



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

제주도 남부 주요 기저유출
구역의 수자원해석

濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

康 明 秀

2012年 8月

제주도 남부 주요 기저유출 유역의 수자원 해석

指導教授 楊 城 基

康 明 秀

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2012年 8月

康明秀의 工學 碩士學位 論文으로 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2012年 8月

A Study on Water Resource Analysis on
Major Base Runoff Regions of southern area
in Jeju Island

Myung-Su Kang

(Supervised by Professor Sung-Kee Yang)

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

2012. 8

This thesis has been examined and approved by

Thesis director, Won-Bae Park, Doc. of Jeju Development Institute

Thesis director, Sung-Kee Yang, Prof. of Civil & Ocean Engineering

Thesis director, Sang-Jin Kim, Prof. of Civil & Ocean Engineering

August. 2012

Department of Civil & Ocean Engineering
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF TABLES	iii
LIST OF FIGURES	v
Summary	vii
I. 서 론	1
1. 연구 배경 및 목적	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	2
2. 연구 동향	2
1.1 국외 연구동향	2
1.2 국내 연구동향	3
3. 연구 대상유역	4
4. 연구 방법	6
4.1 하천 유출량 관측	6
4.2 준 분포형 강우-유출 모형(SWAT) 적용	7
II. SWAT 모형의 이론적 배경	9
1. 강우-유출모형	9
2. SWAT 모형의 이론적 배경	11
2.1 모형의 개요	11
2.2 모형의 구조	12
2.3 기상	15
2.4 수문	15
2.5 추적	27
III. 최신 관측기기를 이용한 유출량 관측	30
IV. SWAT 모형의 입력자료 구축	32
1. 대상유역의 수치 지형자료 구축	32
1.1 DEM	32
1.2 유역 특성인자	33

1.3 토지피복도	37
1.4 토양도	38
2. 대상유역의 수문기상 자료 구축	40
2.1 기상자료	41
2.2 강우자료	44
V. SWAT 모형의 제주도 남부 주요 기저유출유역 적용	46
1. 매개변수 추정	46
2. 매개변수 민감도 분석	48
2.1 악근천 유역	48
2.2 강정천 유역	51
3. 목적함수	54
VI. 하천 실측유량을 이용한 SWAT 모의	57
1. 악근천의 유출량 산정	57
2. 강정천의 유출량 산정	59
VII. 결론 및 제언	61
VIII. REFERENCE	63
감사의 글	65

List of Tables

Table I -1. Summary of rivers of the basins to be studied	5
Table II -1. Classification of model according to hydrological process	10
Table II -2. Classification of soil group in SCS runoff curve method	17
Table II -3. Runoff curve index of natural region, CN	18
Table II -4. Input data according to PET calculating method	21
Table III -1. Baseflow discharge using ADCP	31
Table IV -1. Characteristics factor of the basins to be studied	33
Table IV -2. Rate and dimension by soil series at the basis of Akguen river	38
Table IV -3. Rate and dimension by soil series at the basis of Kangjung river	39
Table IV -4. Weather input data of the basin to be studied	41
Table IV -5. Status of meteorological post of the basins to be studied	41
Table IV -6. Weather data by month of Jeju meteorological post	42
Table IV -7. the status of rainfall observatory at the basins to be studied ..	44
Table IV -8. Situation of meteorological postof the basins to be studied	44
Table IV -9. Rainfall data by month of rainfall obsrvatory at the basin of watershed	44
Table V -1. Parameter in SWAT model	47
Table V -2. Value for analyzing the sensitiveness of hydrological parameters related to runoff	48
Table V -3. Rate of change of direct runoff according to the rate of CN_2 of parameter at Akguen basins except for a river	49
Table V -4. Rate of change of direct runoff according to the rate of ESCO of parameter at Akguen basins except for a river	50
Table V -5. Rate of change of direct runoff according to the rate of SOL_AWC of parameter at Akguen basins except for a river	51
Table V -6. Rate of change of direct runoff according to the rate of CN_2	

of parameter at Kangjung basins except for a river	52
Table V-7. Rate of change of direct runoff according to the rate of ESCO of parameter at Kangjung basins except for a river	53
Table V-8. Rate of change of direct runoff according to the rate of SOL_AWC of parameter at Kangjung basins except for a river	54
Table VI-1. Corrected parameter of the basin of Akguen river	57
Table VI-2. Reinforced parameter at the basin of Kangjung river	59

List of Figures

Fig. I -1. Basin for the study	5
Fig. I -2. Discharge measurement using ADCP	7
Fig. I -3. CTD-Diver	7
Fig. I -4. Flow chart of the study contents	8
Fig. II -1. Floodgate circulation about the part of land	13
Fig. II -2. Tracing process of SWAT model about the river	14
Fig. II -3. Oppressed/not-oppressed Aquifer	25
Fig. III-1. Site observation of the Gangjung and Akguen basin to be studied	30
Fig. IV-1. DEM of basin to be studied	32
Fig. IV-2. Altitude analysis map of the Akguen basin to be studied	34
Fig. IV-3. Altitude analysis map of the Gangjung basin to be studied	34
Fig. IV-4. Slope analysis map of the Akguen basin to be studied	35
Fig. IV-5. Slope analysis map of the Gangjung basin to be studied	35
Fig. IV-6. Slope direction analysis map of the Akguen basin to be studied	36
Fig. IV-7. Slope direction analysis map of the Gangjung basin to be studied	36
Fig. IV-8. Land-cover map of Akguen basin to be studied	37
Fig. IV-9. Land-cover map of Gangjung basin to be studied	38
Fig. IV-10. Soil map of Akguen basin to be studied	39
Fig. IV-11. Soil map of Gangjung basin to be studied	40
Fig. IV-12. Temperature data of Seogwi meteorological post	42
Fig. IV-13. Average wind speed data of Seogwi meteorological post	43
Fig. IV-14. Relative humidity data of Seogwi meteorological post	43
Fig. IV-15. Precipitation by month and by precipitation observatory of Oaedo river basin	45
Fig. V -1. Rate of change of direct runoff according to the rate of change of CN_2 of parameter of Akguen basin of a river	49
Fig. V -2. Rate of change of direct runoff according to the rate of change of ESCO of parameter of Akguen basin of a river	50
Fig. V -3. Rate of change of direct runoff according to the rate of change of SOL_AWC of parameter of Kangjung basin of a river	51
Fig. V -4. Rate of change of direct runoff according to the rate of change of CN_2 of parameter of Kangjung basin of a river	52
Fig. V -5. Rate of change of direct runoff according to the rate	

	of change of ESCO of parameter of Kangjung basin of a river ...	53
Fig. V-6.	Rate of change of direct runoff according to the rate of change of SOL_AWC of parameter of Kangjung basin of a river	54
Fig. VI-1.	Result of correcting the model of the basin of Akguen river	58
Fig. VI-2.	Result of runoff simulation of the basin of Akguen river	58
Fig. VI-3.	Result of runoff simulation of the basin of Kangjung river	60

Summary

Unlike most rivers in Jeju Province that become dry because of geological characteristic with excellent water permeability, Central Seogui River area always maintains flow of spring water, which results from base runoff nearby the coast. Base runoff of Akgeun-cheon and Gangjeong-cheon, major base runoff regions of Central Seogui, was computed using distributed SWAT model in order to establish methods for management and use of surface water.

As input data for SWAT model, hydrologic and weather data such as maximum and minimum temperatures, solar radiation, wind velocity, humidity, and precipitation were constructed with DEM (Digital Elevation Model) and soil type map. After simulation, correction of results was conducted after sensitivity analysis on 27 parameters using 20 observations between July 2011 and April 2012.

As a result of simulation with SWAT model, excellent results were shown on base runoff in general. However, better results can be deduced by conducting studies with more runoff data, continuous water level data, and precipitation data with consideration on errors in some water level data and lack of observation data in this study.

I. 서론

1. 연구배경 및 목적

1.1 연구배경

최근 기후변화로 인하여 전 세계적으로 물 부족현상이 대두되고 있는 가운데 우리나라 또한 물 부족국가로 분류되고 있다. 제주도는 수자원의 대부분을 지하수에 의존하고 있어 온난화에 따른 물 문제는 매우 민감한 문제일수 있다.

제주도는 투수성이 큰 현무암질 화산암을 기반으로 한 타원체 형태의 화산섬으로 형성되어 있다. 하천은 지방하천 60개와 소하천 83개가 분포하고 있으나 이들 중 대부분은 한라산 백록담을 중심으로 경사가 급한 남·북사면을 따라 비교적 짧은 유로를 형성하고 있다. 또한, 지형적 특성으로 인해 총 강우량의 약 절반이 투수성이 좋은 지하로 침투되어 풍부한 지하수가 함양되어 있다. 강우는 6월~9월에 집중되고 있으며, 이 기간 중에 하천의 지형적 특성으로 인해 홍수유출의 지속시간은 불과 수 시간에 지나지 않아 지표수의 이용과 개발에는 한계가 있는 실정이다(양: 2007, 정: 2008). 일부 하천의 경우 해안과 가까운 지점의 하상과 측벽에서는 용천수가 기저유출의 형태로 유출되고 있어 상시하천을 형성하고 있다. 이들 상시하천 중에서 외도천과 강정천은 1970년대부터 상수원으로 개발되어 이용되고 있다(문 등, 2004). 그러나 상시하천의 유속과 유량 등에 대한 연구·조사는 매우 미흡한 실정이며, 지표수 수자원의 이용과 관리를 위한 기초자료도 매우 부족한 편이다.

수자원을 지하수에 전적으로 의존하고 있는 제주도는 기후변화와 가뭄 등에 대비하여 상시하천수의 이용과 홍수유출시 지표수의 이용에 대한 체계적인 연구와 정밀한 하천유출 조사가 필요하다. 또한, 장래 지하수의 과도한 개발·이용으로 예상되는 지하수의 감소를 사전에 방지위해서도 지표수자원의 개발과 보전·관리를 위한 연구는 매우 중요하다.

1.2 연구목적

제주도는 투수성이 높은 수문지질학적 특성으로 인하여 상시적으로 유출이 있는 하천은 북부의 외도천과 옹포천을 비롯하여 남부의 연외천, 강정천, 악근천, 창고천, 중문천, 동홍천, 예례천, 북부지역의 외도천 등 총 9개이다. 이들 하천 중 서귀포의 강정천과 제주시의 외도천은 기저유출수를 취수하여 생활용수로 이용하고 있다.

본 연구에서는 제주도 남부에 위치한 기저유출유역인 중서귀수역의 강정천과 악근천의 기저유출량을 산정하기 위하여 다양한 최신 관측기기인 ADCP에 의한 현장 유량 측정결과를 이용하여 세계적으로 통용되고 있는 SWAT 모의치의 결과를 검토정하여 각각의 하천에 대한 유출량을 산정하였다.

이와 같은 연구 결과는 제주도의 물순환 해석과 물수지 분석, 수자원개발 및 이용, 수자원정책수립 등을 위한 중요한 기초자료로 이용될 것이며, 향후 기후변화에 대비한 효율적인 수자원의 이용 및 관리를 위한 정책 수립에도 기여할 수 있을 것이다.

2. 연구동향

2.1 국외 연구동향

Arnold 등 (1996)은 Illinois 유역의 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(정 2008).

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 늘려 소유역의 면적을 줄인 결과 유역출구지점에서의 총 유출량에는 거의 영향을 미치지 않지만 총 유사량의 경우는 이와 달리 44% 정도가 감소함을 보여 유역분할개수가 유사량에 민감하게 반응함을 밝혀내었다. 하지만 소유역을 몇

개로 분할해야 타당한지는 밝혀내지 못하였다(정 2008).

Lenhart 등 (2003)은 독일의 Frankfurt 북서쪽에 위치한 중간규모 유역인 Dill 유역에 SWAT-G 모형을 이용하여 토지이용변화에 따른 유출량과 영양물질의 변화량을 정량적으로 선정하였다. 산림이 감소하고 초지가 증가하여도 유출량과 유사량의 변화에 미치는 영향은 그다지 크지 않았지만 질산염의 양은 크게 증가함을 밝혔다(정 2008).

2.2 국내 연구동향

장대원 등 (2003)은 보정천 유역의 장기-유출 분석과 수질 모델링을 통하여 수자원단위지도 상의 기존 하천망을 표현하는 최적의 Threshold의 값을 시행착오법을 통하여 결정하였으며, 연구대상유역에 장기유출 특성을 모의한 결과 AV-SWAT 모형의 적용이 적절하였음을 나타냄은 물론 유역으로 유입되는 오염원을 점오염원으로 고려하였을 때와 Inlet으로 고려하였을 때의 오염정도를 모의하였다.

신현석 등 (2004)은 복합 중유역인 태화강 유역에서 AV-SWAT 모형을 이용하여 저류시설물 요소에 따른 영향분석을 위하여 다양한 시나리오를 개발하여 정량적인 분석을 수행하였고, 댐의 용수공급량 변동·댐 바닥에서의 수리전도도 변동·하천유지용수량 공급량에 따른 각각의 시나리오를 가지고 댐 직하류와 하구부에서의 년평균 유출량 변동, 계절 변동성을 정량적으로 산정하여 제시하였다.

김남원 등(2006)은 준분포형 장기유출모형인 SWAT과 3차원 분포형 지하수 모형인 MODFLOW를 통합하여 새로운 SWAT-MODFLOW 모형을 이용한 지표수-지하수 통합 유출을 모의하였다. SWAT-MODFLOW 결합모형은 경안천 수위관측소 유역에 시험적으로 적용한 결과, 포화대와 하천지류간의 상호작용이 경안천 유역의 유출량 산정에 중요한 역할을 한다는 것을 도출하였으며, 결합모형이 지하수두 및 함양량의 시공간적 변동성을 재현하는 등 광범위한 적용가능성을 보여주었다.

김남원 등 (2007)은 일 단위 유출 모의시 하도추적과정에서 발생할 수 있는 문제점을 분석하여 기존의 추적방법이 가지는 한계를 극복하고자 운동과 근사에 의한 비선형 저류방정식을 이용한 하도추적법을 본 연구에서 새롭게 제시하였다.

또한 이 기법을 장기유출모형인 SWAT에 탑재하여 실제 충주댐 유역에 유출모형을 수행함으로써 유출의 지체와 감쇠 등 하도추적의 영향을 현실적으로 모사할 수 있음을 입증하였으며, 장기유출모형의 일 단위 모의 시 하도흐름뿐만 아니라 유사량, 화학물질 거동 모의의 정확성 제고 전반에 기여 할 수 있을 것으로 판단하였다.

김남원 등 (2008)은 우리나라 특성에 맞도록 인위적, 자연적인 물순환 구조변화와 지표수-지하수 연계 해석 등을 개선의 일환으로 만들어진 장기유출 해석모형인 SWAT-K 에 설마천유역의 각 수문성분의 특성을 적용한 것으로 신뢰성 있는 실측치와 주요 수문성분을 비교·검토하였다. 연구결과 전적비교의 관측유량 자료를 이용한 검증결과는 매우 양호하였으며, 증발산 관측치와 모의치, 지하수 유출량 등을 비교하여 계산된 수문성분비의 적정성을 검토한 바, 모의치와 실측치의 상관성이 인정됨을 확인하였다.

정우열 (2008) 은 SWAT 모델을 적용하여 장기간에 걸친 유역(천미천, 외도천, 옹포천, 연외천)내의 유출량을 산정하였다. 연구 대상유역은 육지부와는 상이한 수문지질학적 특성을 가지는 제주도의 4개 유역에 대하여 민감도 분석을 실시 한 후 장기 유출량을 산정한 결과 SWAT 모형은 장기 일 유출량 모의에 대하여 전체적으로 우수한 결과를 나타냈다.

한용규 (2009) 는 제주도의 통합수문모델의 개발, 지속 가능한 수자원 개발 및 지하수 자원의 감소에 대처 할 수 있는 지표수 자원의 이용·개발에 관한 기초 연구로 제주도 북부지역의 외도천을 대상으로 SWAT모형을 적용하여 과거와 현재의 토지이용변화에 따른 유출량을 비교·산정하였다. 유출모의 결과 일 유출량 대상유역의 일 유출량 모의는 전반적으로 우수한 결과를 보이는 것으로 판단하였다.

3. 연구 대상유역

제주도의 하천은 대부분 건천이며 한라산 백록담을 중심으로 하여 남·북측에서 V자형 침식계곡을 따라 소규모로 지표하천이 발달하고 있다. 그러나 비교적 평탄한 현무암질 용암으로 구성되어 있는 동·서측 지역은 하천의 발달이 극히

불량한 편이다.

제주도의 수계는 16개 수역으로 구분되며, 하천은 남·북 사면에 방사형으로 형성되어 있다. 이들 하천 중 대부분의 하천은 평상시에 건천으로 지표수를 확인하기 힘들다. 강수량이 많을 시 한라산 주위의 급경사에 의해 하천수가 일시적으로 유출되지만 강수량이 적을 시에는 용암사이에 발달한 투수성지질구조에 의해 대부분 지하로 함양되며 홍수 시에만 강우가 하천에 의해 근해로 유입된다.

본 연구에서는 이러한 특이 지질구조로 대부분 건천으로 형성된 제주도 하천과는 달리 기저유출 성분인 용천수가 상시적으로 흐르고 있는 9개의 하천 중 제주도 남부 서귀포시의 주 식수원으로 사용되는 강정천과 이에 근접한 악근천에 대하여 연구를 수행하였다(Fig. I-1, Table I-1).

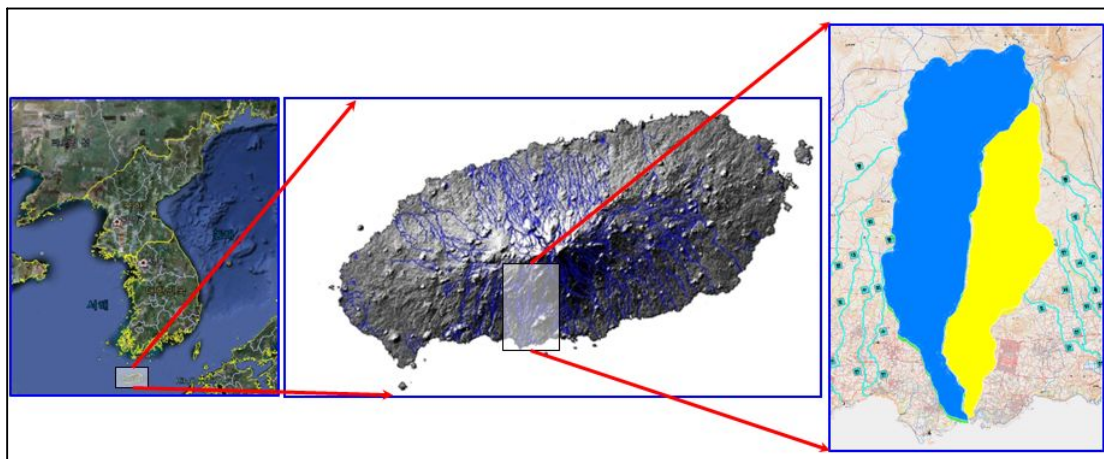


Fig. I-1. Basin for the study

Table I-1. Summary of rivers of the basins to be studied

하천명	수 계			하천등급	하천구간		하천연장 (km)	유로연장 (km)	유역면적 (km ²)	하천 지정근거 및 일자
	분류	제1지류	제2지류		기점	종점				
도순천 (강정천)	도순천			지방하천	서귀포시 하원동 산1번지선 (국립공원)	서귀포시 강정동 2692번지선 해안	13.00	16.63	36.54	제주1501호 (1982.11.20)
악근천	악근천			지방하천	서귀포시 강정동 52번지선	서귀포시 강정동 1541번지선 해안	9.00	17.37	27.54	제주1501호 (1982.11.20)

강정천은 한라산 서쪽 능선에서 발원하여 남류하다가 좌안측으로 지방하천인 고지천, 궁상천을 합류한 후 도순동 녹나무 자생지를 지나 강정동 해안으로 유입되는 지방하천으로 동경 126° 27' ~ 126° 30', 북위 33° 13' ~ 33° 21' 사이에 위치한다. 유로연장은 16.63km² 이고 유역면적은 36.54 km² 이며 하상경사는 1/12 ~ 1/37 로 비교적 급경사를 이루고 있으며 상류는 유로전체에 하천유량이 거의 흐르지 않는 건천이지만 하류는 지하수 용출 등으로 인하여 하천유출이 발생되고 있다(제주도, 2009).

악근천은 한라산 서쪽 능선에서 발원하여 남류하다가 1115번 도로를 지나 우안으로 지방하천인 영남천, 세초천을 합류한 후 강정동 해안으로 유입되는 하천으로 유로연장은 12.11 km² 이고 유역면적은 23.67km² 이다. 하상경사는 비교적 급경사를 이루고 있으며 상류는 유로 전체에 표면수가 흐르지 않는 건천이지만 하류는 지하수 용출등으로 인하여 유수를 형성하고 있다(제주도, 2009).

4. 연구방법

4.1 하천 유출량 관측

강정천과 악근천에 대하여 연구대상기간(2011. 07 ~ 2012. 04)동안 월2회 정기적으로 ADCP 유속계를 이용하여 하천의 유출량을 관측하고, 압력식 수위자동기록기인 Diver를 통해서 측정기간 동안의 각 연구장비 간의 수위자료를 구축하였다.

1) ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)를 활용한 유출량 관측

ADCP는 비접촉식으로 3차원 유속과 수심자료를 매우 효율적이고 빠르게 측정하며 그 자료의 공간 및 시간적 해상도는 기존의 전통적인 속도 측정방법과 비교하면 매우 세밀하다. ADCP를 활용한 유량관측은 현존하는 유량 관측 기법 중 매우 정확한 기법으로 알려져 있으며 미국의 경우 지리조사국 (USGS)에서의 약 57%의 유량관측소에서 수위-유량 곡선 구성을 선박, 케이블, 교량 등에서 실시한 ADCP 관측을 통해 이루어지고 있으며 그 비중은 계속 높아지고 있다 (Muste 등, 2007).

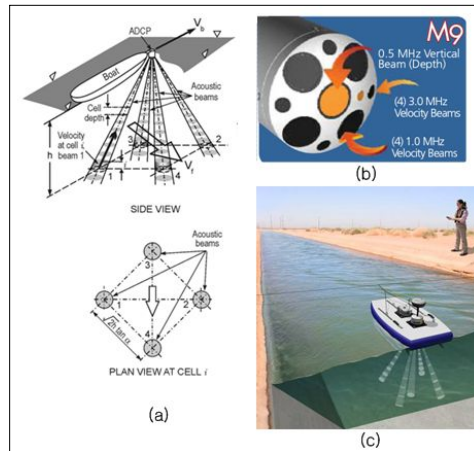


Fig. I -2. Discharge measurement using ADCP

2) 압력식 수위자동기록기(Diver)를 활용한 수위 관측

유출량 관측자료를 이용하여 연구대상유역에 수위-유량 관계곡선을 작성하고 DIVER 압력식 수위계를 설치하여 연구대상기간 동안의 연속적인 수위자료를 확보하여 최종적으로 연구대상기간 동안의 유출량 자료를 확보하여 모델의 결과 분석에 이용한다.



Fig. I -3. CTD-Diver

4.2 준 분포형 강우-유출 모형(SWAT) 적용

연구 대상유역에 대한 유출량 산정을 위하여 모델의 입력자료인 수문·기상자료를 구축하고, SWAT 모델을 적용하여 유출을 모의하였다. 유출에 관련한 매개

변수들을 선정하여 민감도 분석을 실시하였으며, 민감도 분석을 통해 유출량에 대한 보정·검정을 수행하였다. 또한 모의치와 실측치 간 비교를 통한 검·보정을 실시한 후 연구대상 하천에 대한 유출모의 결과를 분석하였다. 연구내용의 흐름은 Fig. I-4 와 같다.

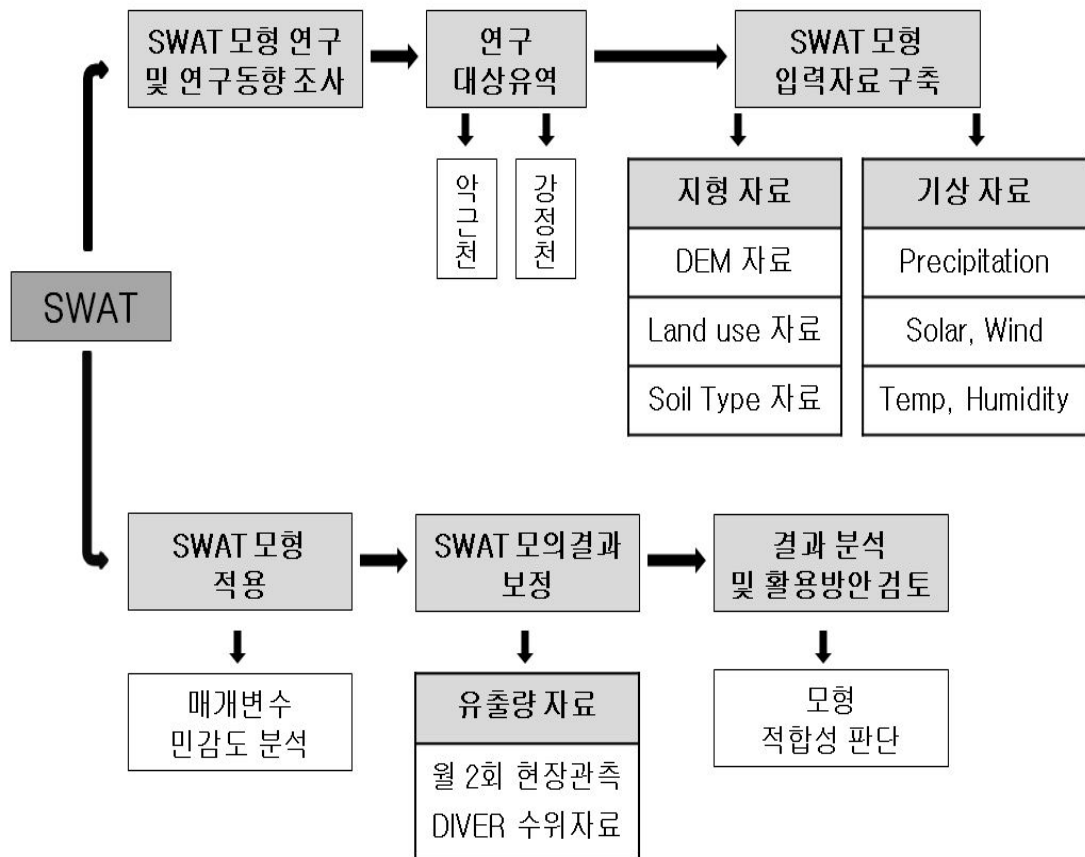


Fig. I-4. Flow chart of the study contents

II. SWAT 모형의 이론적 배경

1. 강우-유출 모형

수문모형의 주된 분류기준으로 전원유출모형과 도시유출모형, 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 변화를 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-유출모형은 완벽하게 입력자료, 경계조건, 유역의 지형적 특성 등의 공간적 변화를 나타내는 자료가 부족하므로 집중형과 분산형이 합해진 혼합형 강우-유출 모형의 범주에 포함되는 경우가 많다. 강우사상의 영향에 따라서 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 II-1 은 사상모형과 연속모형의 구분에 따른대표적인 강우-유출모형을 나타낸 것이다. 강우-유출 모형을 적용하는 유역의 공간적 크기에 따라 유역 면적이 100km² 이내인 경우에는 소유역 모형, 100~1,000 km² 에서는 중유역 모형, 1,000km² 이상에서는 대유역 모형으

로 구분할 수 있고, 적용 시간간격에 따라 시간 모형, 일 모형, 월 모형, 년 모형으로 구분할 수 있다.(Singh, 1995)

Table II-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 여러개의 매개변수를 처리해야 하는 복잡한 모형에 이르기까지 다양한 형태의 모형들이 개발되어 있으며, 기존의 대표적인 유출모형으로는 HEC-1, SSARR, SWMM, SWAT 등을 들 수 있다. HEC-1 모형은 간단하여 사용자가 사용하기 편리하고 모의 결과의 신뢰성 또한 높아 유역종합치수계획이나 하천정비기본계획의 홍수 모의시 널리 사용되는 모형이다. 하지만 단기호우사상에 의한 유출모형의 적용성

을 높지만 모의기간이 몇 년 동안인 연속유출모형은 불가능하다. SSARR 모형은 모의시간단위가 0.1 시간에서 24시간까지 가능하며 연속유출모형으로서 하도유출 모의 저수지모의가 가능하다. 하지만 SSARR 모형은 집중형 모형이어서 모의결과와 정밀도가 분산형보다 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 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 작성된 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 계산 단위로서 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. SWAT 모형의 이론적 배경

2.1 모형의 개요

SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형은 준분포형 장기-강우 유출모형으로 유역의 서로 다른 표면특성을 반영할 수 있도록 소유역으로 나누고 소유역내에서 공간적으로 단일한 토양 특성과 토지이용을 가진 수문학적 반응단위

(Hydrologic Response Unit, HRU)로 세분한다. 그리고 물의 거동, 유사이동, 작물의 성장, 영양물질 순환 등을 모의하기 위하여 유역내의 기상, 토양특성, 지형, 식생과 토지관리 방법 등을 입력자료로 이용한다. 유역의 수문에 대한 모의는 유출, 유사, 영양물질의 이동을 정확히 예측하기 위하여 크게 수문순환의 토지부분과 수문순환의 물 혹은 추적부분으로 나누며 이는 다시 수문 부모형, 토양유실 부모형, 영양물질 부모형, 하도추적 부모형의 4가지로 구분할 수 있다. 수문 부모형은 각 HRU에서 모형화의 근간이 되는 물수지 방정식에 근거하여 일단위로 강우량, 침투량, 증발산량과 지표면 유출량을 산정하고 토양침식과 유사량은 수정 범용토양손실공식(Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE)을 적용하여 분석한다. 오염원의 경우 여러 형태로 전이되는 질소와 인을 모형화한 영양물질, 살충제 등 유기화학물질의 이동 및 과정을 통해 예측하며 하도추적부분에서는 하천에서의 흐름을 추적하는 외에도 수질성분에 영향을 미치는 하천과 하상 바닥의 화학물질의 운송을 모의한다.

2.2 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. II-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 근

거를 두고 강수, 증발산, 지표 유출, 기저 유출, 지하수 등에 대한 모의를 각 수문반응단위 별로 계산 할 수 있다.

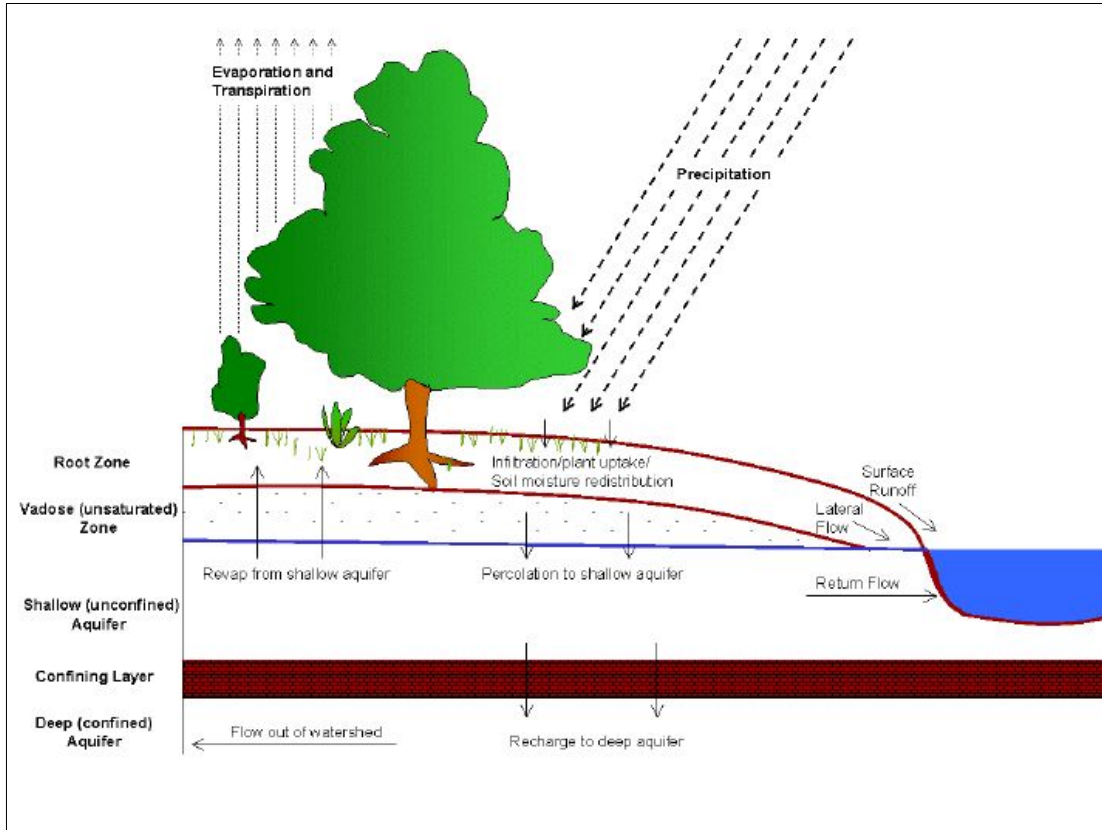


Fig. II -1. Floodgate circulation about the part of land (Arnold, 2000)

SWAT 모형에서 사용하는 물수지 방정식은 다음 식 (2.1)과 같다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{t=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (2.1)$$

여기서, SW_t : 최종일의 초양수분량(mmH_2O)

SW_0 : 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 지하천으로의 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.

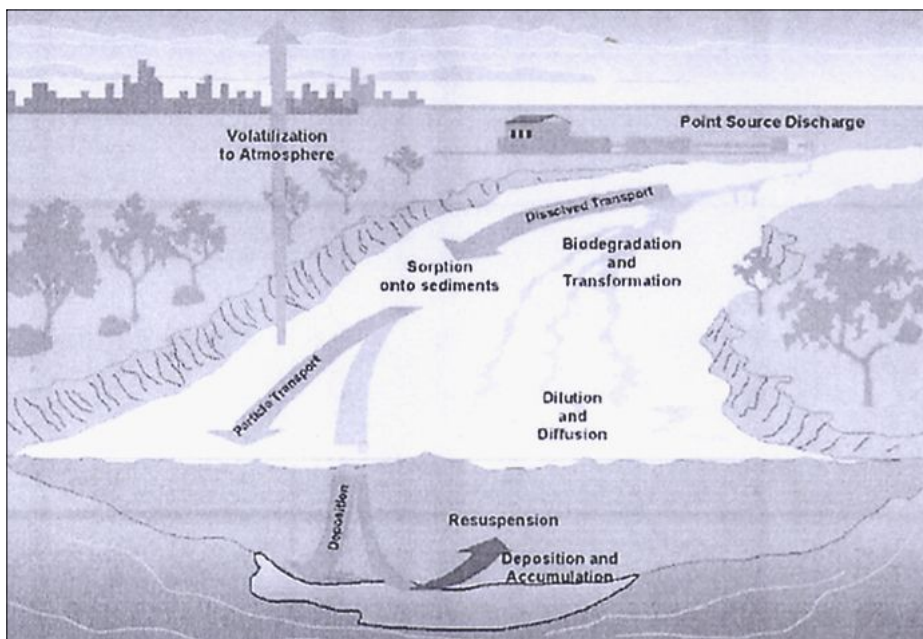


Fig. II-2. Tracing process of SWAT model about the river(Arnold, 2000)

2.3 기상

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

2.4 수문

강수가 내리면 식물의 가지나 잎에 의해 차단되고 부착되거나 지표면에 떨어진다. 지표면의 물은 토양층으로 침투되거나 유출로 지표면을 흐른다. 상대적으

로 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 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 (2.2)와 같다. (SCS, 1972)

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_s + S)} \quad (2.2)$$

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 (2.3)으로 정의된다. 일반적으로 초기손실 I_a 는 보통 $0.2S$ 와 같으며 이를 식 (2.2)에 대입하면 식 (2.4)이 되며 유출은 $R_{day} > I_a$ 일 경우에만 발생한다.

$$S = 25.4 \left(\frac{100}{CN} - 10 \right) \quad (2.3)$$

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} - 0.8S)} \quad (2.4)$$

그러나 실제 토양의 성질의 양적인 표현이 어렵기 때문에 SCS는 토양의 침투능을 기준으로 수문학적 토양군 Table II-2 와 유역의 토지이용 상태 및 식생 피복 처리상태를 Table II-3에 분류하였다.

Table II-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 II-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 사용자는 일단위 이하(sub-daily)의 강우자료를 입력해야 한다.

Green & Ampt Mein Larson 침투율은 식 (2.5)과 같다.

$$f_{\infty,t} = K_e \cdot \left(1 + \frac{\psi_{wf} \cdot \Delta\theta_v}{F_{\infty,t}}\right) \quad (2.5)$$

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 첨두 유출량(Peak runoff rate)

첨두 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 첨두 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 대기 로 증산(蒸散)되는 수증기량 등 물이 대기중의 수증기로 되는 모든 과정을 의미

한다. 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 (2.6)와 같다.

$$can_{day} = can_{mx} \cdot \frac{LAI}{LAI_{mx}} \quad (2.6)$$

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 II-4와 같다.

Table II-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 (2.7)과 같다.

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{\neq t} - G) + \rho_{air} \cdot c_p \cdot [e_z^0 - e_z] / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)} \quad (2.7)$$

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), r_c : 식생피복저항(s/m)

γ : 습도상수(the psychrometric constant) (kPa/°C)

r_a : 대기층의 확산저항(공기역학저항) (s/m)

Priestley-Taylor Method : Priestley와 Taylor(1972)는 지표면이 습한 경우 사

용할 수 있는 식(2.8)을 개발하였다. 주위 환경이 습한 경우, 다음과 같이 공기역학 요소는 제거하고, 에너지 요소는 계수($\alpha_{pet} = 1.28$)를 곱하였다.

$$\lambda E_0 = \alpha_{pet} \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot (H_{\neq t} - G) \quad (2.8)$$

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

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

γ : 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), SWAT에서 사용된 형태는 1985년 발표되었다(Hargreaves 등, 1985).

$$\lambda E_0 = 0.0023 \cdot H_0 \cdot (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} \cdot (\overline{T_{av}} + 17.8) \quad (2.9)$$

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

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

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

③ 실제증발산(Actual evapotranspiration)

잠재증발산이 결정되면 실제증발산이 계산된다. SWAT에서는 우선 식생피복

에 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 실제 증발량을 산정할 때, 피복저류로부터 가능한 많은 수분을 제거한다.

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

$$E_a = E_{cam} = E_0 \quad (2.10)$$

$$R_{INT}(f) = R_{INT}(i) - E_{cam} \quad (2.11)$$

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,

$$E_{cam} = R_{INT}(i) \quad (2.12)$$

$$R_{INT}(f) = 0 \quad (2.13)$$

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.

$$E'_s = \min\left[E_s, \frac{E_s \cdot E'_0}{E_s + E_t}\right] \quad (2.14)$$

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 침투(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 운송

할 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. II-3 은 두 가지 형태의 대수층을 나타낸 것이다.

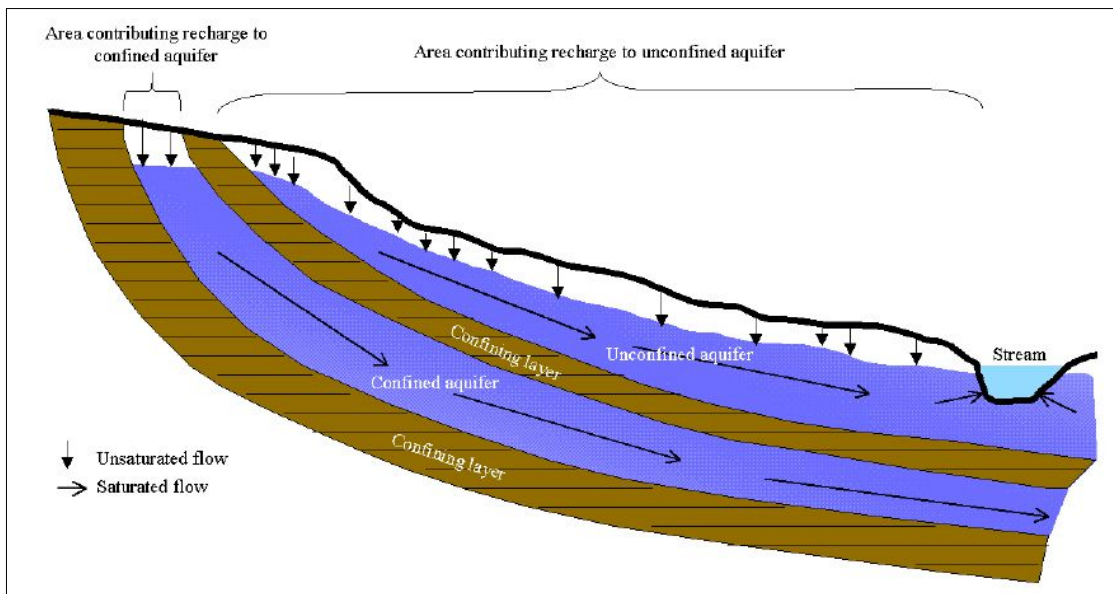


Fig. II-3. Oppressed/not-oppressed Aquifer(Dingmanm 1994)

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 얕은 대수층(Shallow Aquifer)

얕은 대수층의 물수지 식은 다음과 같다.

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrg} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{deep} - w_{pump.sh} \quad (2.15)$$

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.

$$aq_{dp,i} = aq_{dp,i-1} + w_{deep} - w_{pump,dp} \quad (2.16)$$

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 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 전환

하는 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.

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.

$$V_{in} - V_{out} = \Delta V_{stored} \quad (2.17)$$

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.

$$q_{out,2} = SC \cdot q_{in,ave} + (1 - SC) \cdot q_{out,1} \quad (2.18)$$

여기서, $q_{out,2}$: 종점에서의 유출량(m^3/s) ,

$q_{out,1}$: 시점에서의 유출량(m^3/s)

$q_{\in, out}$: 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 X 는 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.

Ⅲ. 최신 관측기기를 이용한 유출량 관측

제주도 주요 기저유출하천인 중서귀수역(강정천 및 악근천 유역)을 대상으로, 연구대상기간(2011. 07 ~ 2012. 04) 동안 하천의 유출량을 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) 유속계를 이용하여 매월 2회 현장 관측을 실시하여 정밀한 유량관측 자료를 구축하였다.

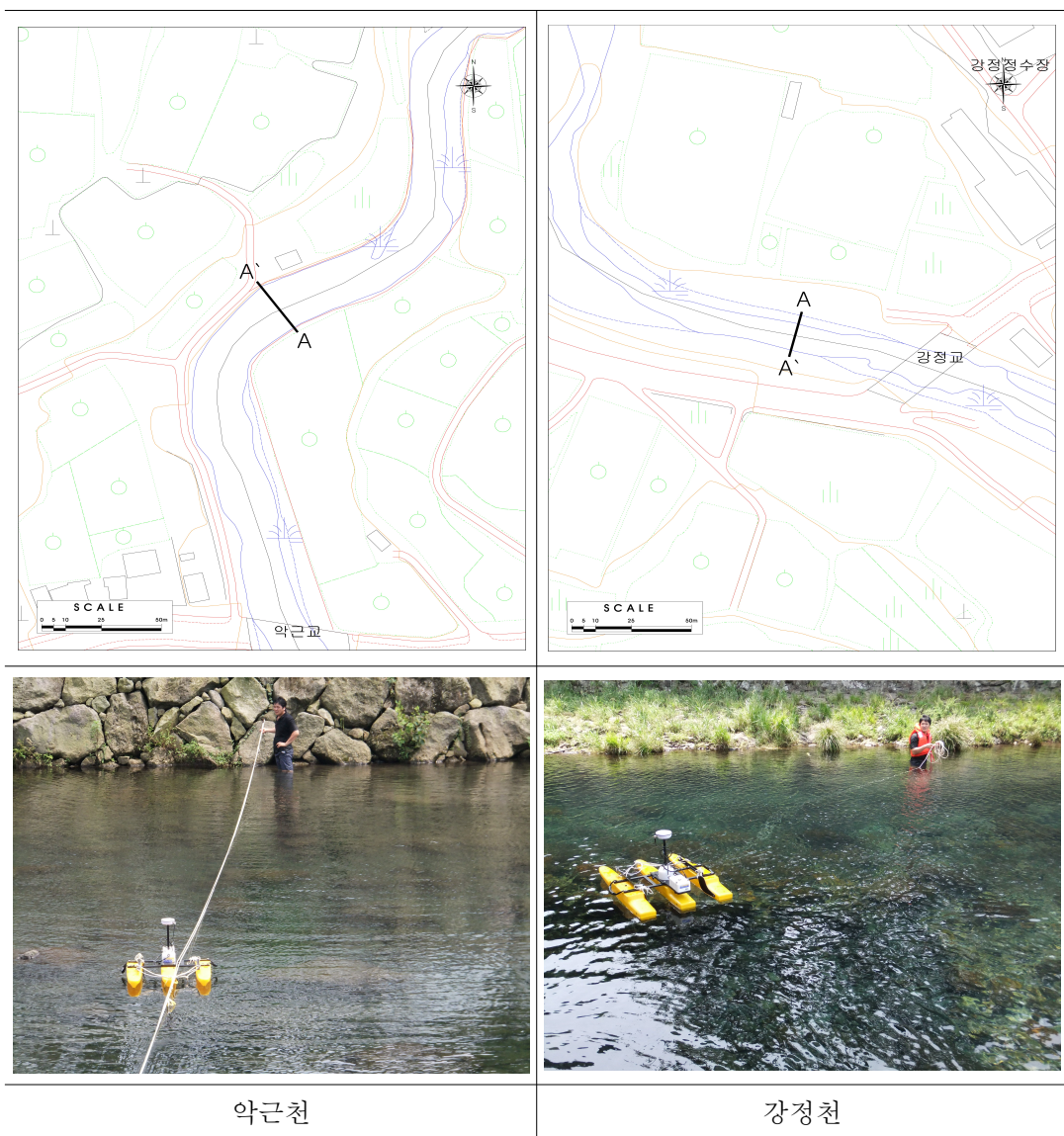


Fig. III-1. Site observation of the Gangjung and Akguen basin to be studied

Table III-1. Baseflow discharge using ADCP

관측일자	강정천	악근천
	ADCP (m ³ /sec)	ADCP (m ³ /sec)
2011.07.08	-	-
2011.07.22	1.025	1.2453
2011.08.06	1.304	1.3103
2011.08.19	1.309	1.4788
2011.09.02	1.104	1.5405
2011.09.16	1.115	1.3603
2011.09.30	1.188	1.1693
2011.10.14	-	-
2011.10.28	0.864	0.7400
2011.11.11	0.828	0.7330
2011.11.25	-	-
2011.12.09	0.661	0.7023
2011.12.23	0.599	0.5218
2012.01.06	0.519	0.614
2012.01.20	0.540	0.383
2012.02.03	0.455	0.324
2012.02.16	0.285	0.105
2012.03.02	0.354	0.226
2012.03.16	0.333	0.334
2012.03.31	0.388	0.385
2012.04.13	0.550	0.323
2012.04.27	0.819	0.827

IV. SWAT 모형의 입력자료 구축

1. 대상유역의 수치 지형자료 구축

1.1 DEM

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 arcInfo를 이용해 가공하여 사용하였다. DEM 분석결과 제주도는 0~1950 표고를 가지고 있으며, 평균표고는 283.69m, 유역의 평균 경사는 9.04%로 확인되었다(Fig. IV-1).

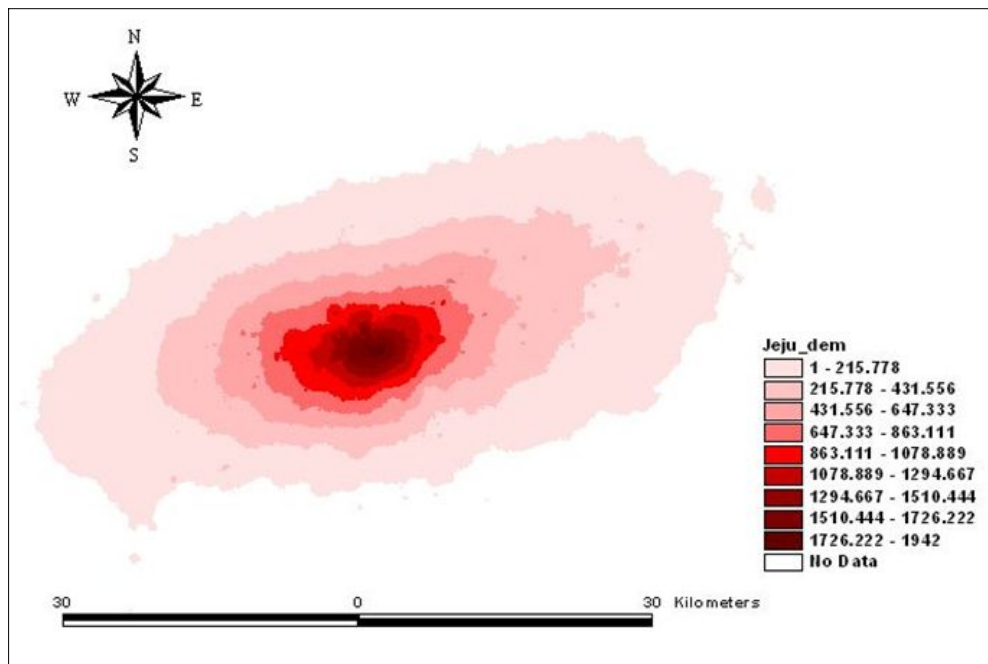


Fig. IV-1. DEM of basin to be studied

1.2 유역특성인자

연구대상 유역의 유출규모 파악 및 수문사항 분석에 유역특성인자의 값은 필수적이다. 유역면적 및 유로연장은 유역의 유출량을 산정하는데 있어서 가장 중요한 요소이며, 유역의 형상계수는 유역의 형태를 나타내는 무차원의 수치로서 형상계수가 1.0에 가까울수록 유역의 형상은 정방형에 근접하며, 형상계수가 클수록 유출의 집중성향이 매우 크므로 침투홍수량이 크게 발생된다. 반면에 형상계수가 작으면 유출의 집중성향도 약해지며 따라서 침투홍수량이 비교적 적게 나타날 것으로 예측 할 수 있다.

악근천유역의 유역면적은 22.96km^2 으로 분석되었으며, 최장 유로 연장은 15.60km 로 분석되었고, 유역의면적을 최장유로연장으로 나눈 값인 유역평균폭은 1.472km 으로 분석되었으며, 평균고도는 451m , 하천의 형상계수는 0.094 으로 분석되었다. 강정천유역의 유역면적은 37.66km^2 으로 분석되었으며, 최장 유로 연장은 17.61km 로 분석되었고, 유역의면적을 최장유로연장으로 나눈 값인 유역평균폭은 2.138km 으로 분석되었으며, 평균고도는 769m , 하천의 형상계수는 0.121 로 분석되었다(Table IV-1).

Table IV-1. Characteristics factor of the basins to be studied

구분	유역면적 (km^2)	유로연장 (km)	유역평균폭 (km)	평균고도 (m)	형상계수 (A/L^2)
악근천유역	22.96	15.60	1.472	451	0.094
강정천유역	37.66	17.61	2.138	769	0.121

악근천 유역의 표고분석 결과 500m 이하는 전체 유역의 59.4% 를 차지하고 있으며 $500\text{m}\sim 1,000\text{m}$ 지역 31.5% , 1000m 이상인 지역은 9.18% 로 분석되었고, 강정천 유역의 표고분석 결과 500m 이하는 전체 유역의 35.1% 를 차지하고 있으며 $500\text{m}\sim 1,000\text{m}$ 지역 32.6% , 1000m 이상인 지역은 32.32% 로 분석되었다(Fig. IV-2, 3).

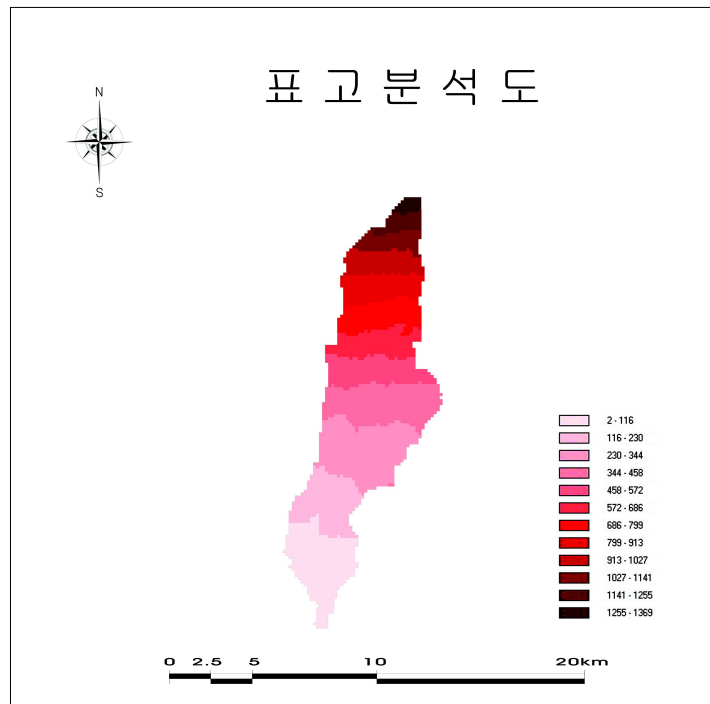


Fig. IV-2. Altitude analysis map of the Akguen basin to be studied

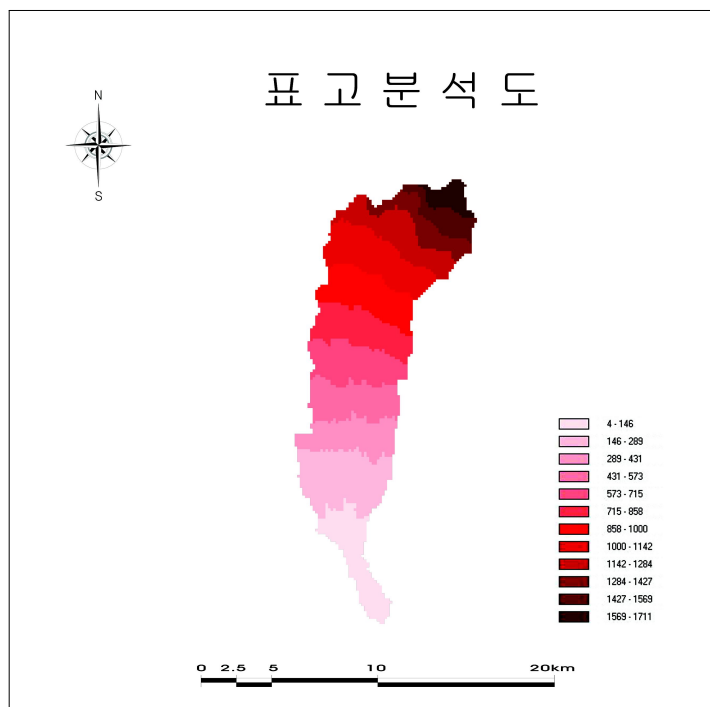


Fig. IV-3. Altitude analysis map of the Gangjung basin to be studied

악근천 유역의 경사분석 결과 5° 이하의 평탄지가 32.12%, 5~10° 지역이 44.24%, 10°이상의 지역의 23.64%로 분석되었고, 강정천 유역의 경사분석 결과 5° 이하의 평탄지가 23.5%, 5~10° 지역이 50.5%, 10°이상의 지역의 26%로 분석되었다(Fig. IV-4, 5).

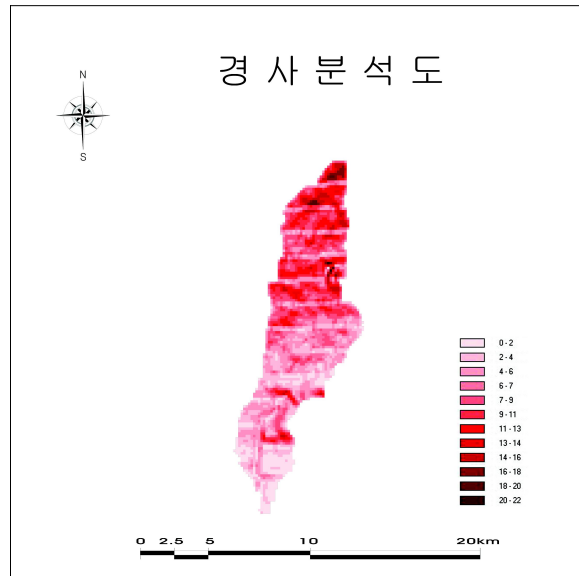


Fig. IV-4. Slope analysis map of the Akguen basin to be studied

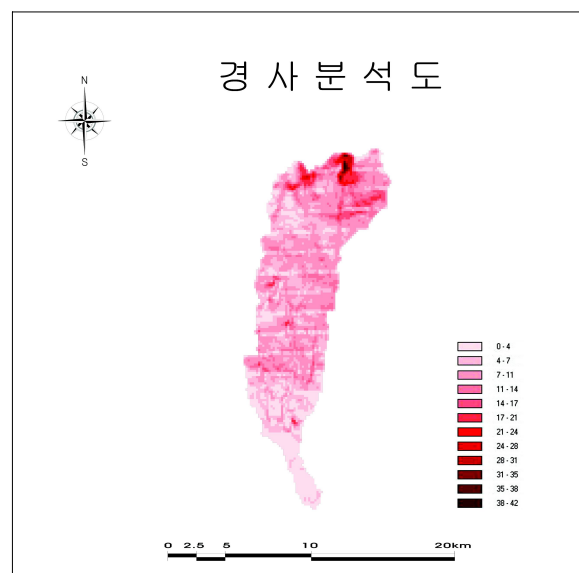


Fig. IV-5. Slope analysis map of the Gangjung basin to be studied

악근천 유역의 방향성에 대하여 분석한 결과 유역평균적으로 남향 방향이 20.4%, 남서향 방향이 11.4%으로 나타나며 전체적으로 고른 분포를 이루며 방향성을 띠고, 강정천 유역의 방향성에 대하여 분석한 결과 유역평균적으로 남향 방향이 16.6%, 남동향 방향이 12.8%으로 나타났다 (Fig. IV-6, 7).

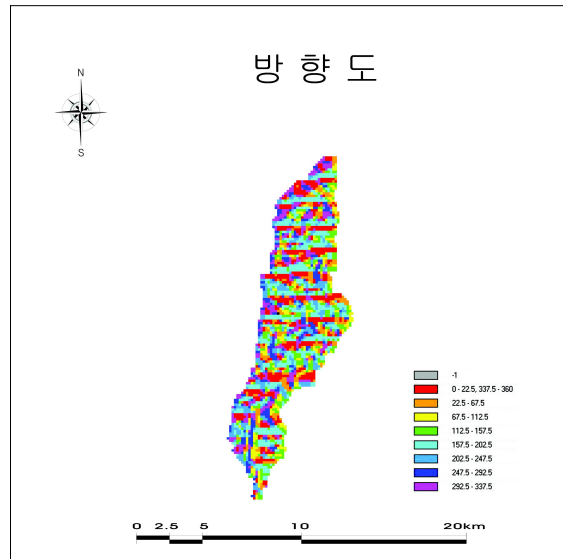


Fig. IV-6. Slope direction analysis map of the Akguen basin to be studied

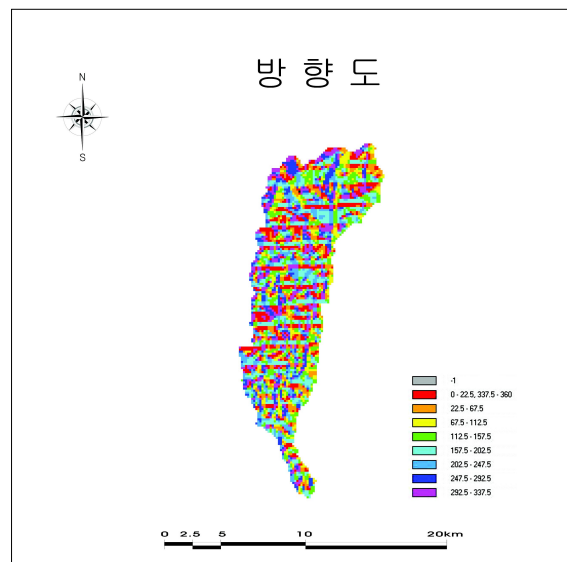


Fig. IV-7. Slope direction analysis map of the Gangjung basin to be studied

1.3 토지피복도(Landuse map)

토지피복도는 국가수자원관리 종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>) 제공하는 토지피복자료를 이용하였다. 이용된 토지피복자료는 2000년 Landsat 위성영상을 이용하여 피복분류된 자료이며, wamis에서 제공하는 지형공간 래스터 파일은 arcinfo의 grid파일을 shape 파일의 형태로 변환하였다. 토지피복도 자료를 Arcview 프로그램을 이용하여 구축하였으며, 구역별로 격자크기는 100m×100m으로 설정하여 모형의 입력자료로 사용하였다.

약근천 유역의 토지피복상태는 산림지 76.99%, 과수원 16.89%, 초지 2.74%, 주거지 3.21% 기타 0.17% 순으로 차지하고 있는 것으로 분석되었다(Fig. III-8).

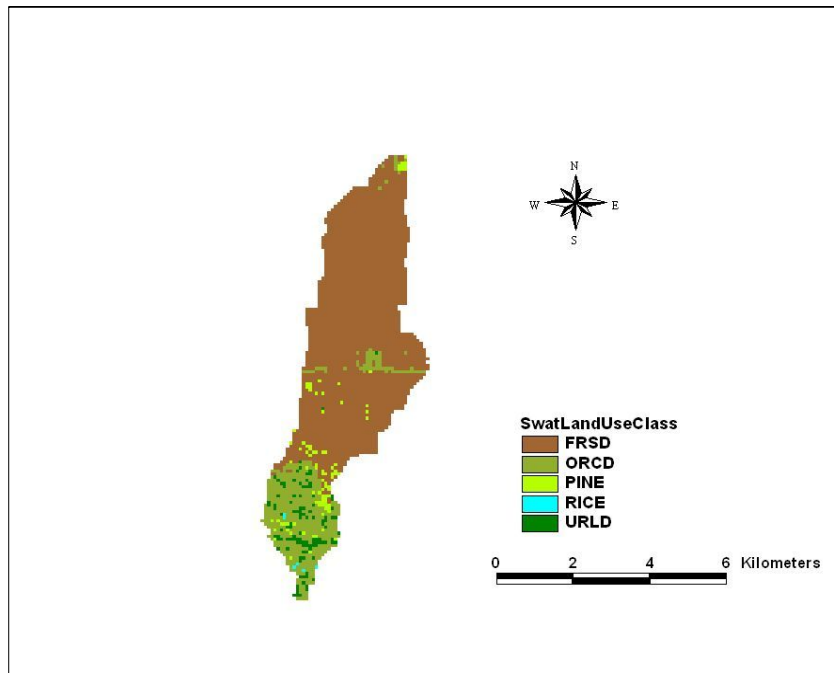


Fig. IV-8. Land-cover map of Akguen basin to be studied

강정천 유역의 토지피복상태는 전체 유역면적 중 산림지역이 76.5%, 과수원이 12.5%, 초지 9.34%, 주거지 1.59%, 기타 면적 0.07% 순으로 분포하고 있는 것으로 분석되었다(Fig. III-9).

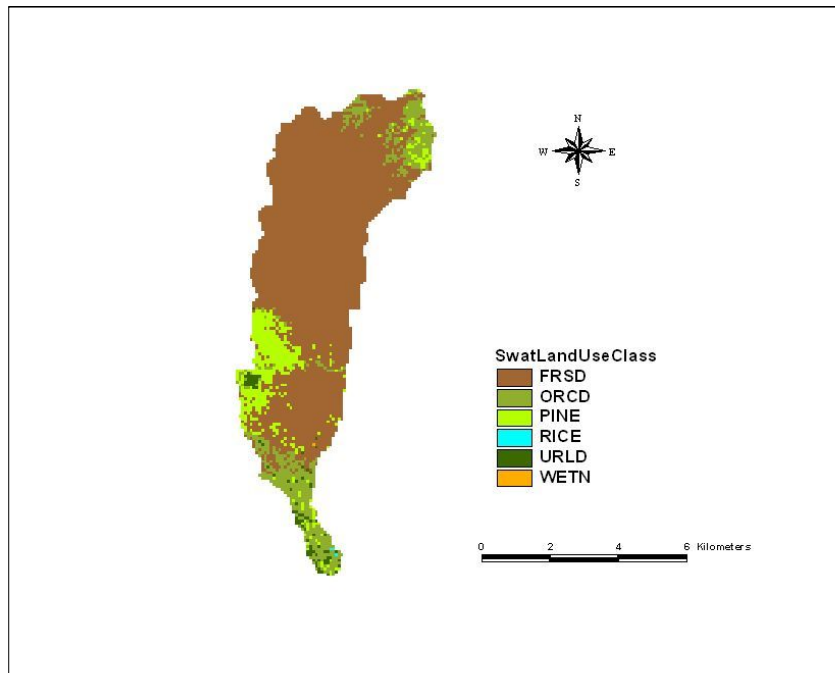


Fig. IV-9. Land-cover map of Gangjung basin to be studied

1.4 토양도(Soil Type 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 하천 유역별로 토양도(Soiltype map)자료를 Arcview 프로그램을 이용하여 구축하였으며, 유역별로 격자크기는 100m×100m 으로 설정하여 모델의 입력자료로 사용하였다.

악근천 유역의 토양통은 흑악통 41.85%를 비롯하여 제주통, 동귀통, 오라통, 그외 통의 순서로 많은 분포를 보이고 있다(Table. III-2, Fig. III-10).

Table IV-2. Rate and dimension by soil series at the basis of Akguen river

토양통	흑악통	제주통	동귀통	오라통	그외	계
비율	41.85%	16.16%	7.21%	6.56%	28.22%	100%
SCS토양군	A	C	C	C	-	-

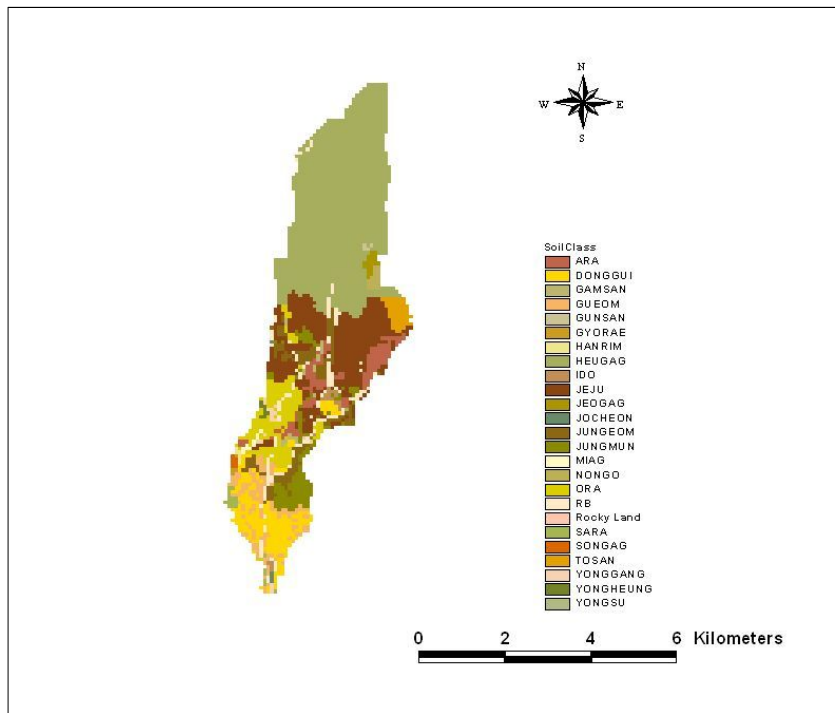


Fig. IV-10. Soil map of Akguen basin to be studied

강정천 유역의 토양통은 흑악통이 38.34%를 차지하고 있으며, 중문, 논고, 노로, 그외 통의 순서로 분포를 보인다(Table. III-3, Fig. III-11).

Table IV-3. Rate and dimension by soil series at the basis of Kangjung river

토양통	흑악통	중문통	논고통	노로통	그외	계
비율	38.34%	13.24%	12.81%	8.94%	26.67%	100%
SCS토양군	A	C	B	B	-	-

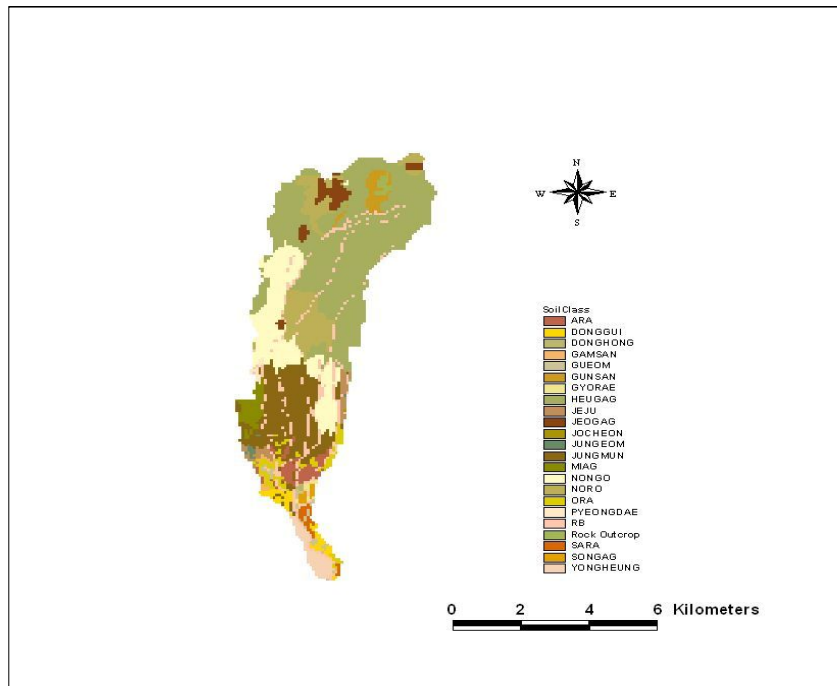


Fig. IV-11. Soil map of Gangjung basin to be studied

2. 대상유역의 수문기상자료 구축

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 선정한다.

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 있

다. 유역에 SWAT 모델을 적용하기 위하여 필요한 대상유역의 자료는 Table III-4 와 같다.

Table IV-4. Weather input data of the basin to be studied

Station data	Input data	
	강정천	악근천
Pa_pre.dbf	Seo_P, Wekseorem_P, Hawon_P	
Pa_climate.dbf	Seo_C	
Pa_hum.dbf	Seo_H	
Pa_solar.dbf	Seo_S	
Pa_wind.dbf	Seo_W	

2.1 기상자료

기상자료는 제주도 4개의 기상관측소 중 연구대상 유역에 해당하는 서귀포 기상대 자료를 사용하였으며, 관측소 현황은 Table III-5 와 같다.

Table IV-5. Status of meteorological post of the basins to be studied

관측소	위도	경도	해발고도(m)	관측개시일
서귀포	33°15'N	126°34'E	50.5	1961.1

서귀포시 서귀동에 위치한 서귀포기상대에서는 1961년부터 관측이 이루어 졌으며, 서귀포기상대에서 관측되는 월별 기상자료의 평년값은 Table III-6 에 나타내었다.

Table IV-6. Weather data by month of Jeju meteorological post

요소	평균기온 (°C)	최고기온 (°C)	최저기온 (°C)	강수량 (mm)	평균풍속 (m/s)	평균습도 (%)	일조시간 (hr)
01월	6.8	10.7	3.6	61	2.8	62.8	152.2
02월	7.8	11.6	4.4	77.1	3	62.1	152.6
03월	10.6	14.4	7.1	131.2	3.2	62.4	174
04월	14.8	18.5	11.3	174.9	3	64.5	190.9
05월	18.6	22	15.3	205.8	2.7	69.9	199
06월	21.7	24.6	19.2	276.9	2.7	78.2	144.2
07월	25.6	28.3	23.5	309.8	2.7	84.1	142.1
08월	27.1	30.1	24.6	291.6	3	79	184.2
09월	23.9	27.4	21.1	196.6	3.3	72.5	176.1
10월	19.3	23.4	15.9	81.6	3	63.9	207.1
11월	14.1	18.2	10.6	71.4	2.8	63.2	170.5
12월	9.3	13.2	5.9	45.1	2.8	62.2	161.8

서귀포 관측소의 모델링 입력 기상자료 중 최고기온 및 최저기온에 대하여 분석한 결과 연구대상기간(2009.1.01~2011.12.31)까지 일 최고기온은 35.5°C로 나타났고 일 최저기온은 -3.9°C로 나타났으며, 입력자료는 Fig. III-12 와 같다.

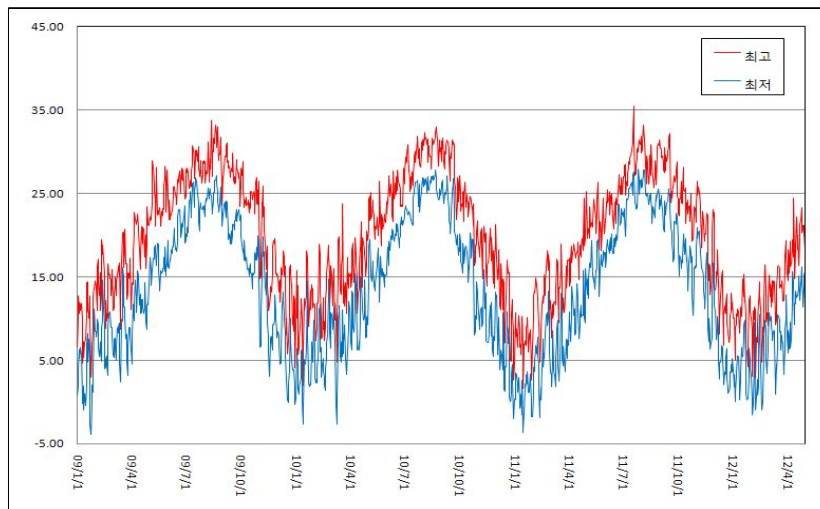


Fig. IV-12. Temperature data of Seogwi meteorological post

서귀포 관측소의 연구대상기간동안의 평균풍속자료를 분석한 결과 최대 일평균 풍속은 10.3m/sec로 나타났으며 일반적으로 겨울에 일평균 풍속이 높고 여름에 낮은 것으로 분석되어 계절적인 경향성을 띄고 있다(Fig. III-13).

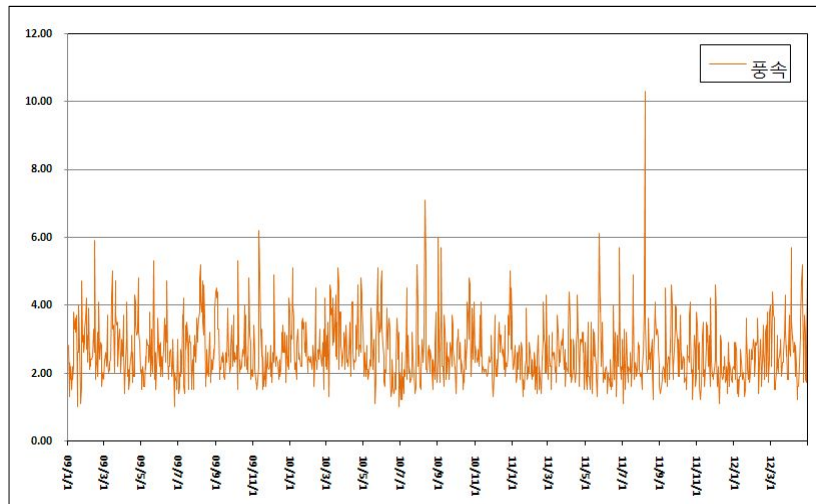


Fig. IV-13. Average wind speed data of Seogwi meteorological post

서귀포 관측소의 연구대상기간동안의 상대습도자료를 분석한 결과 최대 상대습도는 96.90%로 나타났으며, 상대습도 역시 계절에 따른 경향성을 보이고 있는 것으로 분석되었다(Fig. III-14).

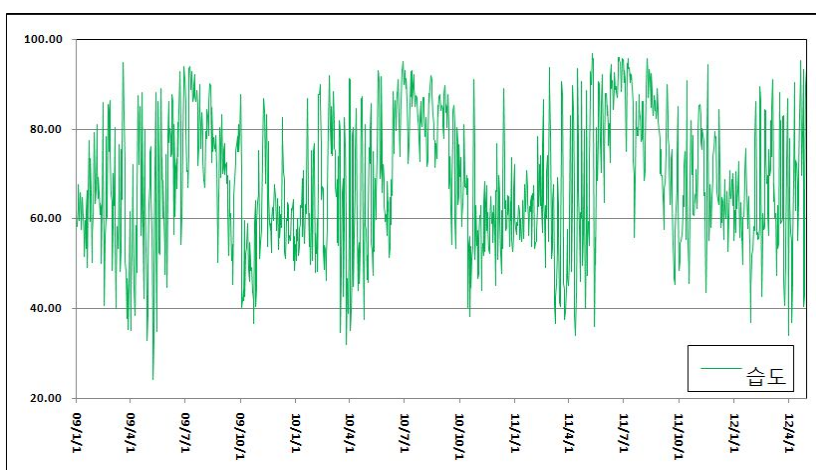


Fig. IV-14. Relative humidity data of Seogwi meteorological post

2.2 강우자료

연구대상 유역의 강우자료는 제주도에 설치된 AWS 24개 지점 중 대상유역에 해당하는 3개지점(윗세오름, 하원, 서귀포)의 자료를 사용하였다(Table III-7, 8). 연구대상 유역의 면적은 강정천 유역이 38.24 km² 이고 약근천 유역은 23.51 km² 이며, 이 연구대상 유역에 대해서 2009년 1월부터 2011년 12월까지 각 강우관측소별 자료를 이용하여 모형에 적용하였다. 각 유역에 대한 모형의 적용기간 내의 월별 강우 자료는 (Table III-9, Fig. III-15) 와 같다.

Table IV-7. The status of rainfall observatory at the basins to be studied

유역	적용기간	강우관측소 현황
강정천	2009.1~2012.04	윗세오름, 하원, 서귀포
약근천	2009.1~2012.04	

Table IV-8. Situation of meteorological postof the basins to be studied

지점	elevation	Xpr	Ypr
하원	110	149373.1602	-26835.7872
윗세오름	1700	155691.5461	-14883.0038
서귀포시	50.5000	159418.1010	-27676.0800

Table IV-9. Rainfall data by month of rainfall observatory at the basin of watershed(2009~2011)

	서귀포	윗세오름	하원
1월	40.07	107.50	48.17
2월	91.40	243.33	104.50
3월	188.70	370.00	244.17
4월	218.80	504.50	253.83
5월	112.90	529.00	179.00
6월	454.83	965.17	467.50
7월	255.17	1082.67	283.83
8월	298.70	1327.00	394.00
9월	136.43	295.33	111.33
10월	92.50	123.00	83.17
11월	210.73	319.00	189.83
12월	42.20	113.50	46.33

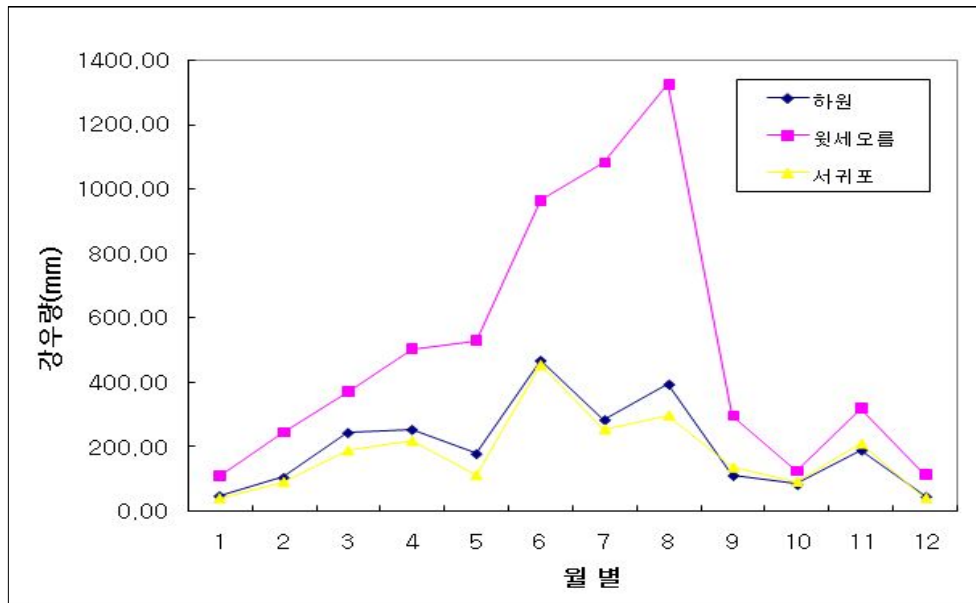


Fig. IV-15. Precipitation by month and by precipitation observatory of Oaedo river basin

V. SWAT 모형의 제주도 남부 주요 기저유출유역 적용

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 IV-1) 중에서 지리적 특수성을 띄고 있는 제주도 하천에 대하여 선행된 연구(정, 2008, 한, 2009)를 참조하여, SWAT 매개변수 중 지하수 부분 매개변수 4개(GW_REVAP, REVAPMIN, GWQMN, ALPHA_BF)를 비롯하여 CN_2, ESCO, CH_K2, SOL_AWC 를 포함한 총 8 개의 매개변수를 선정하여 연구를 진행하였다(Table V-2).

Table V-1. Parameter in SWAT model

분 류	매개변수	설 명	하한치	상한치
Crop.dat	USLE_C	토지피복에 따른 피복 계수	0.001	0.5
Basin input	SMFMX	6월21일의 용해 요소	0	10
	SMFMN	12월21일의 용해 요소	0	10
	SPCON	토사이동 방정식에서의 계수	0.0001	0.01
	SPEXP	토사이동 방정식에서의 계수	1	1.5
	NPERCO	질산 침투 계수	0	1
	PRERCO	인산 침투 계수	10	17.5
	PHOSKD	토양의 인성을 구분하는 계수	100	200
Chemical	SOL_LABP	토양층에서의 초기 NO3 농도	0	100
	SOL_ORGN	토양층에서의 초기 산화질소 농도	0	10000
	SOL_ORGP	토양층에서의 초기 산화인 농도	0	4000
	SOL_NO3	토양층에서의 초기 NO3 농도	0	5
Ground water	ALPHA_BF	기저유출 감수 상수	0	1
	GWQMN	기저유량에 대한 얇은 대수층의 임계 수분량	0	5000
	GW_REVAP	얇은 대수층의 REVAP 계수	0.02	0.2
	REVAPMN	침투에 대한 얇은 대수층의 임계 수분량	0	500
HRU General	ESCO	토양증발 보상계수	0	1
	SLOPE	소유역의 평균 경사도 계수(%)	0.0001	0.6
	SLSUBBSN	경사의 길이(m)	10	150
	n	매닝의 조도계수		
Soil	TLAPS	온도 변동 계수	0	50
	SOL_AWC	토양층 유효수분량	0	1
Main channel	CH_COV	하천의 피복 요소	-0.001	1
	CH_EROD	하천의 침식성 요소	-0.05	0.6
	CH_K2	하천에서의 수리전도도 계수	-0.01	150
Management	BIOMIX	생물학적 혼합계수	0	1
	USLE_P	USLE 경험계수	0.1	1
	CN_2	AMC-II 에서의 SCS 유출곡선지수	35	98

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

매개변수	하한값	-25%	기준값	25(%)	상한값
CN2	35	51	67	83	98
ESCO	0	0.25	0.5	0.75	1
SOL_AWC	0	0.25	0.5	0.75	1
GW_REVAP	0.02	0.0515	0.101	0.1505	0.2
REVAPMIN	0	125	250	375	500
GWQMN	0	1250	2500	3750	5000
ALPHA_BF	0	0.25	0.5	0.75	1
CH_K2	-0.01	37.4925	74.995	112.4975	150

2. 매개변수 민감도 분석

본 연구에서는 Table V-2에 제시되어 있는 수문학적 매개변수 8개를 기준값에서 각각 $\pm 25\%$, $\pm 50\%$ 의 value 값을 변화시키면서 민감도 분석을 실시하였다.

2.1 약근천 유역

약근천 유역의 각 매개변수별 민감도 분석을 강정천 유역과 같이 하천유출량, 지하수량, 직접유출량의 모의 결과를 대상으로 8개의 매개변수 민감도 분석을 실시하였다. 매개변수 민감도 분석을 실시한 결과 CN₂, ESCO, SOL_AWC 의 매개변수가 본 연구 대상유역과 근접한 강정천 유역과 마찬가지로 민감한 반응을 나타냈다.

CN₂, ESCO, SOL_AWC 를 제외한 나머지 매개변수에 대한 민감도 분석을 수행한 결과 본 연구 대상유역에서도 총 유출량과 직접유출량은 value 값에 따라 1% 미만의 반응을 보였으며, 지하수량의 경우에만 각 매개변수별 value 값의 미세한 변화에도 민감도가 매우 큰 반응을 보여 지하수 유출에 많은 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

약근천 유역의 CN₂ 값의 민감도 분석에서도 CN₂ 값이 증가함에 따라 총유출량의 민감도는 -6~7%, 직접유출량의 민감도는 -28~34% 까지 증가함을 확인

할 수 있으며, 반대로 지하수량에 대한 민감도 값은 75~95% 까지 감소되는 것을 Table V-3 과 Fig. V-1 에 나타낸 바와 같이 확인 할 수 있다.

Table V-3. Rate of change of direct runoff according to the rate of change of CN_2 of parameter at Akguen basins except for a river

매개변수	-50%	-25%	0	25%	50%
WATER YIELD	-6.38	-3.34	0	3.63	7.56
GWQ	-28.73	-15.05	0	16.53	34.29
SURQ	95.74	9.22	0	-52.48	-79.43

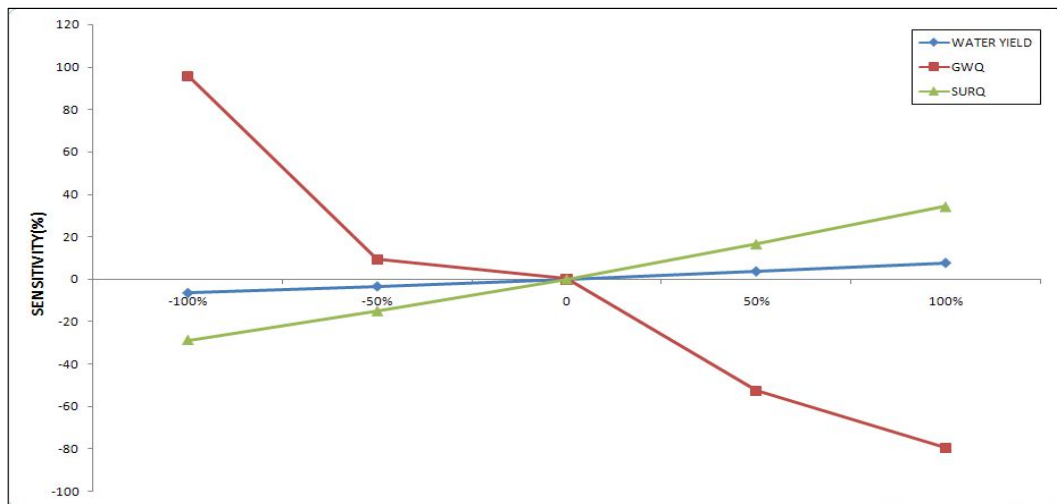


Fig. V-1. Rate of change of direct runoff according to the rate of change of CN_2 of parameter of Akguen basin of a river

토양증발 보상계수인 ESCO에 대한 민감도 분석에서도 본 유역과 근접해 있는 약근천 유역과 비슷한 경향을 보이고 있으며, 총유출량과 직접유출량은 7% 정도의 변화를 나타내고 있으며, 지하수량에 대해서는 강정천 보다 조금 더 증가한 198~ 380% 까지 큰 차이가 나타남을 확인 할 수 있었다(Table V-4, Fig. V-2).

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

매개변수	-50%	-25%	0	25%	50%
WATER YIELD	5.63	-0.82	0	2.08	6.83
GWQ	198.58	-14.18	0	34.75	380.14
SURQ	6.46	-0.65	0	2.38	7.53

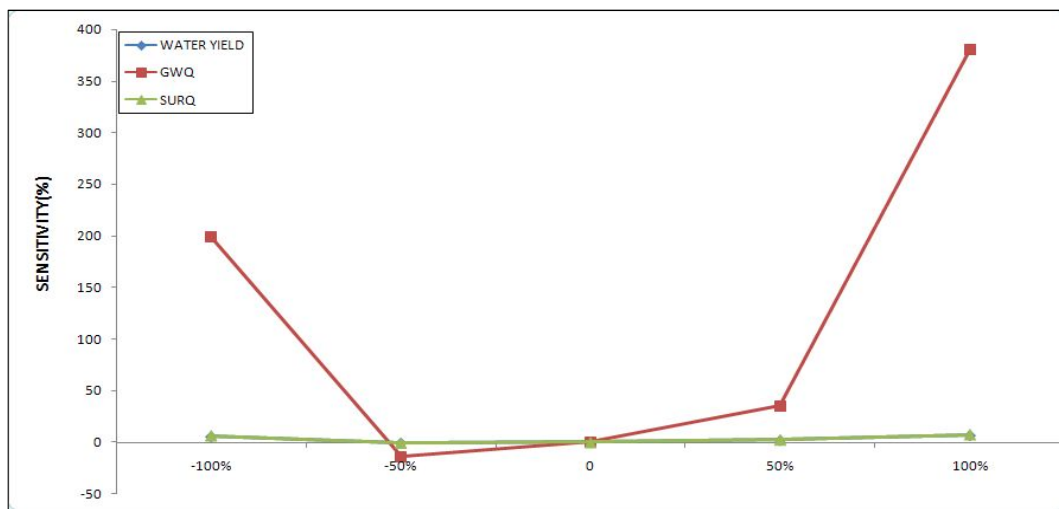


Fig. V-2. Rate of change of direct runoff according to the rate of change of ESCO of parameter of Akguen basin of a river

SOL_AWC 민감도 분석에서는 총 유출량은 4~5%, 직접 유출량은 2~4% 정도 변화되는 것을 확인 할 수 있었다. 지하수량인 경우에는 다른 매개변수의 민감도 분석과 같이 57~160%의 큰 변화를 나타냄을 확인할 수 있었다. 반면 지하수량은 강정천의 변화율과 비교 했으며 약 41~550%로 SOL_AWC 매개변수 값에 매우 민감한 반응을 나타냈다(Table V-5, Fig. V-3).

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

매개변수	-50%	-25%	0	25%	50%
WATER YIELD	-3.79	-1.66	0	2.33	4.52
GWQ	557.45	132.62	0	-35.46	-41.14
SURQ	1.83	0.89	0	-1.93	-4.19

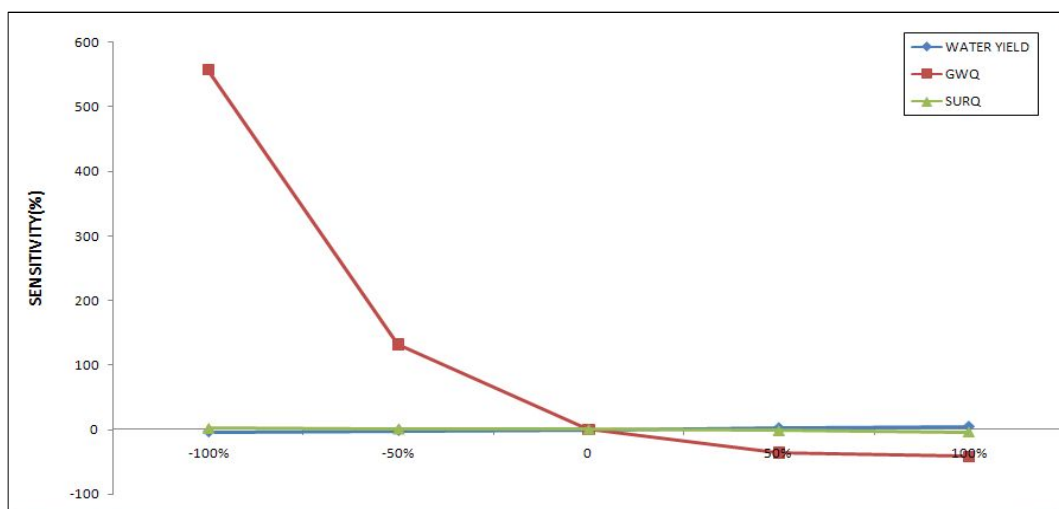


Fig. V-3. Rate of change of direct runoff according to the rate of change of SOL_AWC of parameter of Akguen basin of a river

2.2 강정천 유역

강정천 유역에 대하여 각 매개변수의 증감에 따른 모의치의 반응을 확인하고자 하천유출량, 지하수량, 직접유출량의 모의 결과를 대상으로 8개의 매개변수 민감도 분석을 실시하였다.

매개변수 민감도 분석을 실시한 결과 27개의 매개변수 중 CN_2, ESCO, SOL_AWC 의 값이 직접유출에 민감한 반응을 보이는 것으로 나타났다. 나머지 매개변수의 민감도 분석에서는 총 유출량과 직접유출량은 대부분 1% 미만의 반응을 보였으며, 지하수량의 경우에만 각 매개변수별 민감도가 매우 큰 반응을 보여 지하수 유출 모의 결과에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

AMC-II 조건의 SCS 유출곡선지수인 CN₂ 값의 민감도 분석에서는 CN₂ 값이 증가함에 따라 총유출량과 직접유출량의 민감도가 증가함을 보이는 반면 CN₂ 값은 낮아질수록 지하수에 대한 민감도 값이 지수함수적으로 증가하는 경향을 보이고 있다(Table V-6, Fig. V-4).

Table V-6. Rate of change of direct runoff according to the rate of CN₂ of parameter at Kangjung basins except for a river

매개변수	-50%	-25%	0	25%	50%
WATER YIELD	-5.59	-2.97	0	3.51	7.38
GWQ	82.12	31.02	0	-30.90	-36.76
SURQ	-30.49	-15.85	0	18.28	37.53

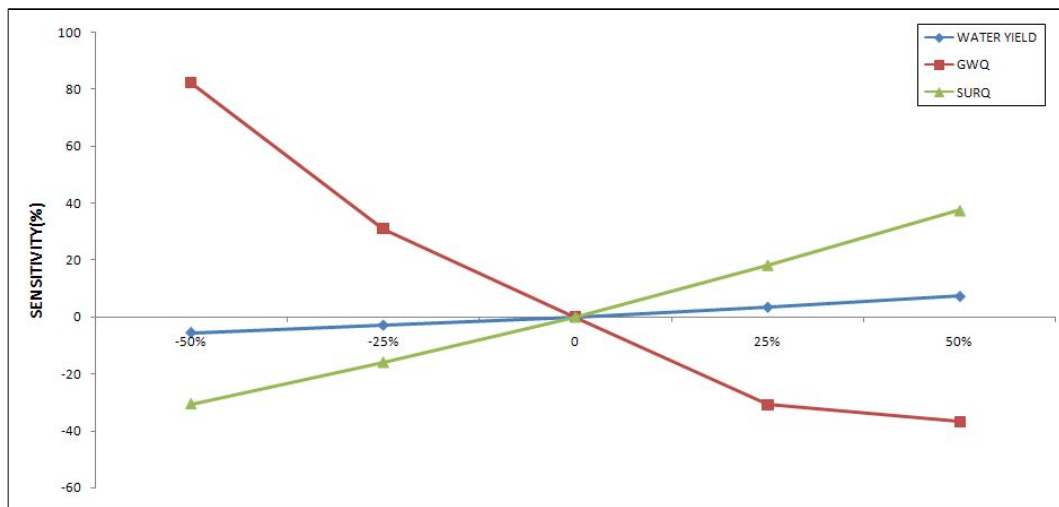


Fig. V-4. Rate of change of direct runoff according to the rate of change of CN₂ of parameter of Kangjung basin of a river

토양증발 보상계수인 ESCO에 대하여 민감도 분석에서는 ESCO 변수의 적용범위인 0~1 까지 value 값을 적용한 결과 기준값을 기준으로 총유출량과 직접유출량은 7% 정도의 변화를 나타냈고, 지하수유출량에 대해서는 140%~160% 까지 큰 차이가 나타남을 확인 할 수 있었다(Table V-7, Fig. V-5).

Table V-7. Rate of change of direct runoff according to the rate of ESCO of parameter at Kangjung basins except for a river

매개변수	-50%	-25%	0	25%	50%
WATER YIELD	6.75	-1.03	0	2.45	8.13
GWQ	138.82	-15.61	0	49.10	168.38
SURQ	7.48	-0.81	0	2.78	8.76

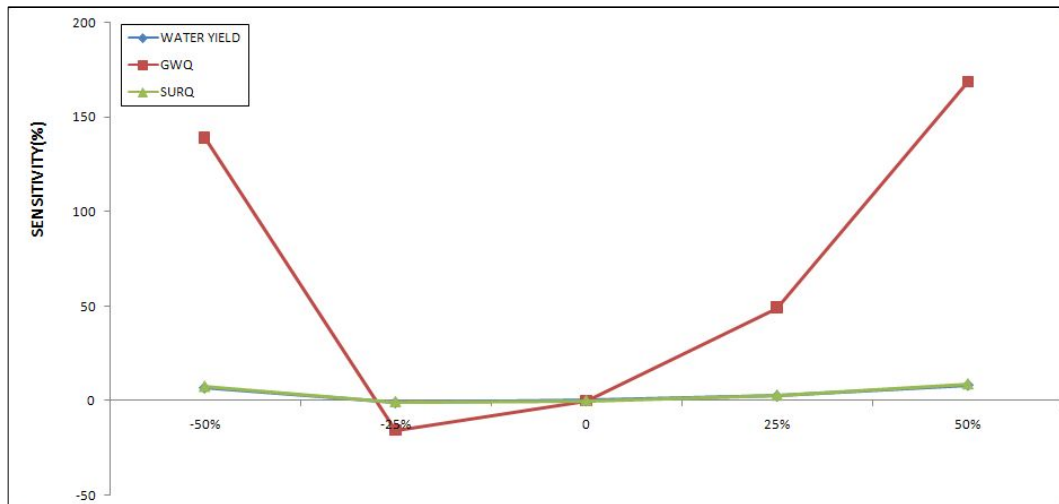


Fig. V-5. Rate of change of direct runoff according to the rate of change of ESCO of parameter of Kangjung basin of a river

토양층 유효수분량인 SOL_AWC 민감도 분석에서는 기준값을 중심으로 value 값이 변함에 따라 총유출량과 직접유출량이 3~6% 정도 변화함을 확인할 수 있었으나, 지하수량인 경우에는 다른 매개변수의 민감도 분석과 같이 57~160%의 큰 변화를 나타냄을 확인할 수 있었다(Table V-8, Fig. V-6).

Table V-8. Rate of change of direct runoff according to the rate of SOL_AWC of parameter at Kangjung basins except for a river

매개변수	-50%	-25%	0	25%	50%
WATER YIELD	-3.89	-1.81	0	2.83	6.31
GWQ	164.16	87.65	0	-38.47	-57.71
SURQ	2.54	1.24	0	-2.55	-6.05

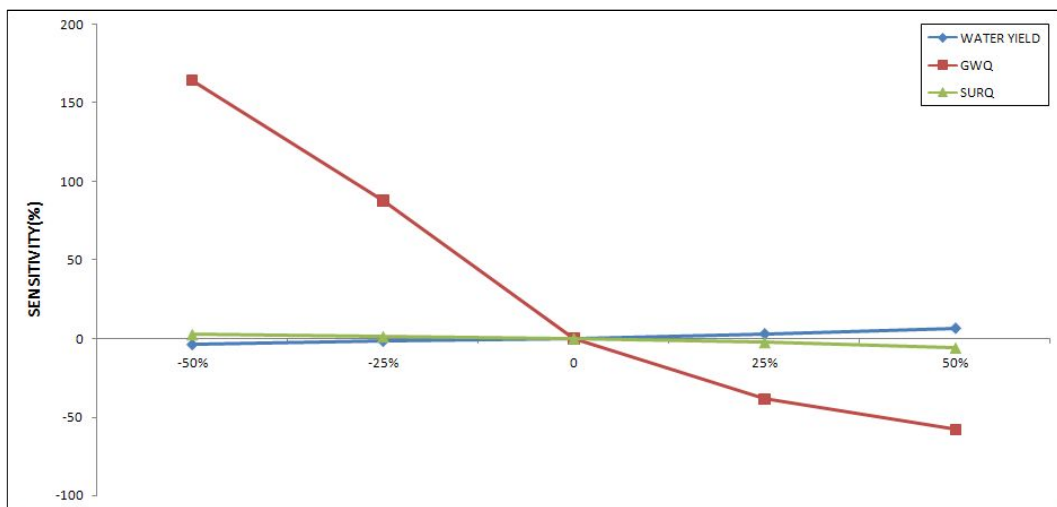


Fig. V-6. Rate of change of direct runoff according to the rate of change of SOL_AWC of parameter of Kangjung basin of a river

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 (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 = 관측유량

SQ_i = 모의유량

N = 시간간격의 수

2) 모형 효율성 계수(Model Efficient, ME)

모형 효율성 계수(ME)는 Nash 와 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. Server 와 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.

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

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

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

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

여기서, OQ_i = 관측유량,

N = 시간간격의 수

M_{ob} = 관측유량

VI. 하천 실측유량을 이용한 SWAT 모의

1. 약근천의 유출량 산정

약근천 유역은 강정천과 마찬가지로 연구 대상기간(2011. 7 ~ 2012. 4) 동안 관측된 실측값을 가지고 보정을 실시하였다.

대상 연구유역의 유출량 자료는 2011년 7월부터 2012년 4월 까지 최신 계측기기인 ADCP를 이용하여 매월 2회 현장에서 관측된 실측자료를 이용하였으며, 연구의 정확성을 위하여 정밀성이 뛰어난 ADCP 자료와 연속수위 자료인 DIVER 자료를 기준으로 보정을 실시하였다. 보정은 정확성을 고려하여 DIVER의 연속수위자료 중 관측시 최고·최저 수위에 수렴하는 수위자료만을 이용하여 9개의 관측 데이터를 사용하였다.

약근천 유역은 SWAT 모의시 CN_2를 -7 하향 고정 후 ESCO +0.8, SOL_AWC +0.03 상향하여 모의결과 값을 보정하였다(Table VI-1).

Table VI-1. Corrected parameter of the basin of Akguen river

입력파일	매개변수	정의	범위		보정값
			하한값	상한값	
*.mgt	CN_2	AMC-II 에서의 SCS 유출곡선지수	35	98	-7
*.sol	SOL_AWC	토양층 유효수분량	0	1	+0.03
*.hru	ESCO	토양증발 보상계수	0	1	+0.8

SWAT 모의 보정 결과 연구대상 유역의 유출율은 연간 23.55~28.43 (%)로 나타났으며, R^2 값은 0.75, 평균제곱근오차(RMSE) 값이 0.13 으로 좋은 결과를 보였다.

하지만, 대상 하천의 관측이 대부분 강우가 발생되지 않는 날에 이루어진 점들을 감안하여 향후 추가적인 관측을 실시 후 모의를 실시한다면 더 좋은 결과를 산출해 낼 수 있을 것이다.

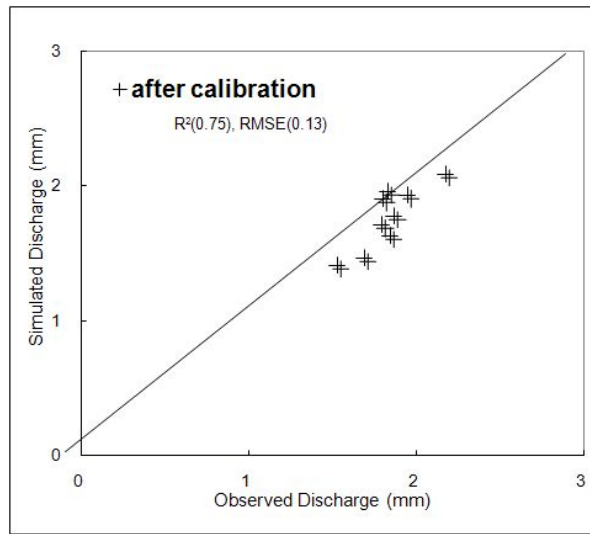


Fig. VI-1. Result of correcting the model of the basin of Akguen river

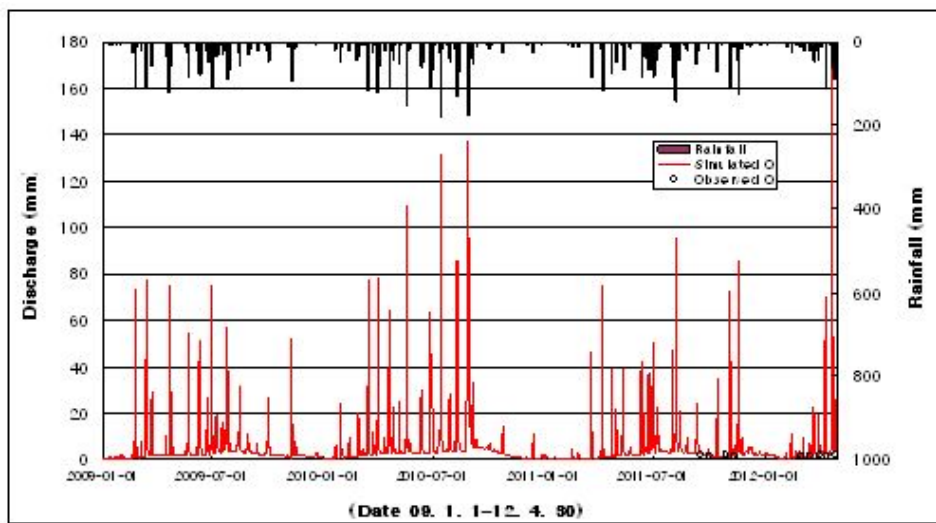


Fig. VI-2. Result of runoff simulation of the basin of Akguen river

2. 강정천의 유출량 산정

SWAT 모델을 이용한 강정천 유역의 모의치의 보정은 실측 관측자료를 바탕으로 하여 연구를 진행하였다. SWAT 모의시 연속적인 수위자료를 활용하여 연구를 진행함이 당연하지만, 연속 수위자료를 얻기 위해 설치된 DIVER의 계측 결함으로 인하여 인접한 악근천의 매개변수를 그대로 적용하여 연구를 진행 하였다.

강정천 유역의 대한 연속적 유출량 자료의 확보를 위하여 연구 대상기간(2011. 7 ~ 2012. 04) 동안 매월 2회 현장관측한 총 20회에 걸친 실측자료 이용하여 보정을 실시하였다. 관측은 전세계적으로 정밀성을 인정받는 최신 계측기기인 ADCP 를 사용하여 진행하였다.

SWAT 모형의 모의치 보정은 강정천 유역의 출구 지점에서 산정한 직접 유출량에 대하여 보정을 실시하였다. 보정은 CN_2를 -7 하향 고정 후 ESCO +0.8, SOL_AWC +0.03 상향하여 모의결과 값을 보정하는 악근천 유역과 동일하게 적용하였다.

SWAT 모의 보정결과 연간 23.55~28.43 (%) 의 유출율을 보이는 것으로 나타났으며, 강우량과 모의량을 비교 시 경향성은 매우 유사하게 나타났다.

Table VI-2. Reinforced parameter at the basin of Kangjung river

입력파일	매개변수	정의	범위		보정값
			하한값	상한값	
*.mgt	CN_2	AMC-II 에서의 SCS 유출곡선지수	35	98	-7
*.sol	SOL_AWC	토양층 유효수분량	0	1	+0.03
*.hru	ESCO	토양증발 보상계수	0	1	+0.8

강정천 유역의 연속 수위자료와 강우시의 관측 데이터를 확보하여 연구 대상 유역에 알맞은 매개변수를 보정하여 유출량을 산정한다면 더욱더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

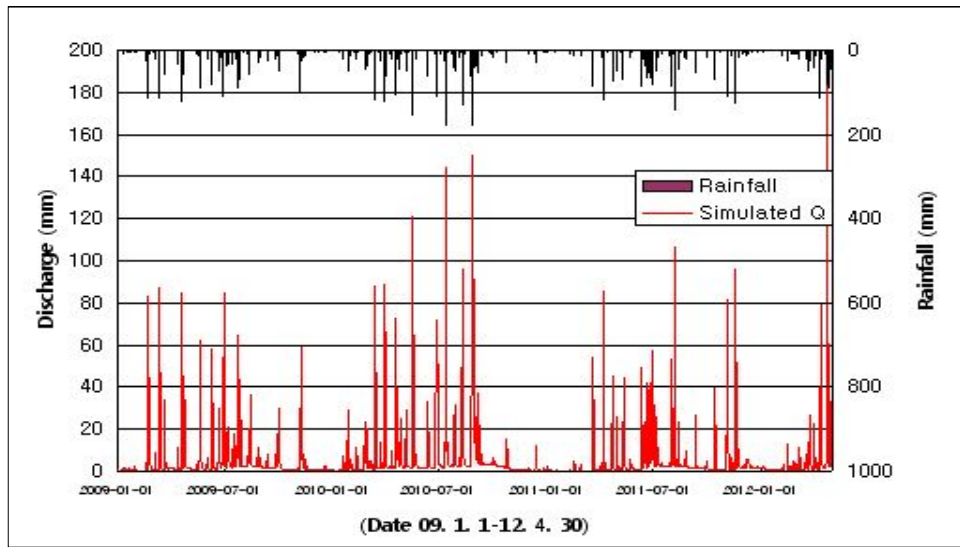


Fig. VI-3. Result of runoff simulation of the basin of Kangjung river

VII. 결론 및 제언

현재까지 제주지역의 수문조사는 주로 강우량·하천유출량 등 수문자료를 수 개 지점에서 비교적 한정된 자료만을 보유하고 있는 실정이다. 향후 현실적으로 다가오는 기후변화에 대비한 예측 모델링 기법 적용이 필요하지만 이러한 연구는 부분적(정, 2007, 한, 2008)으로 수행되어져 왔다. 본 연구에서는 제주도에서 최초로 세계적으로 가장 정밀한 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler) 유속계를 이용한 하천유출을 실제 관측하고, 미국 농무성에서 개발된 SWAT (Soil Water Assessment Tool)모델을 구축하여 매개변수 민감도분석을 통한 정밀한 수자원 해석을 수행하였다.

1) 연구 대상구역 내의 유출량을 산정하기 위하여 SWAT 모형의 수문·기상 입력자료(2009. 1. 1. ~ 2012. 4. 30)로 서귀포 기상대의 Seo_P, Seo_C, Seo_H, Seo_S, Seo_W, 윗세오름과 하원 관측소(AWS)의 강우량 자료를 구축하고, 지형자료로 DEM, Land Use, Soil Type를 구축하여 악근천과 강정천 유역에 적용하여 모의하였다.

2) 강정천과 악근천 유역에 대하여 수문학적 매개변수 중 유출에 민감한 반응을 나타내는 매개변수 8개를 각 유역에 대한 매개변수 민감도 분석을 실시한 결과 CN₂, SOL_AWC, ESCO 의 매개변수가 총 유출, 직접 유출, 지하수 유출에 민감한 반응을 보였으며, 그 외 매개변수의 민감도 분석에서는 대부분 1% 미만의 반응을 나타내었다. 매개변수 분석에 있어서 이 중 가장 민감한 반응을 보이는 매개변수는 CN₂로 나타났다. 매개변수 CN₂의 경우 매개변수 값이 증가함에 따라 총 유출과 직접유출의 민감도가 증가하는 경향을 보였으나 지하수 유출에서는 민감도가 크게 감소하였고, 매개변수 SOL_AWC는 매개변수 값이 증가함에 따라 총 유출량은 미세하게 증가하지만 지하수유출과 직접유출은 감소하는 경향을 보였다. 그 중 지하수 유출은 CN₂ 와 마찬가지로 민감도가 크게 작용하는

것으로 나타났다. 또한 매개변수 ESCO의 경우 총유출과 직접유출에 대하여 미세한 반응을 나타냈으나 지하수 유출인 경우 매개변수 값이 증가함에 따라 유출율이 크게 감소하다가 기하급수적으로 증가함을 보였다.

3) 악근천과 강정천 유역의 모의치 보정을 위하여 2011년 7월부터 2012년 4월까지 월 2회 현장 관측한 ADCP 데이터와 DIVER의 연속 수위 자료를 사용하였다. 대상 하천의 SWAT 모의 보정결과 상관계수 $R^2(0.75)$, 평균제곱근오차(RMSE)는 0.13 으로 나타났으며, 실측치와 모의치의 값이 전반적으로 일치함을 보였다.

4) 강정천 유역은 DIVER의 연속수위자료 오류로 인하여 악근천의 매개변수 값을 적용하여 유출량을 산정하였다. 연구결과 연간 27~31% 지표유출이 발생하는 것으로 나타났다.

이상의 연구 결과에서 연구대상유역의 일 유출량 모의는 전체적으로 우수하여 향후 기후변화에 대비한 효율적인 수자원의 이용 및 관리를 위한 정책 수립에 귀중한 기초자료로 활용될 것이다. 또한 제주도내 기저유출수역에 대한 정확한 조사가 추가적으로 진행된다면 유출성분에 대한 더욱 정밀한 분석이 이루어 질 것으로 판단된다.

REFERENCES

- 장대원, 김형수, 서병하, 2003, SWAT을 이용한 보청천 유역의 장기-유출 분석과 수질 모델링, 2003 대한토목학회 학술대회 Vol.2003 No.10[2003] P.2169-2174
- 신현석, 강두기, 김균태, 2004, SWAT모형을 이용한 태화강유역 장기유출 분석, 2004 대한토목학회 학술대회 Vol.2004 No.10[2004] P.732-736
- 김남원, 정일문, 원유승, 2006, 완전연동형 SWAT-MODFLOW 모형을 이용한 지표수-지하수 통합 유출모의, 2006 대한토목학회논문집 B, Vol.26 No.5, [2006] P.481-488
- 김남원, 이정우, 이병주, 이정은, 2007, 비선형 저류방정식을 이용한 일 단위 하도 추적법, 2007 대한토목학회논문집 B, Vol.27 No.5 [2007] P.533-542
- 김남원, 이지은, 정일문, 김동필, 2008, SWAT-K 모형을 이용한 설마천 유역의 수문성분 해석, 2008 한국환경과학회지 Vol.17 No.12 [2008]
- 한국공항주식회사, 2011, 한진제주푸어워드 먹는샘물 지하수 영향조사서, P.71
- 제주특별자치도, 2009, 하천수계별 유역종합치수 계획 수립 보고서, P. 18, 21
- 서귀포시, 2011, 하천기본계획, P. 2-3~2-4
- 양성기, 2011, 수리학, 제주물산업인재양성센터, P.275~294
- 김남원, 신성철, 김철겸, 2003, SWAT 모형의 매개변수 민감도 분석, 2003 대한토목학회 학술대회 학술저널, Vol.2003 No.10 [2003], P. 2264~2268
- 이연근, 2011, SWAT모형과 HEC-HMS모형을 이용한 오수천 유역의 유출특성 분석, 석사학위논문,(인하대학교 일반대학원, 토목공학과) P. 6
- 정우열, 2008, SWAT 모형을 이용한 제주도 하천의 유출량 모의, 석사학위논문 (제주대학교 일반대학원, 토목해양공학과), P. 7~42, 52
- 이영준, 류시완, 2010, 남강댐유역 일유출량 자료를 이용한 SWAT모형의 민감도 분석, 2010 대한토목학회 학술대회 학술저널, Vol.2010 No.10 [2010], P.1845~1848
- 정우열, 양성기, 2008, 제주도 하천에 대한 SWAT 모형의 적용, 한국환경과학회지 17(9), 1043-1049.
- 허 준, 이도훈, 이희철, 2003, 준 분포형 장기 강우-유출 모형의 민감도 분석, 대

- 한토목학회 학술대회 학술저널, Vol.2003 No. 10 [2003], P. 2236~2241
- 윤문상, 2011, SWAT 모형의 섬강시험유역에 적용을 통한 매개변수 민감도 분석, 석사학위논문(상지대학교 대학원, 토목공학과), P. 45~51
- 윤용남, 1998, 공업수문학, 청문각
- 김제형, 2008, 장기유출해석을 위한 SWAT 모형 적용에 관한 연구 : 관교신도시 유역을 중심으로, 석사학위논문(한양대학교 공학대학원, 수자원 및 항만공학 전공), P. 83~89
- 양성기, 2007, 지구의 수권과학, 구미서관, P. 302
- 정종호, 윤용남, 2008, 수자원설계실무, 구미서관, P. 261~278
- 박윤식 외 9명, 2007, 임하댐 유역의 유사 거동 모의를 위한 SWAT 모델의 적용성 평가, 수질보전 한국물환경학회지, Vol.23 No.4 [2007], P. 467~473
- 양성기, 정우열, 2011, 수자원모델링, 제주물산업인재양성센터
- 한웅규, 2009, SWAT 모형을 이용한 토지이용 변화에 따른 유출량 모의, 석사학위논문(제주대학교 일반대학원, 토목해양공학과), P. 36~43
- 한국수자원학회, 2012, 수공학 워샵 교재(SWAT모형을 이용한 유역수문 해석 이론과 실습, 도시유역 물순환 해석 모형(CAT)), P. 32~60
- J.L. Monteith, 1981, Evaporation and surface temperature, Quart. J. Roy. Meteorol. soc 107, pp. 1~27.
- K. Eckhardt, J. G. Arnold, 2001, Automatic calibration of a distributed catchment model, J. Hydrol. 251. pp. 103~109
- Arnold, J. G. and Srinivasan, R, 1994, Integration of a Basin-Scale Water Quality Model with GIS., Water Resources Bulletin, pp. 453~462
- S.L Neitsch. J.G. Arnold, J.R.Williams (April, 2001) Soil and Water Assessment Tool User's Manual(ver.2000)
- M.Diluzio, R. Srinivasan, J. Arnold(July, 2001) ArcView Interface For SWAT2000 User's Guide