양, 2007). 지표수의 발달이 빈약한 연유로 인하여 제주도민의 수자원을 전적으로 지하수에 의존하고 있으나 지하수의 과다한 개발·이용으로 인한 향후 지하수 함양량 감소를 사전에 방지하고 능동적으로 대처하기 위하여 지표수자원 개발이 필요하다.

급격한 산업화와 인구집중으로 인하여 도시화 현상이 영향으로 토지이용상태가 매우 급격하게 변화되었고, 이러한 도시구역의 토지이용상태 변화는 하천의 유출에 직접적인 영향을 미치게 되었다. 특히 도시화에 따라 불투수층 면적이 증가되는 경우 도시화 이전보다 홍수도달시간은 현저히 감소되고 침투유량은 증가되었다.

도시화에 따른 수문현상 및 물 순환체계에 의하여 우수의 불투수지역 확대, 하천 부지의 축소, 산림 및 우수지의 감소 등이 급속히 진행되어 하천유량의 변화와 지하수위의 저하 등 많은 문제점을 야기시키고 있다. 또한, 도시하천 유역에 있어서 하천 유량은 강수의 우수에 의한 유출 성분뿐만 아니라 각종의 용·배수에 의한 인공적인 영향을 크게 받는다.

유역의 토지이용 변화나 하천, 하수도 등의 정비상태에 따라 하천에의 유량이나 지하수위를 시작으로 유역의 수환경이 크게 변화한다. 이처럼 자연적인 요소와 인공적인 요소가 복잡하게 조합되어있는 도시지역의 물 순환을 파악하기 위해서는 모델링이 필수적이다

따라서 현재로서 토지이용 변화에 따른 하천유역의 유출량을 산정하기 위해서는 과거와 현재 각각의 토지이용에 따른 유출량 산출하기 위한 수문모델을 적용시키는 연구가 필요하다.

## 2. 연구의 목적

제주도는 국제자유도시 건설로 급속한 지역발전과 고도성장으로 인하여 유일한 수자원인 지하수에만 의존하고 있는 실정이다. 정밀수문자료의 체계적인 확보, 전 유역에 걸친 정밀한 수문모델의 구축, 지표수 자원의 이용방안 등에 관한 연구·조사를 하여 체계적으로 보전 관리를 계획적이고 합리적인 개발과 이용을 통해 제주도의 안정용수 공급이 필요하다. 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 제주도 하천에 대한 유량관측과 수문모델을 적용하여 유출량을 산정하는 연구는 거의 없는 편이다. 다만, 장기간에 걸친 제주도 하천유출량 모의에 대한 연구(정과 양, 2008)는 발표된 바 있다.

본 연구에서는 장기 강우-유출 모델(continuous rainfall-runoff model)인 SWAT 모델을 적용하여 관광단지의 개발, 농경지 개간, 택지개발 및 불투수층 도로의 개설 등으로 인한 토지이용변화에 따른 도시화로 인한 유역내의 직접유출량을 산정하고자 한다.

연구 대상 유역을 정하고 대상 유역의 SWAT 모델의 입력자료인 기상자료(Precipitation, Solar Radiation, Wind Speed, Climate, Humidity)와 지형자료(DEM, Land Use, Soil Type)를 구축하고 도시화에 따른 과거와 현재의 정확한 유출량의 변화량을 산정하여 비교하고자 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 수자원 계획에 반영할 수 있는 토대를 마련하여 도시화에 따른 도시 배수시스템 재정비, 우수관거 신설 등 해당유역의 하천정비계획 및 재해방지대책수립에 기초자료로 활용되고자 한다.

## 3. 연구방법

도시화에 따른 과거와 현재에 대한 토지이용변화에 따른 유출량을 비교하기 위하

여 제주도 여러 하천 중에서 제주도 북부지역의 외도천을 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 과거와 현재로 구분하여 구축하였다. 입력자료를 대상유역에 맞추어 구축함과 동시에 모델의 보정 및 검증을 위하여 외도천유역의 실측 유출자료를 수집하여 정리하였다.

모델의 입력자료를 구축하고 SWAT 모델을 이용하여 외도천유역을 정하여 유출 모의를 하였다. 유출에 관련된 모형의 매개변수들의 민감도 분석을 하였으며, 민감도 분석 결과를 바탕으로 현재의 유출량에 대하여 보정·검정 작업을 수행하였다. 또한 현재의 유출량 보정을 통하여 산정된 매개변수를 과거에 적용하여 과거와 현재의 외도천 유출모의 결과를 비교·분석하였으며, 향후 제주도의 연구결과 활용방안에 대하여 검토하였다. 연구내용의 흐름도는 Fig. I-1과 같다.

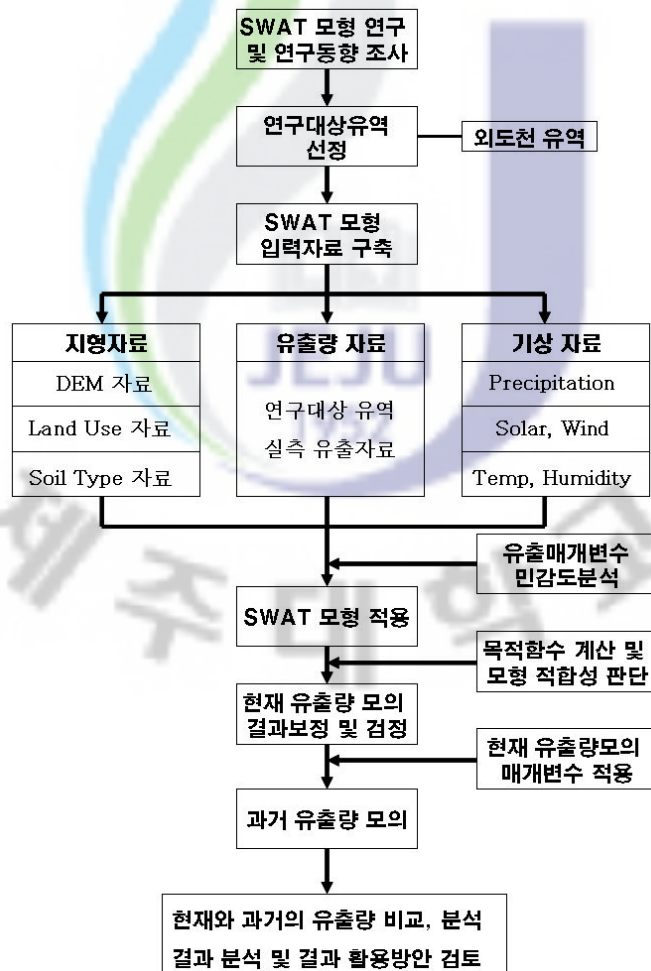


Fig. I-1 Flow chart of the study contents

## II. 제주도의 수자원 현황

### 1. 우리나라의 수자원현황

우리나라는 일본이나 중국과 함께 아시아 몬순지대에 위치하기 때문에 연평균 강우량은 세계 평균의 약 1.3배가 되는 1,283mm로서 비교적 많은 강우의 혜택을 입고 있다. 그러나 인구의 과밀로 1인당 연평균강우량은 세계평균의 9%에 불과하다.

도시 내에서 이용 가능한 수자원의 부족현상이 심해지고 세계적으로 수자원고갈이 문제점으로 대두되고 있는 상황이다. 수자원의 확보와 용수의 안정적인 공급은 세계 각 국의 지속적인 발전을 위한 필수 불가결한 요건이다. 상수원을 확보하고 위생적인 음용수 및 각종 용수를 생산하고 필요한 지역까지 공급하는 관로시스템을 설치하기 위해서는 엄청난 재정과 시간이 필요하다. 따라서 부족한 물을 충당하기 위해서는 새로운 대체수자원을 확보하여야 한다(오, 2007).

지난 93년 UN의 국제인구행동연구소보고서에 의하면, 우리나라는 물 부족국가군으로 분류되었다. 또한 건설교통부의 수자원장기종합계획에 따르면 우리나라는 2006년부터 연간 4억 톤, 2011년부터는 연간 20억 톤의 수자원이 더 필요한 것으로 보고되고 있다(한국수자원공사, 2003).

실질적으로 이용가능한 수자원을 의미하는 재생가능한 수자원은 연간 731억 $m^3$ 이며 인구 1인당 1.550 $m^3$ 에 해당되는 양으로 국토의 용량에 비하여 지하수를 비교적 과다하게 사용하는 영국, 벨기에 등과 함께 물 부족 국가로 분류되어지고 있다.

지하수는 순환이 가능하고 시간이 지나도 재사용할 수 있는 특성을 가진 자원이지만, 국토면적이 70%가 지면경사 20%이상으로서 일단 비가 내리면 단시간 내에 하천으로 흘러가게 되고, 또한 여름철 강수량의 집중으로 인한 큰 계절별 하천의 유량변동이 매우 심하여 연간 731억 $m^3$ 의 수자원 부존량을 보유하고 있음에도 불구하고 연중수자원총량 1,276억톤 중에 545억톤은 증발산에 의한 손실되고 493억톤이 홍수로 유출되어 바다로 유입되며, 33%인 238억 $m^3$ 만 홍수기가 아닌 평상시에 유출되므로, 전체의 약 26%인 331억톤을 이용 중에 있어 과도하게 사용할 경우 지하수의 고갈 및 오염으로 인한 영향이 우려되므로 합리적인 관리가 필요하다(한국수자원공사, 2004). Fig. II-1은 우리나라의 수자원 현황에 대하여 나타내었다.

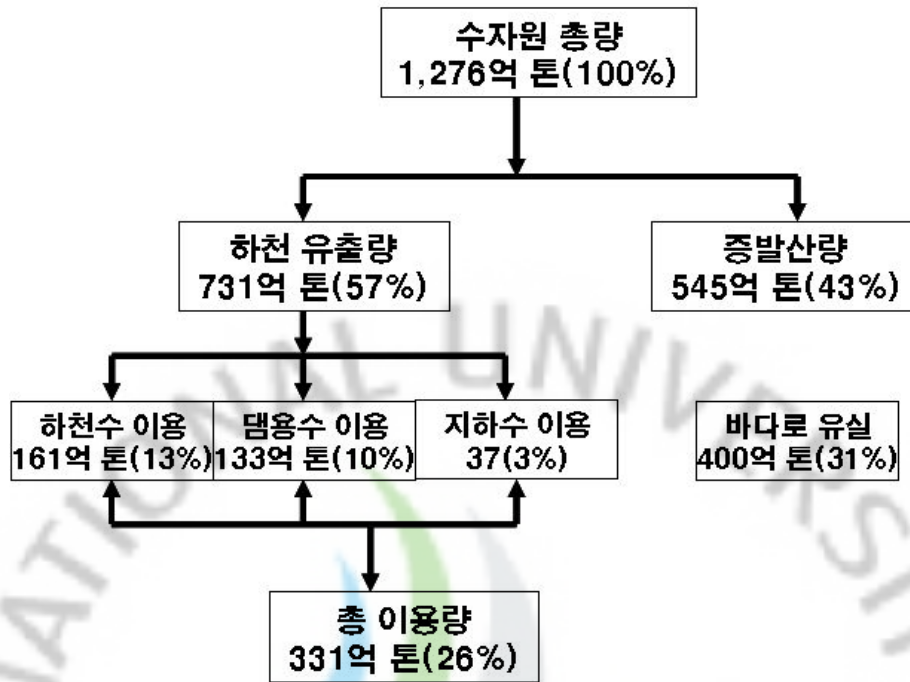


Fig. II-1 South Korea of water resources

## 2. 제주도의 수자원 현황

제주도는 국내 최대의 화산섬으로서 투수성이 높은 다공질 현무암으로 구성된 관 계로 다우지역임에도 불구하고 지표수의 발달은 미약하나 지하수는 풍부하다. 지하수는 지표수와 달리 고갈되거나 한번 오염되면 원상회복이 거의 불가능하거나 복구에 장기간의 시일과 막대한 비용이 소모된다. 지하수 부존특성과 이용실태를 고려하여 보전·관리를 원칙으로 하고 지표수원이 없는 경우와 비상급수 등 반드시 필요한 경우에 제한적으로 개발·이용하는 등 합리적·과학적인 개발로 활용화 되어야 한다. 토지이용에 따른 지하수 함양량 변화의 경우, 2002년 기준으로 볼 때 도내 연간 수문총량 36억900만 $m^3$ (연평균 강우량 1,975mm)가운데 지하수 함양량은 45.8%인 16억5300만 $m^3$ 이며, 증발산량은 12억1600만 $m^3$ 으로 33.7%이다. 반면, 직접유출량은 91년 6억7700만 $m^3$ 에서 2003년에는 7억4000만 $m^3$ 톤으로 늘어났으며 수문총량의 20.5%이다(제주도, 2005). Fig. II-2는 제주도의 수자원 현황에 대하여 나타내었다.

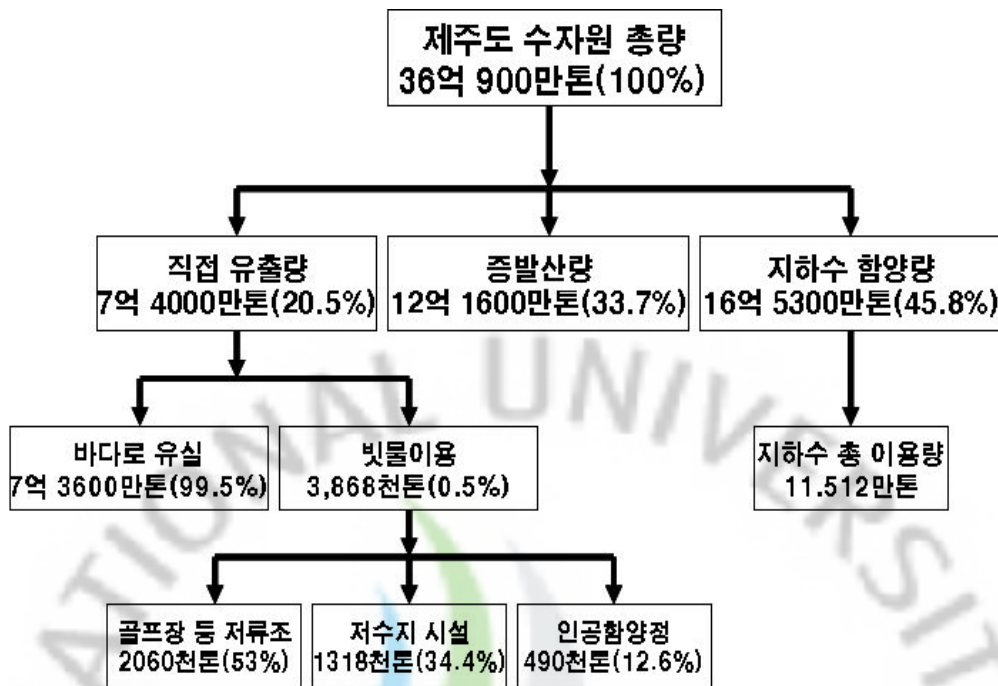


Fig. II-2 Jeju Island of water resources

제주도 지하수 이용량 분석 결과, 연간 총 11,512만 $m^3$ (일평균 32만 $m^3$ , 일 최대 124만 $m^3$ )의 지하수를 사용하는 것으로 분석되었다(제주도, 2003). 농업용 지하수는 총 3,166공을 대상으로 일 최대 이용량은 약 56만 $m^3$ , 일평균 이용량은 약 8만2천 $m^3$ 으로 연간 약 3천만 $m^3$ 의 지하수를 사용하고 있으며, 공업용 지하수는 총 193공을 대상으로 일 최대 이용량은 약 10만 $m^3$ , 일평균 이용량은 약 1만2천 $m^3$ 으로서 약 4백만 $m^3$ 의 지하수를 이용하고 있다. 마지막으로 기타용 지하수는 총 40공으로 연간 약 61만 $m^3$ 의 지하수를 이용하고 있으며, 일 최대 이용량은 약 4천 $m^3$ , 일평균 이용량은 약 2천 $m^3$ 을 사용하고 있다

### 3. 우리나라와 제주도의 수자원현황 비교

우리나라와 제주도의 수자원 현황을 비교해 보면 Fig. II-3 과 같다. 연평균 강수량은 우리나라가 1,283mm 이고, 제주도는 1,975mm 로서 제주도가 1.5배가량 많으며, 수자원총량을 보면 제주도는 우리나라의 약 3% 정도의 수자원총량을 보유하고 있다. 하천으로 유출되는 하천 유출량의 경우 우리나라는 연간  $732 \times 108 m^3$  하천으로 유출되고 있으며 그중  $386 \times 108 m^3$  가 바다로 유실되어지고 있지만 제주도



의 경우 직접 하천을 통하여 유출되는 하천 유출량  $740 \times 10^6 \text{ m}^3$  중에서 0.5%를 제외한 모든 유출량이 바다로 유실되고 있다.. 우리나라의 수자원의 대부분은 하천으로 유출되는 하천유출량을 사용하지만 제주도는 수자원의 대부분을 지하수에 의존함을 알 수 있다.

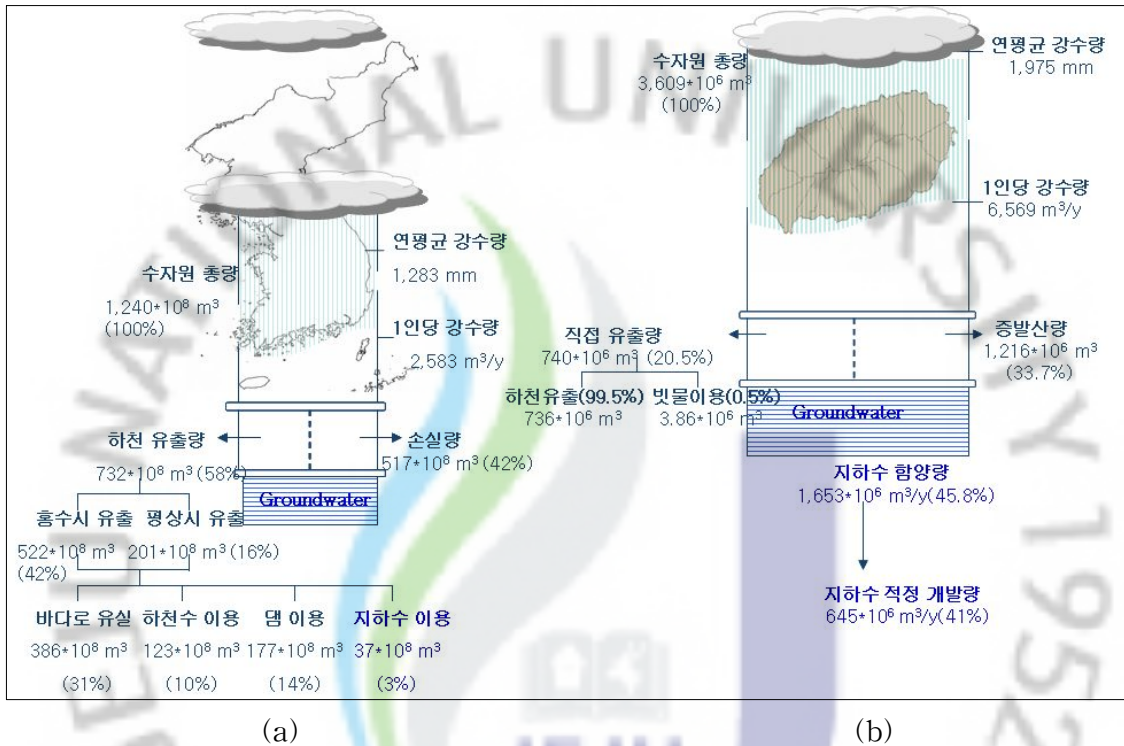


Fig. II-3 South Korea(a)and Jeju Island(b) of water resources (Yang, 2007)

Table II-1 South Korea and Jeju Island comparison of the water resources (Yang, 2007)

구분	우리나라	제주도
수자원 총량( $\text{m}^3$ )	$1240 \times 10^8$	$3,609 \times 10^6$
연평균 강수량(mm)	1,283	1,975
하천유출량 ( $\text{m}^3$ )	$732 \times 10^8$	$740 \times 10^6$
손실량 ( $\text{m}^3$ )	$517 \times 10^8$	$1,216 \times 10^6$
지하수 이용량 ( $\text{m}^3$ )	$37 \times 10^8$	$1.15 \times 10^4$

### 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 3.2 는 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 구분할 수 있다. 사상모형은 토양에 대한 침투능력이나 그 외의 수문학적 차단 능력이 건조 기간동안 달라지는 현상을 모의하지 못하는 반면 연속형 모형은 장기간에 걸친 호우와 건조기간에 대한 유출을 모의할 수 있다는 장점이 있다. Table III-1 은 사상모형과 연속모형의 구분에 따른 대표적인 강우-유출모형을 나타낸 것이다. 강우-유출 모형을 적용하는 유역의 공간적 크기에 따라 유역 면적이  $100\text{km}^2$  이내인 경우에는 소유역 모형,  $100\sim 1,000\text{ km}^2$ 에서는 중유역 모형,  $1,000\text{ km}^2$  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 Lumped 모형으로 계산하는 경우

이러한 강우-유출 모형에서는 합리식과 같은 간단한 모형으로부터 여러개의 매개변수를 처리해야 하는 복잡한 모형에 이르기까지 다양한 형태의 모형들이 개발되어 있으며, 기존의 대표적인 유출모형으로는 HEC-1 (Hydrologic Engineering Center, 1968), SSARR (watershedflow 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 모의 결과의 신뢰성 또한 높아 유역종합치수계획이나 하천정비기본계획의 홍수모의시 널리 사용되는 모형이다. 하지만 단기호우사상에 의한 유출모의의 적용성은 높지만

모의기간이 몇 년동안인 연속유출모형은 불가능하다. SSARR 모형은 모의시간단위가 0.1 시간에서 24시간까지 가능하며 연속유출모형으로서 하도유출모의 저수지모의가 가능하다. 하지만 SSARR 모형은 집중형 모형이서 모의결과의 정밀도가 분산형모형보다 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 도시구역에서의 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 InformationSystem)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. 하지만 모형의 한계로서 모형의 최소모의 시간단위가 일 (day)이기 때문에 홍수시 유출에 대한 유출량은 일 (day) 단위로 밖에 산정할 수 없다.

## 2. 도시지역 장기 유출모형

장기 유출모형은 인위적이거나 자연적인 유역내 다양한 토지이용과 변화를 고려하여 개개 수문성분량을 해석할 수 있어야 하며, 모의의 최소단위에 대한 물리적 특성을 모형에 고려할 수 있어야 한다. 이러한 관점에서 장기 유출모형은 집중형 모형보다 분포형 또는 준분포형 모형이 적절할 것으로 판단된다. 분포형 모형의 경우 모의 최소단위가 격자이며, 대표적인 모형으로 MIKE-SHE(MIKE SYstem

Hydrologique Europeen), AnnAGNPS(ANNualized AGRicultural Non-Point Source Pollution Modeling System),ANSWER2000(Areal Nonpoint Source Watershed Environmental Simulation 2000) 모형 등이 있다. MIKE-SHE 모형은 토양층을 중심으로 수문성분을 모의하는 물리적 기반의 이상적이 모형이지만, 입력자료의 구축이 용이하지 않아 적용이 어렵고, 고가인 단점이 있으며, AnnAGNPS와 ANSWER2000 모형은 최근에 개발되어 적용사례가 많지 않다. 준분포형 모형은 토양도, 토지이용도 등을 이용하여 소유역내 동일한 수문학적 응답단위군을 모의 최소단위로 이용하며, 이들로부터 개개 수문성분의 특성을 해석한다. 대표적 모형으로 HSPF(Hydrological Simulation Program-Fortan), PRMS(Precipitation-Runoff Modeling System), SWAT(soil and Water Assessment Tool), SLURP(Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes) 모형 등이 있는데, PRMS와 SWAT 모형에서는 모의의 최소단위를 HRU(Hydrological Response Unit)라 하고, SLURP에서는 ASA(Aggregated Simulation Area)라 한다. HSPF 모형의 경우 소유역보다 세밀한 모의 최소단위의 구분이 어려우며, SLURP 모형은 많은 적용사례가 있지만, 매개변수의 결정에 제한점이 있고, 비교적 대유역에 대한 적용에 유리하다. PRMS 모형은 미국 지질조사국의 대표적인 유역유출모형으로 USGS의 조사사업 및 연방정부나 주정부의 주요 수문관련 프로젝트에 이용되고 있다. Steuer와 Hunt(2001)는 USGS의 사업으로 수행된 도시화에 의한 수문학적 영향을 평가하기 위해 PRMS 모형을 적용하였고, 국내의 경우 유역조사사업의 일환으로 한강유역에 적용되고 있다.(과학기술부,2004). 그러나 이 모형은 소유역이나 HRU의 개수가 유출에 영향을 거의 주지 않아 준분포형 모형이라기보다는 집중형 모형에 가까운 단점이 있다.(과학기술부, 2004). 미국 농무성 산하 농업연구소 (ARS ,Agricultural Research Service)에서 개발한 SWAT 모형은 오염총량 평가에 활용되고, 미 환경청 (EPA, U.S Environmental Protection Agency)에서 수행하는 연구사업에 적용되고 있으며, 미국외의 지역에서도 활발히 이용되고 있다. 국내의 경우, 김남원과 원유승(2003)은 경안천 유역을 대상으로 도시화에 따른 수문학적 영향을 평가하였다.

도시지역이라는 특정 토지이용에 대한 장기 유출모형으로 STORM, ILLUDAS(ILLionois Urban Drainage Area Simulator), SWMM(Storm Water Management Model) 모형 등이 있는데 ILLUDAS와 SWMM 모형은 개발 당시 단

기의 사상성 모형이었으나, 장기 유출 모형으로 확장되었다. 미 공병단(USACE, U.S. Army Corps of Engineers)에 의해 개발된 STORM 모형은 삼각형 무차원 단위도를 이용하여 유출량을 산정하고, 기본 수질인자의 침전과 퇴적을 계산하나, 우수관거가 고려하지 못한다는 단점이 있다. ILLUDAS 모형은 불투수지역에 대해서는 Horton 방정식을 이용하여 지표면 유출량을 산정하나, 지하수 유출과 수질관련 모의를 할 수 없다는 단점이 있다. 세계적으로 도시지역의 장·단기 유출모형으로 가장 널리 이용되는 모형은 SWMM 모형(Storm Water Management Model, Huber와 Dickinson, 1998)이다. SWMM 모형은 도시지역에 대한 수량 및 수질 모의와 도시 우수시설 유출과정의 거의 모든 분야에서 이용가능한 장점이 있다. 반면 이 모형은 많은 입력자료가 요구되고, 특히 국내의 경우, 장기적인 자료의 구축이 어려우며, 주로 작은 도시 소유역에 적용되었고, 도시지역이외의 토지이용에 대한 영향을 적절히 고려할 수 없어 도시지역이라는 부분적인 토지이용에 제한되어 이용되어 왔다. 그러나 우리나라 대부분의 유역은 도시지역, 농업지역, 삼림지역 등 다양한 토지이용이 이루어지고 있으며, 이러한 복잡한 토지이용을 적절히 고려할 수 있는 모형이 필수적이다.

현재 유역의 토지이용변화로 인한 장기적인 유출특성을 규명하기 위해 비교적 손쉽게 이용할 수 있는 모형으로 SWAT 모형 (Soil and Water Assessment Tool, Anronld 등, 1993, 1995)이 대표적이며, 이모형은 부족한 가용자료로 과거·현재·미래의 장기유출 거동특성을 규명하고, 다양한 토지이용에 대해 유역규모의 장기적인 수문순환요소의 평가가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 더욱이 미계측 유역의 경우 유역과 여러 개의 소유역에서 유출상황을 재현할 수 있는 준분포형 유출모형으로 국내의 경우 적용성이 뛰어나다(장철희 등,2003; Kim 등, 2003). 또한 미국의 경우, 이 모형은 미농무성은 물론 환경청에서도 아주 유용한 모형으로 받아들여지고 있고, 현재 한국건설기술연구원에서 연구모형으로 이용되고 있으며, 그 신뢰성이 검토되고 있다. (과학기술부, 2004).

### 3. SWAT모형의 이론적 배경

#### 3.1 SWAT 모형의 개요

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.

#### 3.2 SWAT 모형의 구조

SWAT 모형을 이용하여 어떠한 문제를 연구하든지, 물수지는 유역내에서 발생하는 모든 상호작용 중에서 가장 중요하다. 물과 유사, 영양물질의 이동을 정확히 예측하기 위해서는 모형에 의해 모의되는 수문순환(hydrologic cycle)과정이 유역내에서 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

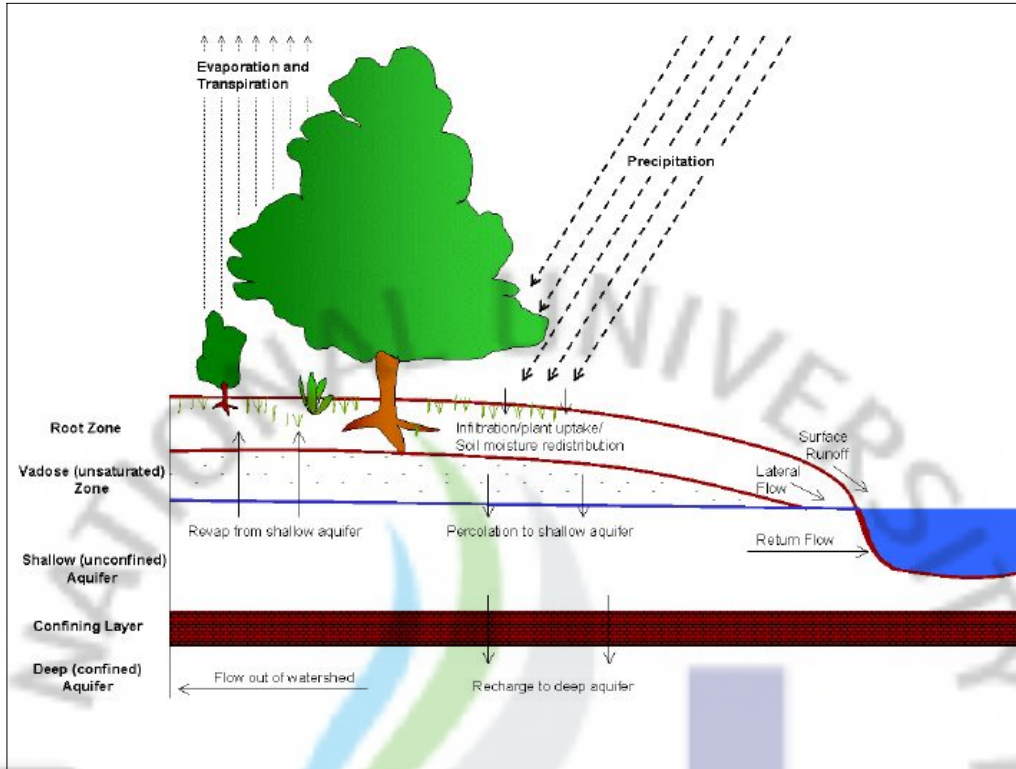


Fig. III-1 Floodgate circulation about the part of land (Arnold, 2000)

Fig. III-1 은 SWAT 모형의 수문순환의 토지부분(land phase of the hydrologic cycle)에 대한 각 구성 요소를 개략적으로 재현한 것이다. SWAT 모형에서는 토지부분의 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.

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

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.

## 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.

## 3.3 기상

유역의 기상(climate)은 물수지를 조절하고 수문순환의 여러 성분 중에 상대적으로 중요한 사항을 결정하는 수분 및 에너지를 제공한다. SWAT에서 필요한 기상 변수들은 일사량, 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 모형내 과정에 중요한 영향을 미친다. 증발이 유역내 물의 중요한 전이 요소이기 때문에 물수지를 정확히 모의하는데 있어서 에너지의 유입은 매우 중요한 부분이다.

### 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.

### 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.

## 3.4 수문

강수가 내리면 식물의 가지나 잎에 의해 차단되고 부착되거나 지표면에 떨어진다. 지표면의 물은 토양층으로 침투되거나 유출로 지표면을 흐른다. 상대적으로 빠르게 실개천으로 흐르게 되고 단시간에 작은 하천을 이룬다. 침투된 물은 토양내에서 부착되고 증발산 되거나 지하 통로를 통하여 지표수 부분으로 점진적으로 움직인다.

### 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 강수량을 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 비교

적 정확한 방법이다.

SCS 유출곡선식은 식 (3.15)와 같다. (SCS, 1972)

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

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

$R_{day}$  : 일 강수량( $mmH_2O$ ) ,  $S$  : 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-2)과 지역의 토지이용 상태 및 식생 피복 처리상태(Table III-3)를 분류하였다.

Table III-2 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-3 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
	72% impervious	-	81	88	91	93
Industrial Area	65% impervious	-	77	85	90	92
Residentia Area	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 토양층안에서 균일하게 분포한다고 가정된다. 물이 토양층으로 침투하면, 습윤점 접촉면 위의 토양은 완전히 포화된다고 가정한다.

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)

$\psi_{wf}$  : 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 대기중의 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 차단 저류되는 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 물부족이 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-4와 같다.

Table III-4 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, 공기역학저항 및 표면저항의 요소들로 구성되어 있으며 Penman-Monteith 방정식은 다음 식 (3.20)과 같다.

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{\neq t} - G) + \rho_{air} \cdot c_p \cdot [e_z^0 - e_z] / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)} \quad (3.20)$$

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

$\Delta$  : 포화수증기압-온도 곡선의 기울기  $de/dT$  (kPa/°C)

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

$\rho_{air}$  : 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)

$\gamma$  : 습도상수( the psychrometric constant) (kPa/°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,  $\lambda$  : 기화잠열(MJ/kg),  $E_0$  : 잠재증발산(mm/d)

$\alpha_{pet}$  : 계수,  $\Delta$  : 포화수증기압-온도 곡선의 기울기  $de/dT$ (kPa/°C)

$\gamma$  : 습도상수(kPa/°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 이류향이 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).

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

여기서,  $\lambda$  : 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( $^{\circ}C$ ) ,  $\overline{T_{aw}}$  : 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,

$$E_a = E_{cam} = E_0 \quad (3.23)$$

$$R_{INT}(f) = R_{INT}(i) - E_{cam} \quad (3.24)$$

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,

$$E_{cam} = R_{INT}(i) \quad (3.25)$$

$$R_{INT}(f) = 0 \quad (3.26)$$

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.

$$E'_s = \min\left[E_s, \frac{E_s \cdot E'_0}{E_s + E_t}\right] \quad (3.27)$$

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 통하거나 증발에 의해 소모된다. 토양수(Soil water)는 토양체의 바닥까지 침투되어 대수층에 충전되며, 토양수의 이동은 최종적으로 측방으로 이동하여 하천수에 기여하게 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 준투수성 토층을 가지는 지역에서 중요하다. 이런 지역에서의 강우는 불투수층을 만날 때까지 수직으로 침투하고 침투한 물은 포화지대를 형성하면서 불투수층 위에 저장된다. 이 포화지대가 측방 지표하 흐름에 대한 수원이 된다.

#### 4) 지하수

지하수(groundwater)는 대기압보다 높은 압력, 즉 양압(Positive Pressure)을 받고 있는 포화지대의 물로서, 수체로부터의 침윤(seepage)에 의해 함양되기도 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 수리 전도도(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). 비평압 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-2 은 두 가지 형태의 대수층을 나타낸 것이다.

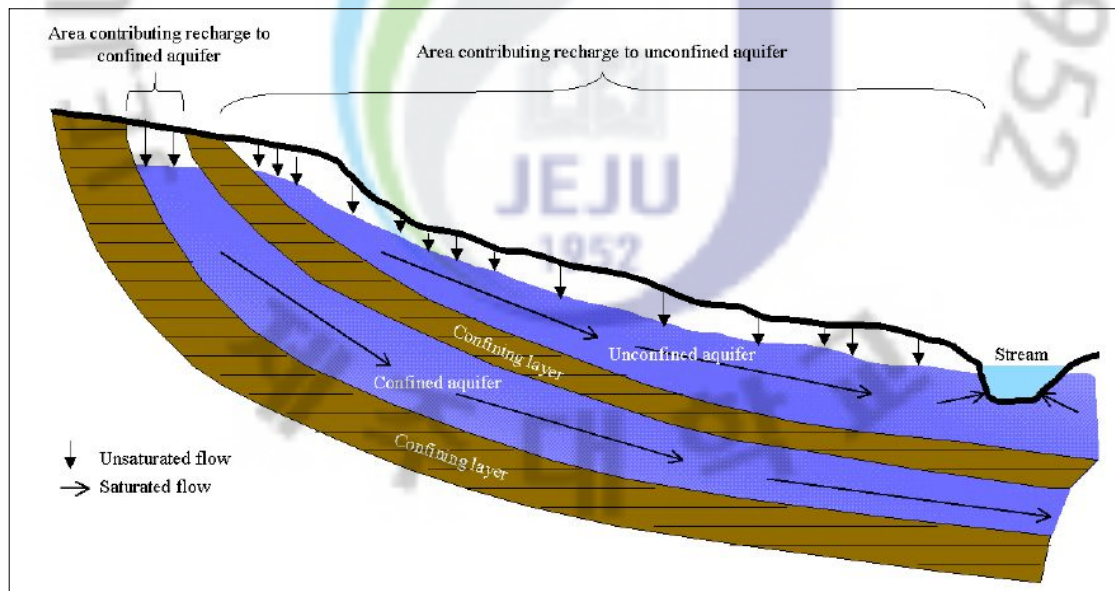


Fig. III-2 Oppressed/not-oppressed Aquifer(Dingmanm 1994)

비피압 대수층으로의 함양은 지표면의 상당 부분으로부터 지하수면까지 침루를 통하여 발생한다. 이와 대조적으로, 지표로부터 침루에 의한 피압 대수층으로의 함

양은 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 열단위가 식물에 대한 잠재 열단위와 같아질 때까지 성장한다. 다년생 식물은 일년 내낸 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.

### 3.5 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 썰기(wedge)저류와 대형(prism)저류의 합으로서 나타낼 수 있다. 대형 저류량은 유출량에만 비례하나 썰기 저류량은 유입량과 유출량의 차에 비례한다고 가정한다. 이러한 가정을 사용하여 대형 저류량은 유량의 함수로서,  $K \cdot q_{out}$ 으로 썰기 저류량은  $K \cdot X \cdot (q_{in} - q_{out})$ 으로 표시 가능하며, 이때 X는 하도 저류량을 결정하는데 있어서 유입량과 유출량의 상대적인 중요도를 조절하는 가중치이다.

#### 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 두가지 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 하천내에서의 모형의 수질 성분에 의해서 조절된다. 영양물질의 추적을 위해 SWAT에서는 하천내 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 하천내 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.

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.

Lenhart 등 (2003)은 독일의 Frankfurt 북서쪽에 위치한 중간규모 유역인 Dill 유역에 SWAT-G 모델을 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.

Luzio 등 (2005)은 GIS 자료의 질이 소유역의 유출량과 유사량에 미치는 영향을 SWAT 모델을 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 유역내 저수지 (reservoir), 저류지 (pond) 등의 저류시설물들과 하도저류 (bank storage)등이 연속유출에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수영강 및 용담댐 유역에 다양한 시나리오를 작성하고 AVSWAT 2000 모델을 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 모델이 국내유역의 토지이용 및 토양특성을 적절히 반영하는가에 대한 평가를 하기 위하여 용담댐 유역에 AVSWAT 2000 모델을 적용하였다. 모의결과와 관측자료를 통해 모형의 보정 및 검정을 실시하였으며 국내 유역에 적용 가능함을 도출하였다.

김남원 등(2004a)은 준 분포형 지하수 유출모형인 SWAT 모형과 3차원 지하수 유동모형인 MODFLOW 모형의 완전 연동형 결합모형인 SWAT-MODFLOW 모형

을 독자적인 방식에 따라 개발하였다. SWAT 모형의 지하수 모형성분은 집중형이므로 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.

김남원 등 (2004b)은 연속유출모형인 SWAT 모형과 도시지역의 유출해석에 주로 이용되는 SWMM 모형의 RUNOFF 블록을 결합함으로써 전원유역은 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.





## IV. 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.

본 연구에서는 143개의 하천 중 토지피복변화가 가장 많이 발생한 제주도 북부지역의 외도천을 연구 대상 유역으로 선정하였다(Fig. IV-1).

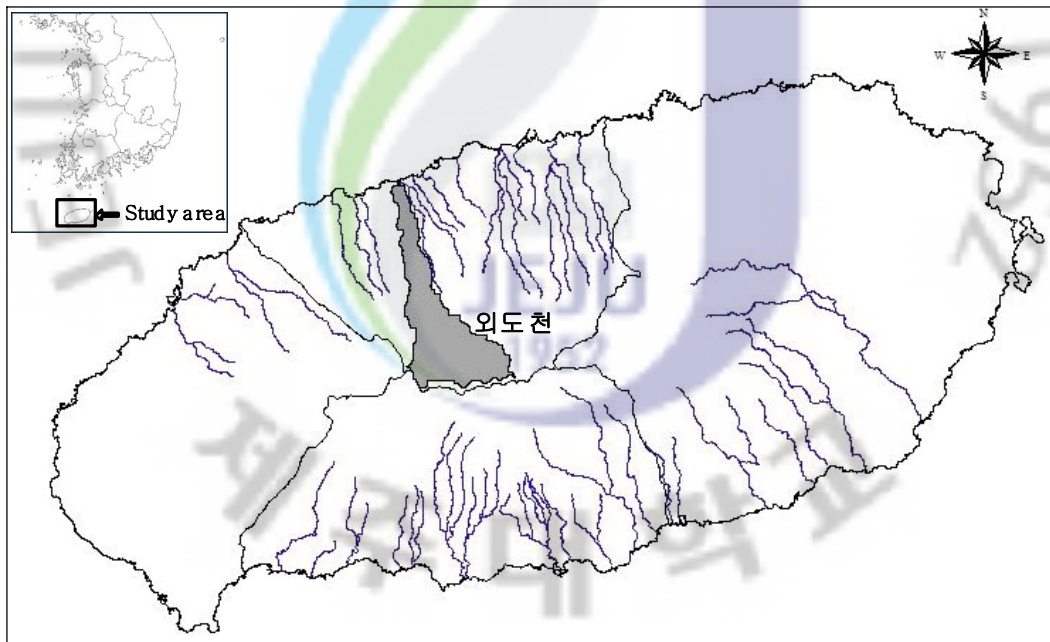


Fig. IV-1 Basin for the study

연구대상유역인 외도천유역은 지방2급 하천으로서 한라산 EL.1,950m 고지에서 발원하여, 도근천의 제1지류로 도근천에 합류 후 해안으로 유입되는 하천형태를 보이고 있으며 하류지역의 월대교 직상류의 수원지 시설에서 배출되는 지하수로 인하여

하천수가 흐르며 총 유로연장 21.86km, 하천연장 18.3km, 유역면적 44.54km<sup>2</sup>이다.

## 2. 연구대상유역의 입체적 특성

유역의 입체적 특성 결정인자로는 하천경사, 유역경사, 표고별 면적분포 등으로 유출특성 특히, 홍수의 도달시간을 결정하는 주요인자로 NGIS 수치지도를 이용한 Arcview 모형의 수치표고(DEM)분석으로 산정한 입체적 특성은 다음과 같다.

### 2.1 표고분석

표고별 면적분포는 고도에 따라 변하는 경우 강우, 증발, 식생, 수문사항 등의 경향을 검토할 수 있는 기초자료가 되는 것으로 연구대상유역에 대한 표고별 누가면적 구성비는 Fig. IV-2와 같다. 연구대상유역의 면적 44,540,846m<sup>2</sup> 중 표고 800~1000m미만이 8,287,046(18.6%)로 가장 많은 면적을 차지하였다.

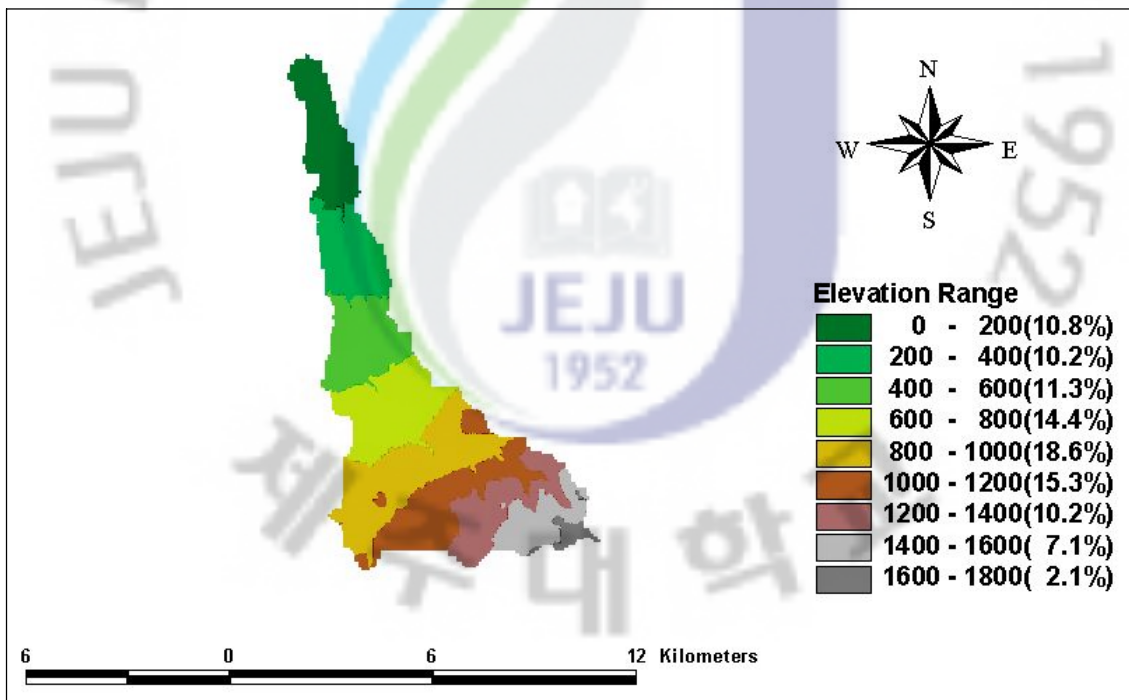


Fig. IV-2 Altitude analysis map of the basins to be studied

Table IV-1 Altitude Analysis chart of the basins to be studied

Elevation(m)	구성비(%)	환산면적(m <sup>2</sup> )
계	100	44,540,846
0-200	10.8	4,832,461
200-400	10.2	4,535,660
400-600	11.3	5,019,536
600-800	14.4	6,418,098
800-1000	18.6	8,287,046
1000-1200	15.3	6,825,525
1200-1400	10.2	4,522,169
1400-1600	7.1	3,172,174
1600-1800	2.1	928,178

## 2.2 경사분석

유역의 경사분포 분석은 유역 전반에 걸쳐 경사에 따른 도달시간의 산정 및 유출에 있어서 중요하며 유출, 토사의 침식등과 관계가 깊은 인자로서 연구대상유역에 경사분석도는 Fig. IV-3과 같다. 연구대상유역의 면적 44,540,846m<sup>2</sup> 중 경사 0~10° 미만의 27,249,788m<sup>2</sup>(61.2%)로 대부분이 평지를 이루고 있는 것으로 나타났다.

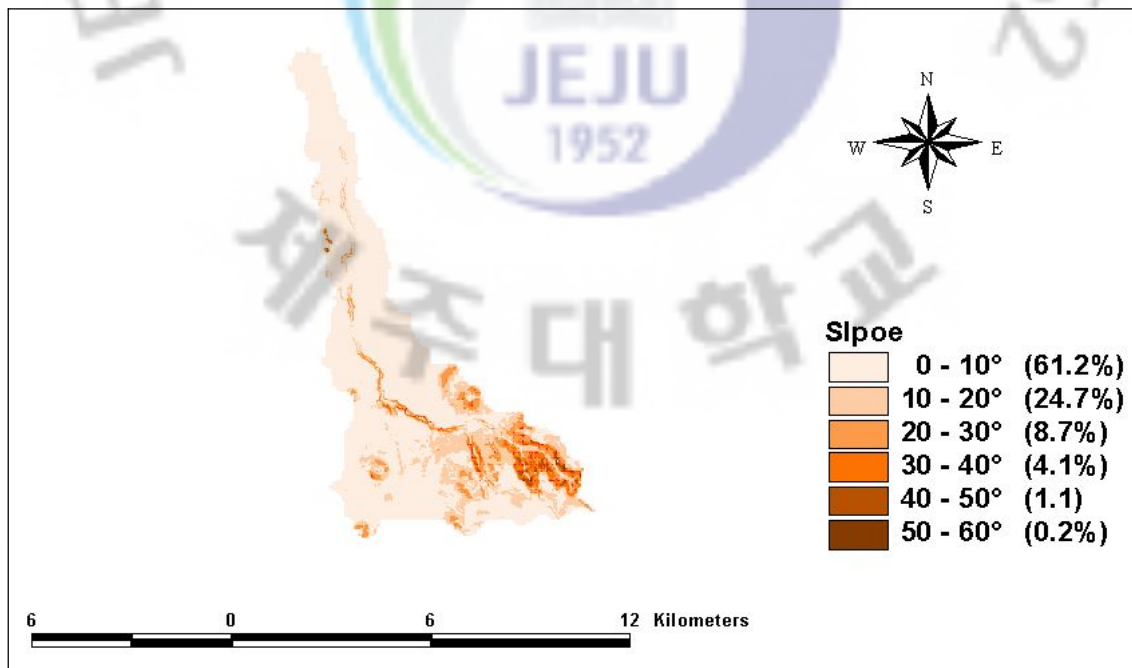


Fig. IV-3 Slope analysis map of the basins to be studied

Table IV-2 Slope analysis chart of the basins to be studied

degree(%)	구성비(%)	환산면적(m <sup>2</sup> )
계	100	44,540,846
0-10	61.2	27,249,788
10-20	24.7	10,996,696
20-30	8.7	3,872,139
30-40	4.1	1,846,574
40-50	1.1	485,704
50-60	0.2	89,945

### 2.3 경사향분석

유역의 경사향은 화소의 좌우를 잇는 벡터와 상하를 연결하는 벡터로 사면을 먼저 결정하고, 이 평면의 주향을 계산하여 구한다. 사면향은 DEM의 위쪽에 해당하는 정북 방향과 구한 평면의 법선 벡터를 수평면에 투영한 벡터와의 각을 말하며, 경사향은 0°~360°의 값을 갖는다. Fig. IV-4는 DEM자료를 이용하여 작성한 외도천 유역의 경사향 분포도로써 사면의 경사방향을 동서남북으로 표현한 것이다.

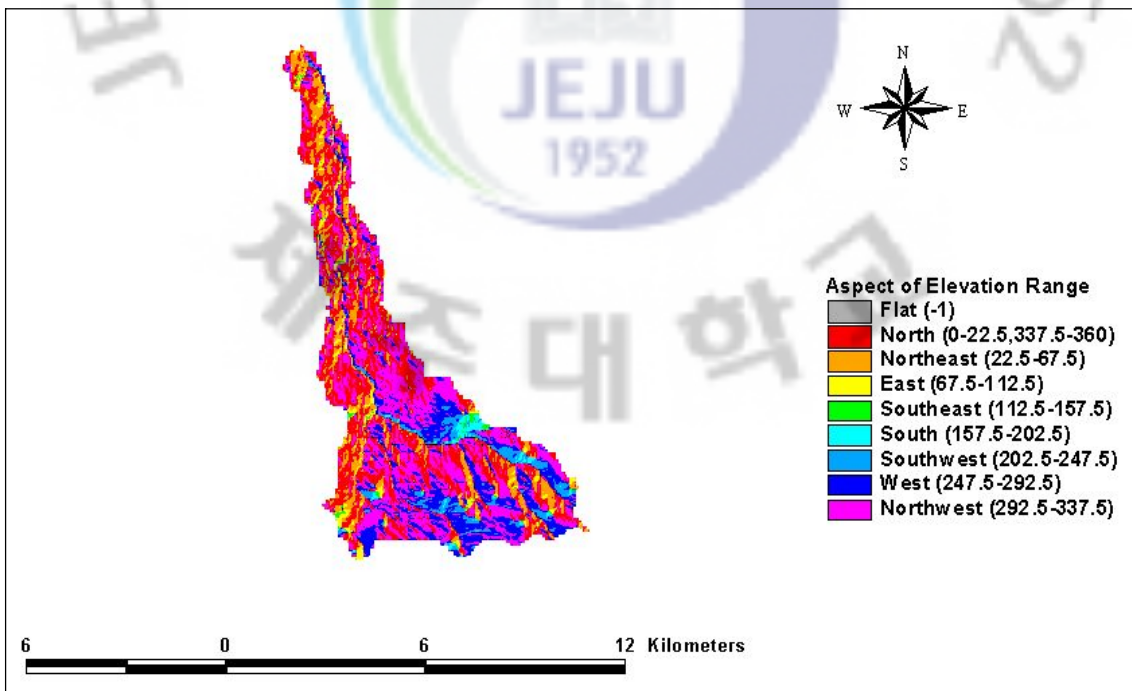


Fig. IV-4 Slope direction analysis map of the basins to be studied

Table IV-3 Area ratio by slope direction

유역 면적 (km <sup>2</sup> )	평지		북		북동		동		남동		남		남서		서		북서	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
44.54	0.04	0.1	8.24	18.5	10.59	23.8	9.10	20.4	2.32	5.2	0.50	1.1	1.04	2.3	3.17	7.1	9.55	21.4

#### 2.4 음영기복분석

음영기복도(Shaded relief map)는 지도의 시각적인 질을 높이기 위해 개발된 방법으로써 영상에 인위적인 빛을 주었을 때 나타나는 굴곡을 입체적으로 나타내는 기법이다. 음영기복의 작성은 일정 방향의 빛을 받았을 때 생기는 그림자의 어두운 정도(Shaded gray level)를 계산하는 것인데 경사도나 경사향에서 정의한 사면의 법선 벡터와 빛의 방향이 이루는 각의 코사인 값을 이용하며 Fig. IV-5는 연구대상 유역의 태양방위 315°, 태양고도 45°인 음영기복도를 나타내었다.

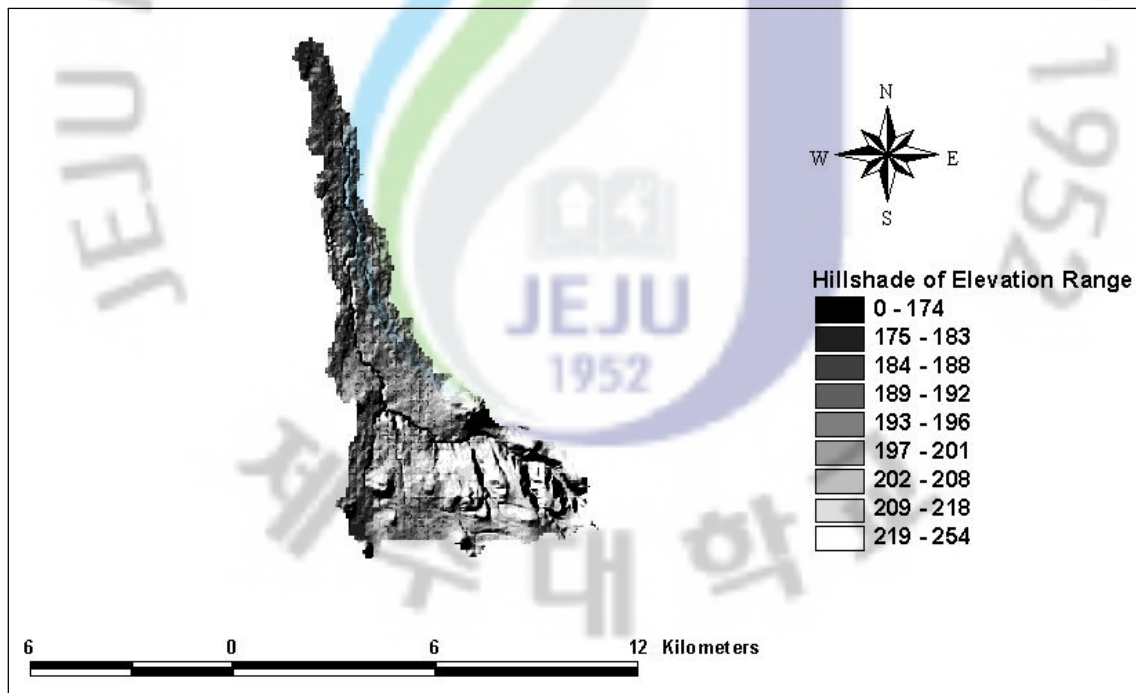


Fig. IV-5 Shaded relief map of the basins to be studied

## V. SWAT 모형의 입력자료 분석 및 구축

### 1. 대상구역의 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, 대상구역의 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 대상구역의 자료는 Table V-1 과 같다.

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

Station data	Input data	
	현재(2000)	과거(1975)
Pa_pre.dbf	Jeju_P, Eoseungsang_P, Chounback_P, Eoeum_P, Hangpa_P, Aewol_P	Jeju_P
Pa_climate.dbf	Jeju_C	Jeju_C
Pa_hum.dbf	Jeju_H	Jeju_H
Pa_solar.dbf	Jeju_S	Jeju_S
Pa_wind.dbf	Jeju_W	Jeju_W

### 1.1 기상자료 분석

연구대상 유역의 기상자료는 제주도기상청 관할 4개지점 중 제주기상청자료를 사용하였으며 관측소 현황은 Table V-2와 같다.

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

Table V-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

Table V-3 Weather data by month of Jeju meteorological post

	평균기온 (°C)	최저기온 (°C)	최고기온 (°C)	강우량 (mm)	상대습도 (%)	일조시간 (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

### 1.2 강우자료 분석

연구대상 유역의 강우량 자료는 각 유역별로 제주재난안전대책본부 강우량 자료와 기상청 강우량 자료를 사용하였다. 외도천 유역면적은 44.54 km<sup>2</sup>이며 모형의 적용기간을 현재(2000. 1. 1~2007. 12. 31)와 과거(1975. 1. 1~1982. 12. 31)로 지정하

여 적용하였다(Table V-4).

Table V-4 The status of rainfall observatory at the basins to be studied

구분	적용기간	강우관측소 현황
현재	2000. 1. 1~ 2007. 12. 31	제주, 어승생, 향파두리, 어음, 천백고지, 애월
과거	1975. 1. 1~ 1982 12. 31	제주

각 유역별로 모형의 적용기간에 맞추어 Table V-4의 강우관측소 자료를 이용하여 모형의 강우에 대한 입력자료를 구축하였으며 각각의 유역 강우관측소별 적용기간동안의 월별 강우 자료는 Table V-5, Fig. V-1과 같다.

Table V-5 Rainfall data by month of rainfall observatory at the basin of Oaedo watershed (2000~2007, for 8 years)

	향파두리	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. V-1에서 외도천 유역 강우관측소별 월별 강우패턴은 전체적으로 일정하며 고지대에 위치한 천백고지와 어승생의 월별 강우량이 많이 나타났다.



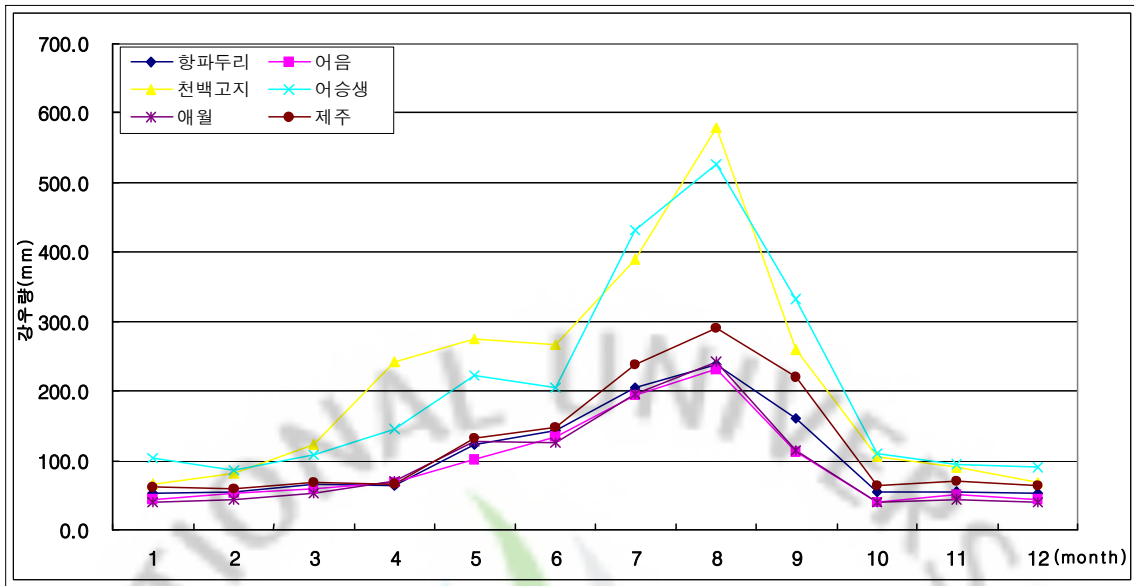


Fig. V-1 Precipitation by month and by precipitation observatory of Oaedo watershed basin

## 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 기본틀을 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. V-2).

외도천 유역은 유역평균 표고가 468m, 유역평균 경사가 17.12% 이다.

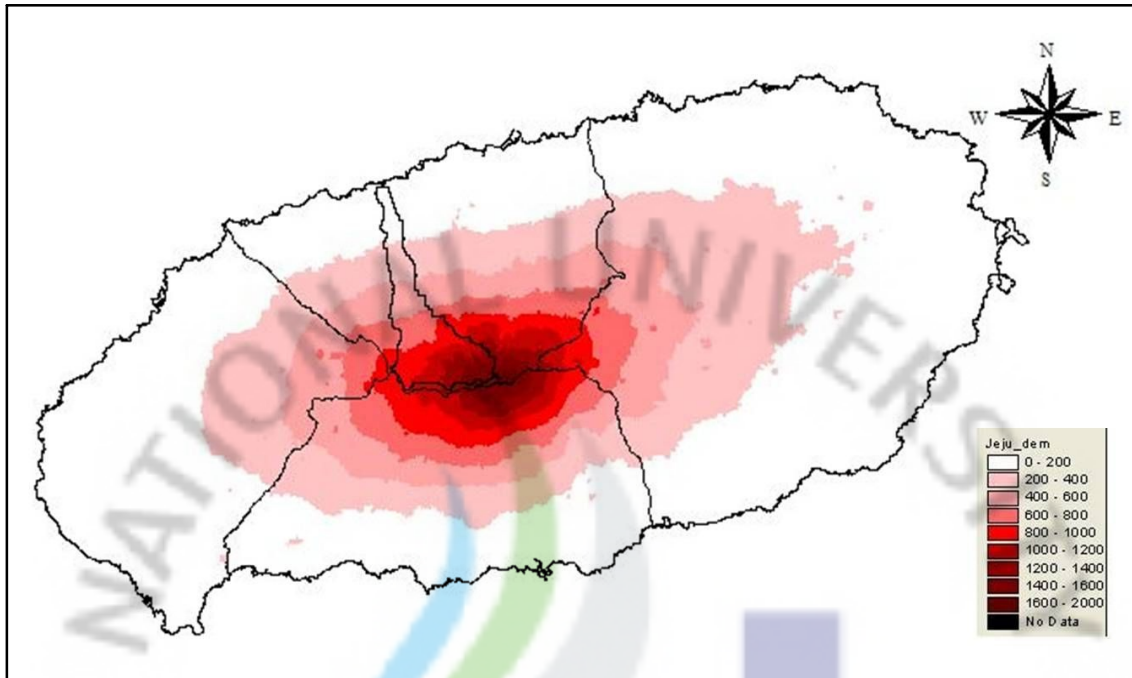


Fig. V-2 DEM of the basin to be studied

Table V-6 Result of altitude analysis at the basin of Oaedo watershed

Altitude (m)	Watershed area (km <sup>2</sup> )	Percentage (%)	Accumulation Watershe area (km <sup>2</sup> )	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

## 2.2 토지피복도(Landuse map)

토지피복도는 국가수자원관리 종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>) 제공하는 토지피복자료를 이용하였다. 이용된 토지피복자료는 2000년 Landsat 위성영상을 이

용하여 피복분류된 자료이며, wamis에서 제공하는 지형공간 래스터 파일은 arcinfo의 GRID파일을 shape 파일의 형태로 변환하였다. 토지피복도(Landuse map)자료를 Arcview 프로그램을 이용하여 구축하였으며, 구역별로 격자크기는 100m×100m 으로 설정하여 모형의 입력자료로 사용하였다(Fig. V-3).

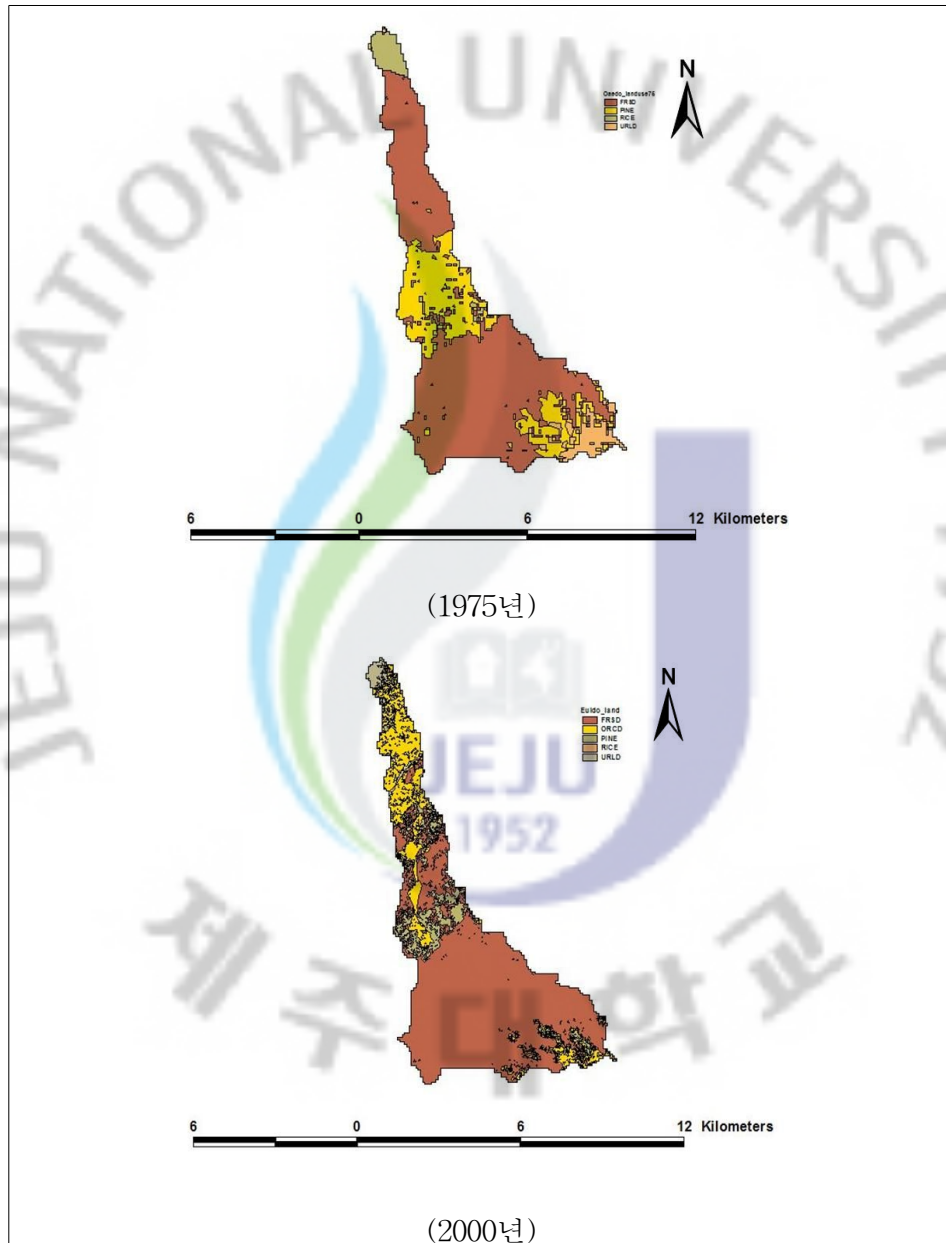


Fig. V-3 Land-cover map of basin to be studied

Table V-7 Ground coverage state at the basin of Oaedo watershed

구 분	면적(km <sup>2</sup> )		비율(%)	
	현재(2000)	과거(1975)	현재(2000)	과거(1975)
논	0.06	1.86	0.13	4.17
초지	3.89	8.9	8.73	19.99
밭	8.33	0.74	18.71	1.66
산림	30.31	32.12	68.05	72.11
시가지	1.95	0.92	4.38	2.07

과거와 현재의 토지이용변화를 살펴보면 과거(1975) 외도천유역은 산림지역이 72.11%로 가장 많은 면적을 차지하고 있으며 초지, 논, 시가지순으로 토지피복상태가 나타났고, 현재(2000)자료는 산림지역이 전체 68.05%로 가장 많은 면적을 차지하고 있으며, 밭, 초지, 시가지 순으로 토지 피복 상태가 나타났다.

### 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 분류하였다. 토지피복자료와 같은 방법으로 연구대상유역의 토양도(Soiltype map) 자료를 Arcview 프로그램을 이용하여 구축하였으며, 유역별로 격자크기는 100m×100m 으로 설정하여 모형의 입력자료로 사용하였다(Fig. V-4).

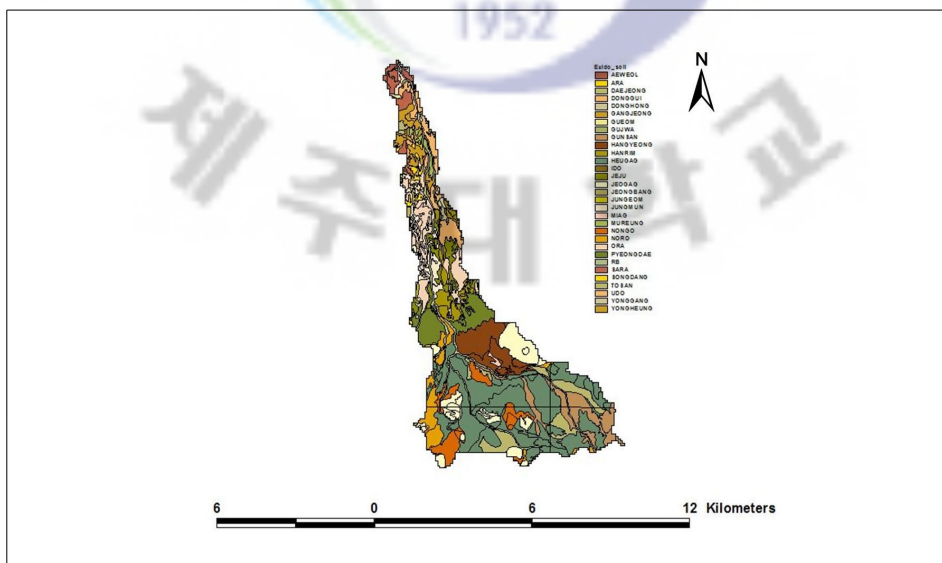


Fig. V-4 Soil map of basin to be studied

Table V-8 Rate and dimension by soil series at the basis of Oaedo watershed

구 분	면적(km <sup>2</sup> )	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

외도천 유역은 31개의 토양통 중에서 흑악통이 27.69% 차지하고 있으며, 오라, 한경, 적악, 군산 통이 비교적 많은 분포를 보이고 있다(Table. V-8).

## VI. SWAT 모형의 적용 및 결과

### 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 VI-1) 중에서 기존의 연구결과(정, 2008)를 바탕으로 하여 제주도 하천에 영향을 미치는 7개의 매개변수를 선정하였다.

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

제주도 하천유출 특성에 맞추어 직접유출과 전체유출로 구분하여 매개변수 민감도 분석을 실시하였으며, 직접유출에 민감하게 영향을 주는 매개변수와 전체유출에 영향을 주는 매개변수를 추출하여 모형의 보정에 적용하였다.

Table VI-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 <sub>3</sub> 농도
	SOL_ORGN	0	10000	토양층에서의 초기 산화질소 농도
	SOL_ORGP	0	4000	토양층에서의 초기 산화인 농도
	SOL_NO3	0	5	토양층에서의 초기 NO <sub>3</sub> 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 VI-2 Value for analyzing the sensitiveness of hydrological parameters related to runoff

매개변수	하한값	-25(%)	기준값	25(%)	상한값
CN2	35	51	67	83	98
SOL_AWC	0	0.25	0.5	0.75	1
ESCO	0	0.25	0.5	0.75	1
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

## 1.2 민감도 분석

연구대상 유역에 Table VI-2에서 추정된 매개변수 7개를 기준치에서  $\pm 25\%$  씩 변화를 시키면서 민감도 분석을 실시하였다.

### 1) 직접유출 매개변수 민감도 분석

직접 유출에 대한 매개변수 민감도 분석을 실시한 결과 가장 민감한 매개변수는 AMC-II 조건의 SCS 유출곡선지수인 CN2로 나타났다. 매개변수 민감도 분석을 실시한 결과 CN2값이 증가함에 따라 직접유출량은 지수 함수적으로 증가하였으며, SOL\_AWC가 기준값에서 변화할수록 10%정도의 직접유출량의 변화를 보임을 확인하였다. 또한 ESCO도 기준값에서 변화할수록 5%정도의 변화를 확인하였으며, 직접유출량에 대해서 위의 3가지 매개변수를 제외한 나머지 매개변수들은 어떠한 반응도 보이지 않았다(Table VI-3, Fig. VI-1).

Table VI-3 Rate of change of direct runoff according to the rate of parameter at the basin of direct runoff

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



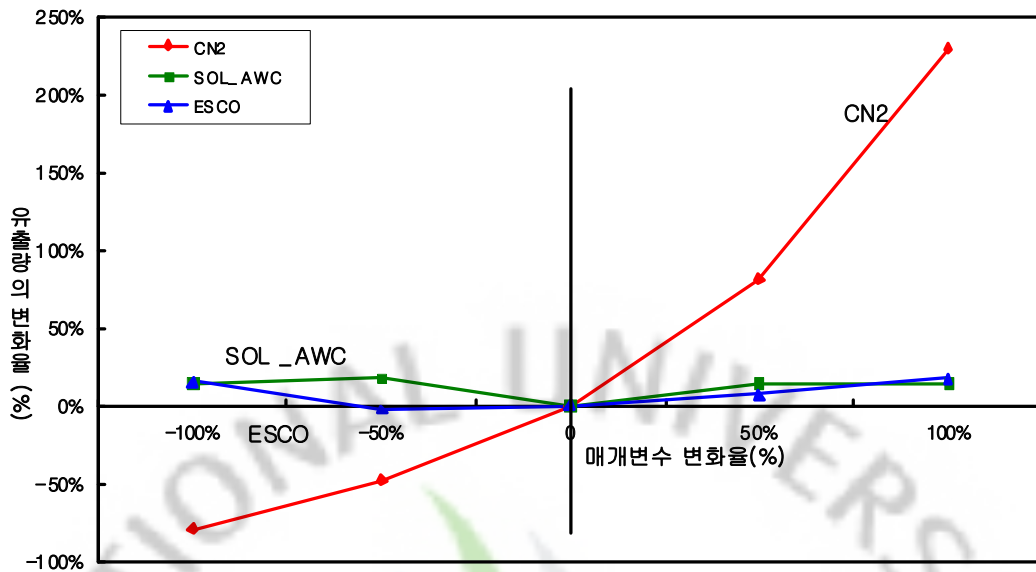


Fig. VI-1 Rate of change of direct runoff according to the rate of parameter at the basin of direct runoff

## 2) 전체유출 매개변수 민감도 분석

전체유출에 대한 매개변수 민감도 분석을 실시한 결과 SOL\_AWC, CN2, GWQMN, ESCO, ALPHA\_BF, GW\_REVAP, REVAPMN 으로 총 7개의 매개변수가 총 유출량에 대하여 민감한 반응을 보였다(Fig. VI-2).

가장 민감하게 반응을 보인 토양층 유효수분량이 SOL\_AWC 는 기준값에서 하한값에 가까워 질수록 20% 이상의 총 유출량이 증가하는 경향을 보였으며, AMC-II 조건의 SCS 유출곡선 지수인 CN2 는 기준값에서 상한값에 가까워 질수록 15% 정도의 총 유출량이 증가하는 경향을 보였다. 또한 기저유출 감수 상수인 ALPHA\_BF 는 총유출량에 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, 침투에 대한 얇은 대수층의 임계 수분량인 REVAPMN 은 각각 5% 미만의 반응을 나타냈다(Table VI-4).

Table VI-4 Rate of change of total runoff according to the rate of parameter at the basin of direct runoff

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
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

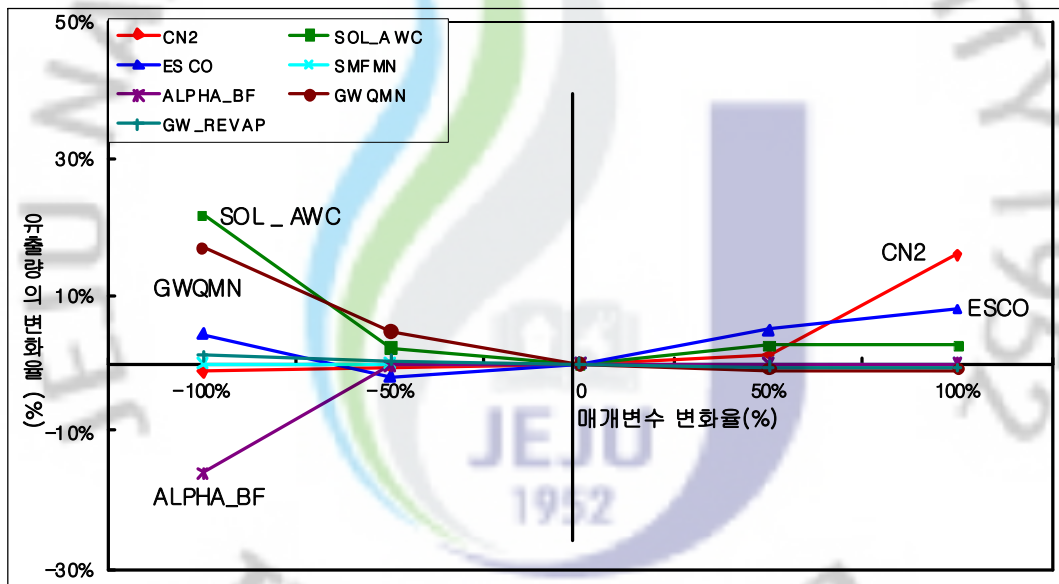


Fig. VI-2 Rate of change of direct runoff according to the rate of parameter at the basin of direct runoff

### 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). wmr, 모형수행의 결과가 평균적으로 어느 정도의 유량만큼 오차가 발생하는지를 나타내는 지표로 일종의 평균치라고 할 수 있다. 본 연구에서 사용한 목적함수( $f_s$ )는 식 (6.1)과 같다.

$$f_s = \text{RMSE} \quad (6.1)$$

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

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 (6.2)와 같이 모형효율성 계수 (ME)를 목적함수 ( $f_s$ )로 활용하였다.

$$f_s = ME \quad (6.2)$$

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

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

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

여기서,  $OQ_i$  = 관측유량

$SQ_i$  = 모의유량

$N$  = 시간간격의 수

$M_{ob}$  = 관측유량의 평균

## 2. 모형의 보정 및 적용

### 2.1 실측치를 이용한 유출량 보정

현재의 토지피복에 따른 유출량을 산정하기 위하여 매개변수 민감도 분석 결과를 바탕으로 보정을 하였다. 외도천 하류지점에는 평상시에도 수위 0.084m 정도의 유출이 발생하지만 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(Ⅲ)의 외도천 유역 평상시 유출의 수위-유량곡선의 상관계수 R 값이 0.6 이므로 모형의 보정에는 사용하지 않았으며, 강우발생시 직접실측한 관측자료인 2007년 6회 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 VI-5). 보정 결과 평균제곱근오차(RMSE)는 14.92 로 나타났으며, R2 는 0.93, 모형효율성계수(ME)는 0.70으로 나타났다(Fig.VI-3).

Table VI-5 Corrected parameter of the basin of Oaedo watershed

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.

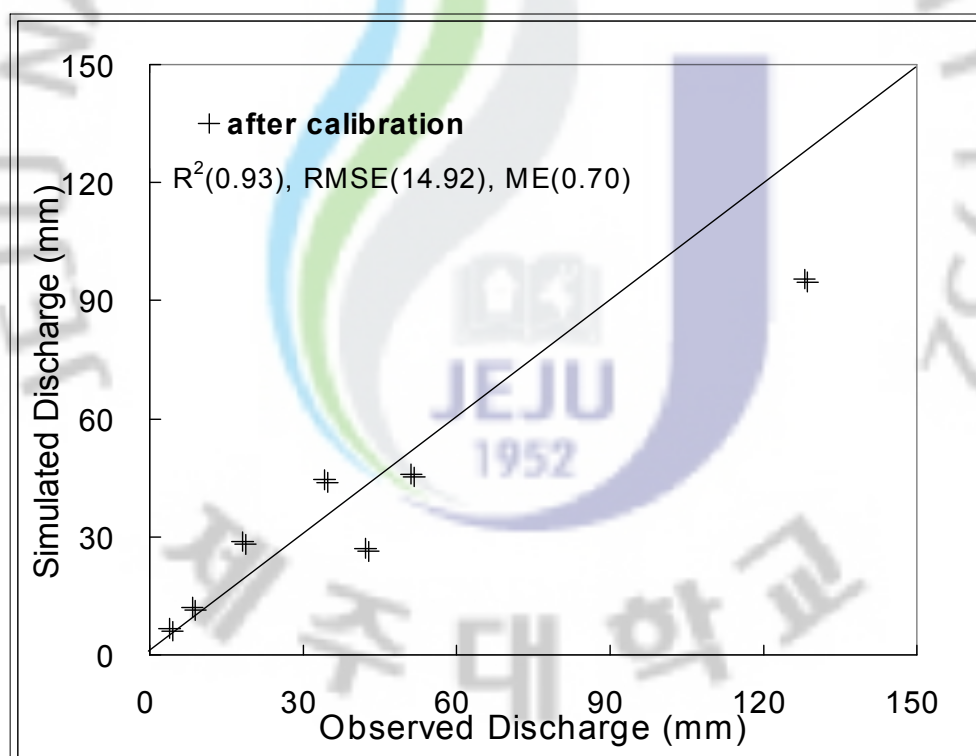


Fig. VI-3 Result of correcting the model of the basin of Oaedo watershed

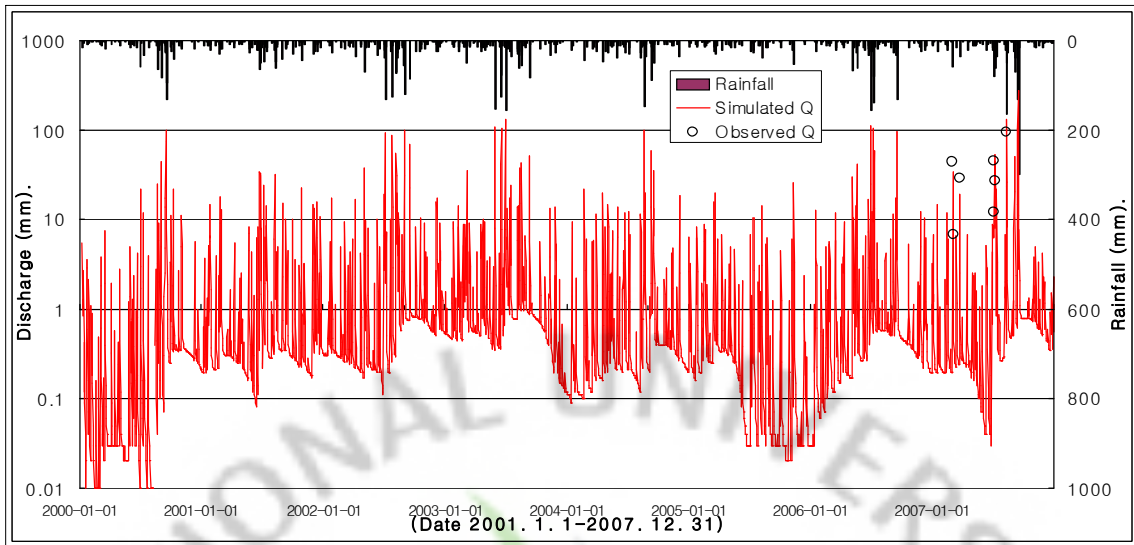


Fig. VI-4 Result of the present runoff simulation of the basin of Oaedo watershed(date)

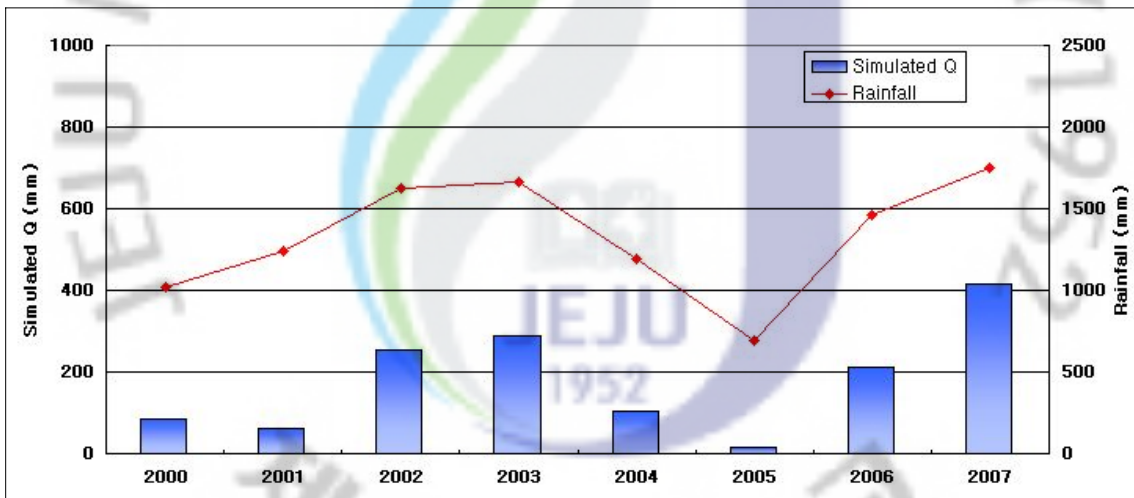


Fig. VI-5 Result of the present runoff simulation of the basin of Oaedo watershed(year)

Table VI-6 Each year the result of direct runoff simulation of the basin of Oaedo watershed(the present)

년 도	강우량(mm)	직접유출량(mm)	직접유출율(%)
2000	1024	191.21	19
2001	1245	153.4	12
2002	1625	397.53	24
2003	1665.5	411.88	25
2004	1190	214.4	18
2005	696.8	46.63	7
2006	1462.7	362.61	25
2007	1749.5	556.99	32
평 균	1332.3	291.8	22

## 2.2 과거의 유출량 산정

과거의 토지피복에 따른 유출량을 산정하기 위하여 과거의 실측 관측자료를 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 산정하였다.

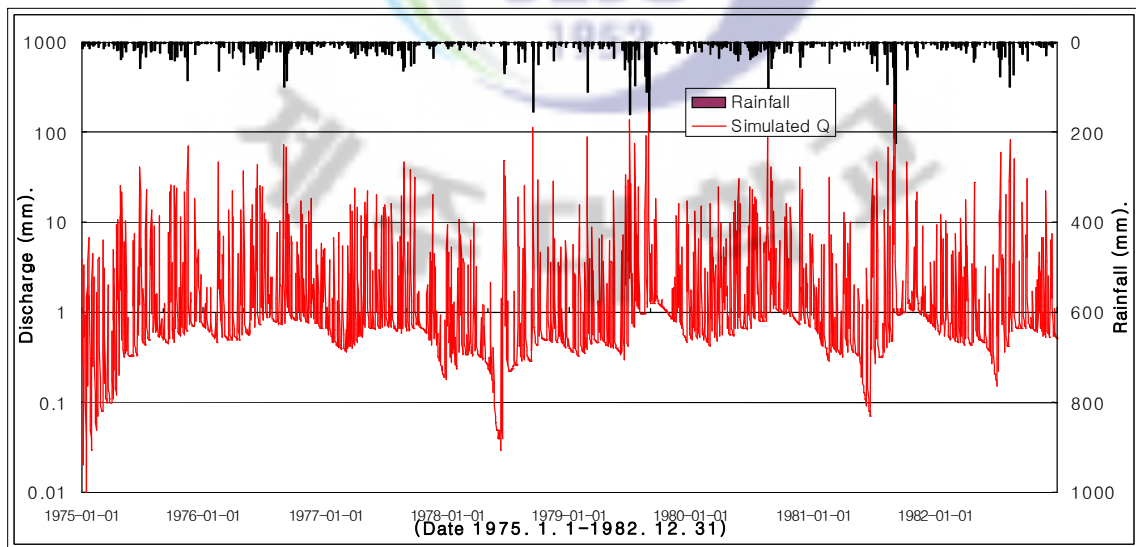


Fig. VI-6 Result of the past runoff simulation of the basin of Oaedo watershed (year)

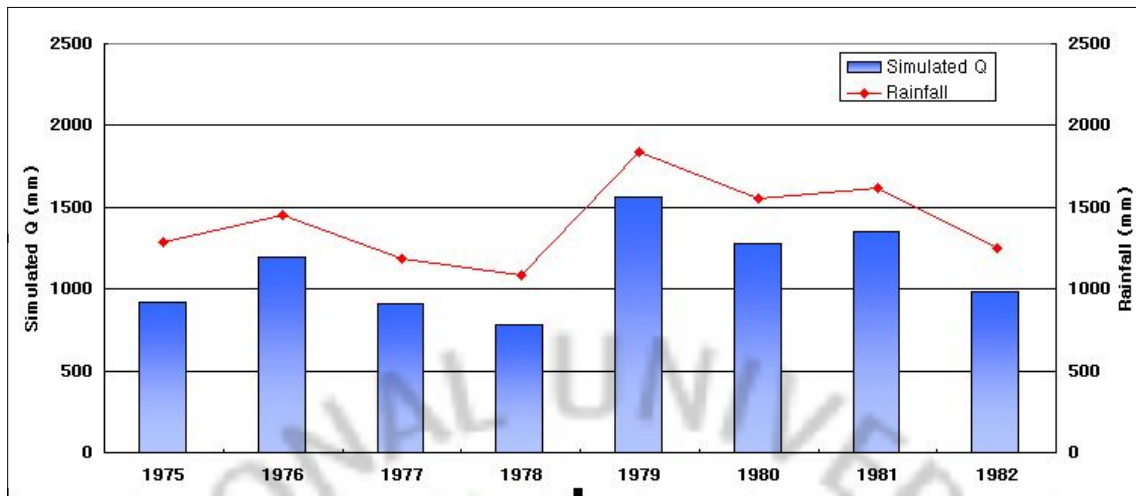


Fig. VI-7 Result of the past runoff simulation of the basin of Oaedo watershed (year)

Table VI-7 Each year the result of direct runoff simulation of the basin of Oaedo watershed(the past)

년 도	강우량(mm)	직접유출량(mm)	직접유출율(%)
1975	1286	98.4	8%
1976	1449	150.34	10%
1977	1183	82.42	7%
1978	1081	134.14	12%
1979	1834	441.82	24%
1980	1550	155.52	10%
1981	1618	401.06	25%
1982	1254	131.29	10%
평 균	1406.8	199.4	14%

### 3. 토지이용에 따른 직접유출 비교

#### 3.1 과거와 현재의 직접유출율 비교

SWAT 모형의 입력자료 중에서 토지피복자료를 과거(1975년 Landsat 위성영상 토지피복자료)와 현재(2000년 Landsat 위성영상 토지피복자료)로 구분하여 모형에 적용하였다. 적용하여 산정된 결과를 요약하면 Table VI-8과 같다.



Table VI-8 The past and the present comparison of direct runoff

년 도	강우량 (mm)	직접유출량 (mm)	직접유출율 (%)	년 도	강우량 (mm)	직접유출량 (mm)	직접유출율 (%)
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
평 균	1406.8	199.4	14	평 균	1332.3	291.8	22

과거와 현재의 토지피복자료를 각각 이용하여 산정된 결과를 보면 과거(1975~1982) 8년간의 평균 직접유출율은 14%로 산정되었으며, 현재(2000~2008) 8년간의 평균 직접유출율은 22%로 산정되었다. 직접유출의 증가에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 토지의 불투수성이며, 불투수성 토지의 증가에 따라 직접유출량은 크게 증가하게 된다.

본 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 직접유출율도 8% 가량 증가함을 알 수 있다.

### 3.2 과거와 현재의 유황 분석

과거와 현재의 직접유출량에 대해 유황곡선을 그려 빈도와 경향을 분석하였다. 같은 유역에 토지이용변화를 적용해본 결과 직접유출의 발생빈도는 현재에 비해 과거가 높게 나타났다. 이는 불투수성 토지의 증가로 인하여 직접유출의 발생빈도가 과거가 현재보다 높게 나타나지만 현재의 직접유출량이 크게 나타남을 알 수 있다.

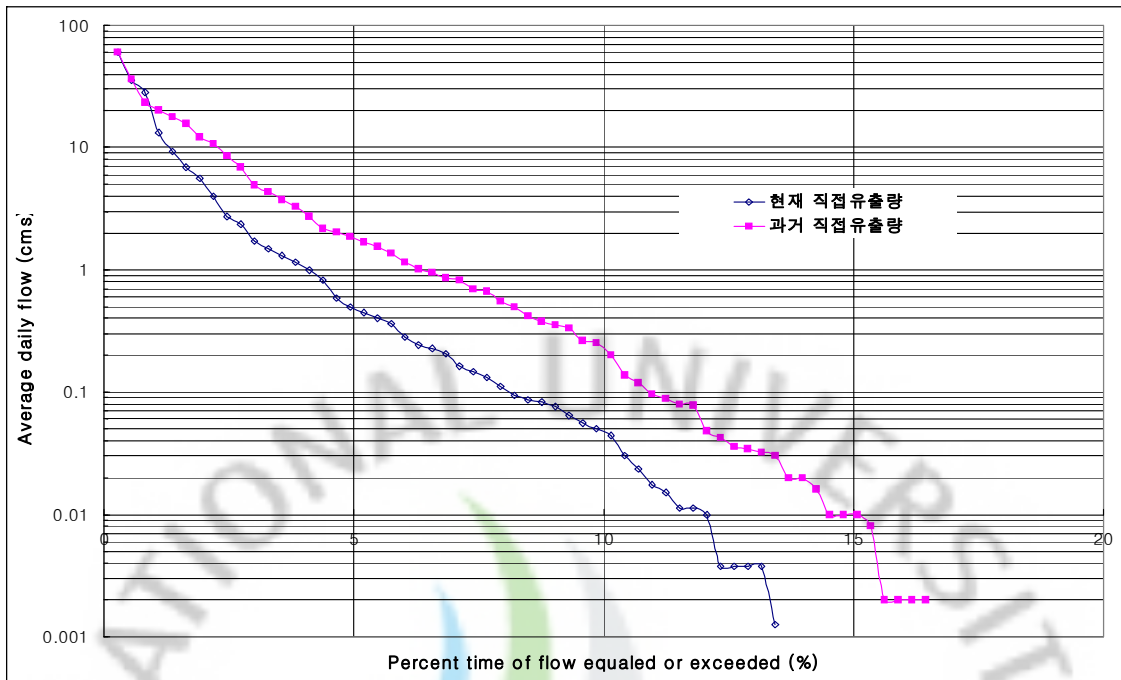


Fig. VI-8 discharge-duration curve

## VI. 결 론

제주도는 우리나라 최다우 지역으로 풍부한 수자원량을 보유하고 있지만, 특이한 수문지질 특성으로 인하여 수자원의 대부분을 지하수에 의존하고 있다. 또한 무분별한 개발로 인하여 하천 인근지역 홍수 및 침수 등으로 많은 재해가 발생되고 있다. 토지이용변화에 따른 하천유역의 유출량을 산정하기 위하여 과거와 현재 각각의 유출량을 산출하여 비교해 본 결과는 다음과 같다.

1) 과거와 현재의 피복의 변화에 따른 직접유출량을 모의하기 위하여 준분포형 유출모형인 SWAT 모형을 제주도 북부지역 지방2급 하천인 외도천에 적용하였다. SWAT 모형의 입력 자료인 수문·기상 자료인 강우, 최고·최저기온, 태양복사량, 풍속, 습도 등을 과거(1975. 1. 1~1982. 1. 1)와 현재(2000. 1. 1~2007. 12. 31)로 구분하여 모형에 적용하였으며, DEM(Digital Elevation Model), 토양도(Soil Type Map) 자료를 구축하여 적용하였다. 피복의 변화에 따른 직접유출의 변화를 모의하기 위하여 과거(1975년 Landsat 위성자료)·현재(2000년 Landsat 위성자료)를 각각 적용하였다.

2) SWAT 모형의 수문학적 매개변수 중 유출에 관련된 매개변수를 추정하여 매개변수 민감도 분석을 실시하였다. 민감도 분석은 직접유출·전체유출로 구분하여 추정한 매개변수 7개의 기준 값을 정하여 ( $\pm 25\%$ )씩 단계적으로 변화시키면서 실시하였다. 그 결과 직접유출에 가장 많은 영향을 미치는 매개변수는 CN2로 나타났으며, 전체유출에 영향을 미치는 매개변수로는 CN2, SOL\_AWC, ESCO 등으로 나타났다.

3) 외도천 유역은 하류지점에서 0.084m 정도의 수위를 유지하며 평상시에도 유출이 계속하여 발생하지만 외도천 하류지점의 수위-유량곡선의 정확도 부족으로 인하여 2007년 7회 강우 발생 시의 유출 자료를 이용하여 보정하였으며, 그 결과  $R^2$ 는 0.93, RMSE는 14.92, ME 0.70 으로 나타났다. 또한 직접유출율은 15~32%(평균 22%) 정도로 산정되었으며, 이는 『제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사, 2003, 제주도』에서 실측하여 산정된 직접유출율(19.8~35.2%)과 유사하게 나타났다.

4) 과거의 실측자료가 존재하지 않으므로 현재의 모형 보정매개변수를 그대로 적용하여 과거의 직접유출량을 산정하였으며, 그 결과 직접유출율이 10~24%(평균 14%)로 산정되었다.

5) 토지피복의 변화에 따른 과거·현재의 직접유출량을 산정한 결과 과거에 비하여 외도천 유역 하류부의 개발로 인한 불투수성 토지가 2배 이상 증가하였으며, 직접유출율도 8% 가량 증가하게 나타났다. 또한, 직접유출에 대한 유황곡선을 분석한 결과 직접유출의 발생빈도는 현재에 비해 과거가 높게 나타났다. 이는 불투수성 토지의 증가로 인하여 직접유출의 발생빈도가 과거가 현재보다 높게 나타나지만 현재의 직접유출량이 크게 나타남을 알 수 있다.

이상의 결과들로 제주도 제주시 지방2급 하천인 외도천에 SWAT 모형을 적용하여 8개년의 일 유출량을 모의해본 결과 유출에 대해서 전체적으로 우수한 결과를 보이며, 향후 보다 많은 유출량 자료를 확보하여 본 연구의 결과에 추가하여 보다 정밀한 유출량을 산정할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 재해를 저감시키기 위하여 도시개발로 인해 변화되는 지형 및 토지이용 등의 각 요소들을 모형에 적용하여 도시개발에 따른 수문환경의 전반적인 변화로 인한 유출영향 평가가 필요하다고 판단된다.

## 참고문헌

- 고현수, 2006, SWAT을 이용한 도시 소유역의 장기유출모의, 울산대학교 대학원 석사학위논문
- 장대원, 2004, GIS 기반의 SWAT 모형을 이용한 하천 유출량 모의, 인하대학교 대학원 석사학위논문.
- 신문주, 2006, SWAT 모형을 이용한 안양천 유역의 유량확보와 수질개선에 대한 방안, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
- 김제형, 2008, 장기유출해석을 위한 SWAT모형 적용에 관한 연구, 한양대학교 대학원 석사학위논문.
- 양성기, 2007, 지구의 수권과학, 구미서관, pp. 177~288.
- 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 유사발생저감 효과의 분석, 강원대학교 대학원 석사학위논문, pp. 20~25.
- 문덕철, 2004, 제주도 주요하천의 기저유출량 산정에 관한 연구, 제주대학교 대학원 석사학위논문
- 제주도, 2002, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사 II, pp. 182~251.
- 제주도·한국수자원 공사, 2003, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사III, pp. 18~28.
- 오영진, 2007, 제주도 빗물의 수자원 활용화 방안에 관한 연구, 제주대학교 대학원 석사학위논문
- 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.
- 김지훈, 1998, 지리정보시스템을 이용한 SWAT/GRASS 모형의 적용, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
- 권명준, 2000, 농촌유역 하천의 수질예측을 위한 SWAT 모형과 WASP 모형의 연계운영, 서울대학교 석사학위논문.
- 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.
- 김정곤, 손경호, 2006, SWAT 모형을 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.
- 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.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V., 1970, River flow forecasting through conceptual models. Part 1-A discussion of principles. J. Hydrol.,10, 282~290.
- K. Eckhardt, J. G. Arnold, 2001, Automatic calibration of a distributed catchment model, J. Hydrol. 251, pp. 103~109.
- S.L Neitsch, J.G. Arnold, J.R. Williams, 2001, Soil and Water Assessment Tool, User's Manual 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.



## 감사의 글

말도 많고 탈도 많았던 지난 2년, 돌이켜 보면 아주 짧았던 대학원 생활에서 많은 것을 보고 배우고 또한 느끼게 해준 소중한 시간이 어느덧 졸업과 첫 사회생활을 앞두고 있습니다.

학문적인 지식뿐 만이 아니라 삶의 방향을 올바르게 이끌어주시며 항상 용기와 열정을 불어넣어주신 양성기교수님, 말로서도 글로서도 감사함의 표현을 다 할 수가 없어 안타까울 뿐입니다. 그리고 바쁘신 와중에 논문심사를 세심하게 검토하여주신 김상진교수님, 이동욱교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 아울러, 학부시절에서부터 대학원과정까지 많은 가르침을 주신 김남형교수님, 남정만교수님, 이병걸교수님, 박상렬교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

그리고 환경수리학 연구실.

대학원 생활 처음부터 지금 이 순간까지 저의 버팀목이 되어주신 우리 연구실 모든 분들에게 진실어린 마음을 전합니다. 힘들고 속상한 일이 있을 때에도 변함없는 모습으로 늘 같은 자리에서 함께할 수 있었음에, 서로의 존재를 감사하고 아끼는 우리가 되었다고 감히 생각해봅니다. 하루하루 웃으며 지낼 수 있도록 제게 보내준 관심과 작은 배려들에 깊은 감사를 드리며, 함께한 모든 순간들이 배움이고 교훈이며 지식이 되었음을 의심치 않습니다.

대학원 생활을 함께 하지 못했지만 최선을 다해 도와주시고 조언을 해주신 건이형, 덕철이형에게 너무나 감사하고, 정말 힘들어서 지쳐있을 때마다 저한테 큰 위로와 힘이 되어주신 태혁이형, 연구실 후배인 현탁, 한승, 우영이에게도 감사의 말을 전합니다. 지금은 졸업을 하였지만 어릴적부터 함께 지내왔으며 이 논문이 완성되기 까지 본인의 일처럼 함께 해준 사랑하는 우열, 상봉에게는 이 세상에 존재하는 어떠한 말로도 표현할 수 없을 만큼 고맙다고 말하고 싶습니다.

연구분야에 대한 건설기술연구원의 김남원박사님, 정일문박사님, 유상연선생님에게도 많은 가르침과 조언 너무나 감사하다고 전하고 싶고, 대학원에 입학하여 새로운 분야에 대한 연구를 시작할 때 많이 낯설고 어려운 부분에 대하여 옆에서 많은 가르침과 조언을 아끼지 않으신 한국농촌공사에 안중기박사님, 지금도 어려운 분이시지만 가끔 보면 편하게 대해주시고 좋은 가르침을 주시는 박원배박사님께도 감사의 말씀을 전하고 싶습니다.

때로는 아버지처럼 형처럼 친구처럼 절 옆에서 응원해주신 길용형님에게 누구보다도 힘이 많이 되었다고 말씀드리고 싶습니다. 저와 함께 졸업하게 되는 대학원동기인 종완, 승호, 경남, 성협, 경태에게 축하한다고 말하고 전하고, 이번에 새로운 출



발을 위해 대학원에 입학한 한승, 준영, 양수에게 열심히 하라는 말을 전하고 싶습니다.

항상 자기 일처럼 도와줘서 걱정이 되는 친구 현구와 너무 남의 일처럼 도와줘서 걱정인 친구 상훈에게 고맙고 서로 일이 바쁘다 보니 자주 만나지 못하는 석현, 은호, 은상, 일준, 건용, 동운, 호진, 태중, 행건에게도 고마움을 전합니다. 학교생활하면서 같이 웃으면서 동고동락했었던 진호형, 희민형, 무철형, 희철, 행남, 채운, 태훈, 형석에게도 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 또한 내 곁에서 잡다한 일을 다 맡아서 걱정을 덜어주고 위로를 해 준 미성에게 이 논문으로나마 보답하고 싶습니다.

마지막으로 너무나 사랑하고 소중한 저희 가족  
아들의 말 한마디에 웃고 우시는 아버지, 어머니 제가 이 자리까지 설 수 있게 가장 많은 후원과 영원한 서포터이신 부모님께 정말 사랑한다는 말과 함께 이 논문으로 보답하고자 합니다. 바쁘다는 핑계로 따뜻한 전화한통 못해 드리고 소홀했던점이 자리를 비로소 용서를 구하겠으며, 매일 차갑게 대한 버릇없는 동생을 너무 아껴준 누나에게도 너무 고맙고 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다.

이제 대학원이라는 작은 등지에서 벗어나 사회라는 커다란 세상으로 발걸음을 떼려고 합니다. 고마운 사람들에게 항상 감사하는 마음 잃지 않고 더욱 발전하는 저, 한웅규가 될 수 있도록 앞으로도 노력하겠습니다.