



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](#)

博士學位論文

제주도 남부의 기저유출수를 활용한
농업용수 공급 가능량 산정

濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

康 明 秀

2020年 2月

제주도 남부의 기저유출수를 활용한 농업용수 공급 가능량 산정

指導教授 楊 城 基

康 明 秀

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함

2020年 2月

康明秀의 工學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長	김 남 형	
委 員	김 상 진	
委 員	김 재 영	
委 員	김 서 준	
委 員	양 성 기	

濟州大學校 大學院

2020年 2月

A Study on the Estimation of Irrigation water Supply
Capacity using Base Flow in the South of Jeju Island

Myung-Soo Kang
(Supervised by professor Sung-Kee Yang)

A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering

2020. 2.

This dissertation has been examined and approved by

Doctoral Committe

Professor	Nam-Hyeong Kim
Professor	Sang-Jin Kim
Doctor	Seo-Jun Kim
Professor	Jae-Wook Ko
Professor	Sung-Kee Yang

February. 2020

DEPARTMENT OF CIVIL & OCEAN ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	v
Summary	vii
I. 서론	1
1. 연구 배경	1
2. 연구 목적	4
3. 연구 동향	5
4. 연구 방법	7
II. 자료 및 연구방법	9
1. SWAT 모형	9
1.1 강우-유출모형	9
1.2 SWAT 모형의 이론	11
2. 지하수 유동해석 모형(MODFLOW)	26
2.1 MODFLOW 모형의 이론적 배경	26
3. 하천 유지용수	30
3.1 하천 유지유량 및 기준지점 선정	30
3.2 국외의 하천유지유량 산정	30
3.3 국내의 하천유지유량 산정	31
III. 연구대상 지역의 개황 및 농업용수 수요량	35
1. 연구 대상지역의 개황	35
2. 농업용수 수요량	36
2.1 단위용수량 및 2020년 기준 주요작물 재배면적	36
2.2 농업용수 수요량	37
2.3 농업용수 과부족량 검토	37

IV. 유출량 관측 및 농업용수 활용 가능성 분석	39
1. 상시하천 및 용천수 관측.....	39
1.1 유출량 관측.....	39
1.2 수질 관측.....	41
2. 농업용수 활용 가능 유출수 선정.....	42
2.1 유출량 산정.....	42
2.2 수질 분석.....	43
2.3 농업용수 활용 가능성 분석.....	47
V. SWAT-MODFLOW 모의	48
1. SWAT 모형에 의한 장기유출 모의	48
1.1 대상 지역의 수문·기상 자료 구축.....	48
1.2 수치 지형자료 구축	57
1.3 SWAT모형의 적용.....	61
1.4 실측유량을 이용한 SWAT 모의.....	65
1.5 기후변화 시나리오 적용에 따른 유출량 분석.....	77
1.6 지하수 함양을 추정.....	79
2. MODFLOW 모형 모의	81
2.1 개념 모형의 구축	81
2.2 정상류 상태에 따른 지하수 유동해석	84
2.3 지하수 함양량에 따른 지하수 유동특성 및 기준수위 설정	89
VI. 하천 유지유량 및 농업용수 활용 가능량 산정	97
1. 하천유지유량 산정	97
1.1 하천유지유량 산정의 기본방향.....	97
1.2 갈수량 산정의 기본방향.....	97
1.3 약근천 지역의 하천유지유량 산정.....	98
1.4 기저유출수의 농업용수 이용 가능량 산정.....	100
VII. 결론	102

List of Tables

Table II-1. Classification of model according to hydrological process (Singh, 1995) · 10	10
Table II-2. Classification of soil group in SCS runoff curve method·····	17
Table II-3. Runoff curve index of natural region, CN (AMC-II, $I_a = 0.2S$)·····	18
Table II-4. Input data according to PET calculating method·····	21
Table II-5. Minimum flow concept·····	32
Table III-1. Plantation area by crop in 2020 ·····	36
Table III-2. Agricultural water demand in Jeju·····	37
Table III-3. Agricultural water demand in regional·····	38
Table IV-1. Spring water observation using ADC·····	40
Table IV-2. Principal component analysis for agricultural water quality standards····	41
Table IV-3. Results of calculation for runoff·····	43
Table IV-4. Analysis of water quality standards for agricultural water(NO_3^-)·44	44
Table IV-5. Analysis of water quality standards for agricultural water(Cl^-)····	45
Table IV-6. Analysis of water quality standards for agricultural water(14)····	46
Table V-1. Location of meteorological observatory of the basins to be studied·····	50
Table V-2. Annual rainfall data at location of meteorological observatory·····	51
Table V-3. Monthly rainfall data at location of meteorological observatory·····	52
Table V-4. Highest temperature data of Seogwi meteorological post·····	53
Table V-5. Lowest temperature data of Seogwi meteorological post·····	54
Table V-6. Average wind speed data of Seogwi meteorological post·····	55
Table V-7. Relative humidity data of Seogwi meteorological post·····	56
Table V-8. Code on entries of landuse map·····	58
Table V-9. Soil map of Akguen stream to be studied·····	59
Table V-10. Rate and dimension by soil series at the basis of Akguen river·····	61
Table V-11. Parameter in SWAT model·····	62
Table V-12. Value for analyzing the sensitiveness of hydrological parameters related to runoff·····	63
Table V-13. Rate of change of Water yield according to the rate of parameter	

at Akguen stream except for a river.....	64
Table V-14. Rate of change of SURQ according to the rate of parameter at Akguen stream except for a river.....	64
Table V-15. Rate of change of GWQ according to the rate of parameter at Akguen stream except for a river.....	65
Table V-16. Comparison of stream baseflow discharge measurement method.....	66
Table V-17. Calibrated parameters of Akguen stream.....	67
Table V-18. Annual recharge rates of sub-basin (2017-2019).....	79
Table V-19. Grid network configuration.....	82
Table V-20. The value of the modeling of the argument.....	84
Table V-21. Calibration results of underground water level.....	86
Table V-22. Comparison Observation Head vs. Computed Head.....	87
Table V-23. Changes in the groundwater level due to recharge increase	89
Table VI-1. Mean droughty flow vs. Basic low flow.....	99

List of Figures

Fig. I -1. Groundwater status by usage in Jeju	1
Fig. I -2. Agricultural form for classification of land use in Jeju(환경부)	2
Fig. I -3. Flow chart	8
Fig. II-1. Floodgate circulation about the part of land (Arnold, 2000)	13
Fig. II-2. Tracing process of SWAT model about the river(Arnold, 2000)	14
Fig. II-3. Oppressed/not-oppressed Aquifer(Dingmann 1994)	23
Fig. II-4. Mimetic diagram of virtual aquifer	28
Fig. III-1. Map of basin for this study	35
Fig. IV-1. Analysis of water quality standards for agricultural water(NO_3^-)	44
Fig. IV-2. Analysis of water quality standards for agricultural water(Cl^-)	45
Fig. V-1. Location of meteorological observatory of the basins to be studied	49
Fig. V-2. Annual rainfall data at location of meteorological observatory	51
Fig. V-3. Monthly rainfall data at location of meteorological observatory	52
Fig. V-4. Temperature data of Seogwi meteorological post	53
Fig. V-5. Average wind speed data of Seogwi meteorological post	55
Fig. V-6. Relative humidity data of Seogwi meteorological post	56
Fig. V-7. DEM of stream to be studied	57
Fig. V-8. Soil map of Akguen stream to be studied	59
Fig. V-9. Soil map of Akguen stream to be studied	60
Fig. V-10. Result of runoff simulation of the basin of Akguen Akkun stream	68
Fig. V-11. Result of calibration of Akkun stream	68
Fig. V-12. Monthly average discharge of Akkun stream(2004-2018)	69
Fig. V-13. Monthly discharge of Akkun stream(2004)	69
Fig. V-14. Monthly discharge of Akkun stream(2005)	70
Fig. V-15. Monthly discharge of Akkun stream(2006)	70
Fig. V-16. Monthly discharge of Akkun stream(2007)	71
Fig. V-17. Monthly discharge of Akkun stream(2008)	71
Fig. V-18. Monthly discharge of Akkun stream(2009)	72
Fig. V-19. Monthly discharge of Akkun stream(2010)	72

Fig. V-20. Monthly discharge of Akkun stream(2011).....	73
Fig. V-21. Monthly discharge of Akkun stream(2012).....	73
Fig. V-22. Monthly discharge of Akkun stream(2013).....	74
Fig. V-23. Monthly discharge of Akkun stream(2014).....	74
Fig. V-24. Monthly discharge of Akkun stream(2015).....	75
Fig. V-25. Monthly discharge of Akkun stream(2016).....	75
Fig. V-26. Monthly discharge of Akkun stream(2017).....	76
Fig. V-27. Monthly discharge of Akkun stream(2018).....	76
Fig. V-28. Future present comparison of direct runoff of Akkun stream.....	77
Fig. V-29. Future present comprison of direct runoff of Akkun stream.....	78
Fig. V-30. Future present comprison of ground water runoff of Akkun.....	78
Fig. V-31. Recharge area of the studied basin.....	80
Fig. V-32. Map of basin for Akkun stream.....	81
Fig. V-33. U-Formation.....	82
Fig. V-34. 3D GRID (Side View).....	83
Fig. V-35. Calibration Target	85
Fig. V-36. Computed vs. Observed Values.....	87
Fig. V-37. Groundwater table contour map under steady state.....	88
Fig. V-38. On distribution diagram of an equal number of steady flow state.....	90
Fig. V-39. On distribution diagram of an equal number of steady flow state.....	91
Fig. V-40. On distribution diagram of an equal number of steady flow state.....	92
Fig. V-41. On distribution diagram of an equal number of steady flow state.....	93
Fig. V-42. On distribution diagram of an equal number of steady flow state.....	94
Fig. V-43. Recharge rate of groundwater level variation.....	96
Fig. VI-1 Discharge-Duration curve.....	100
Fig. VI-2. Amount available for agricultural water.....	101
Fig. VI-3.Amount available for agricultural water.....	101

Summary

Jeju Island is the largest region in Korea with an average annual rainfall of 1,144.4 ~ 1963.1mm but due to its high permeability which is the geological features of volcanic rocks, about 40.6% of rainfall flows into the aquifer to be groundwater. There is limitation in the use of surface water with hydrological quality of Jeju island. In particular, unlike inland areas where water sources in streams and reservoirs are used as agricultural water, Jeju Island supplies about 94.2% (2018) of agricultural water as underground water, which is expected to further accelerate its dependence on underground water along with extreme droughts and changes in farming patterns caused by climate change. Although it is inevitable to develop additional underground water to meet the increasing demand for agricultural water, excessive development of underground water has been said to cause several problems such as depletion of underground water and pollution. Jeju Island needs not only to minimize the development of new ground water irrigation in terms of conservation and management of underground water but also to consider measures to supply agricultural water using alternative water resources such as available surface water (baseflow) for easing shortages and imbalances in the supply of water. Therefore, in this study, the amount of leakage is measured through the field observation from 2012 to 2019 on the permanent stream and spring water located in southern Jeju island, and the permanent stream and spring water is selected that can be substituted for agricultural ground water. That can be secured as an alternative water source for agricultural ground water. The study calculated the amount of underground water incubation by stimulating long-term runoff by SWAT model about Akkun stream as a model and analyzed by applying future climate change scenarios. Furthermore, it not only revealed the features of underground water flow in the corresponding basin by applying the calculated underground incubation to the GMS-MODFLOW model but calculated the amount of leakage and river maintenance flow which is available for an alternative water resource for agricultural water through the analysis on correlation between rainfall, leakage and ground level. The permanent stream and spring water available for agricultural water were analyzed into six points in total, including the local stream Akkun Stream and the stream Sokgolmul, Joytongmul, GguangMangmul, Seonngangnaemul, and DeaWangsu. The average drought flow of the stream basin was determined to be $0.051(m^3/s)$. This study shows that the groundwater dependence on agricultural water is about 96%, which can replace part of the demand for agricultural water that increases with future climate change and changes in agricultural patterns, and is also used as a precautionary measure for the problem such as a decrease in the amount of ground water content due to excessive development and use of ground water.

I. 서론

1. 연구의 배경

제주도는 4개 기상대를 기준으로 30년간 측정한 연평균 강수량이 1,144.4~1963.1mm에 달하는 우리나라 최다우지역이지만 투수성이 높은 화산암 지질특성으로 인해 강수 발생 시 강수의 약 40.6%는 대수층으로 유입되어 지하수로 함양된다. 제주도는 최다우지역임에도 불구하고 지표수개발이 어려워 1970년대 이후 지하수를 중심으로 수자원개발이 이루어져 2017년 말 기준 지하수 개발·이용 관정은 4,818 개소로 전체 수자원의 90.53% 이상을 차지하고 있다(제주특별자치도, 2018).

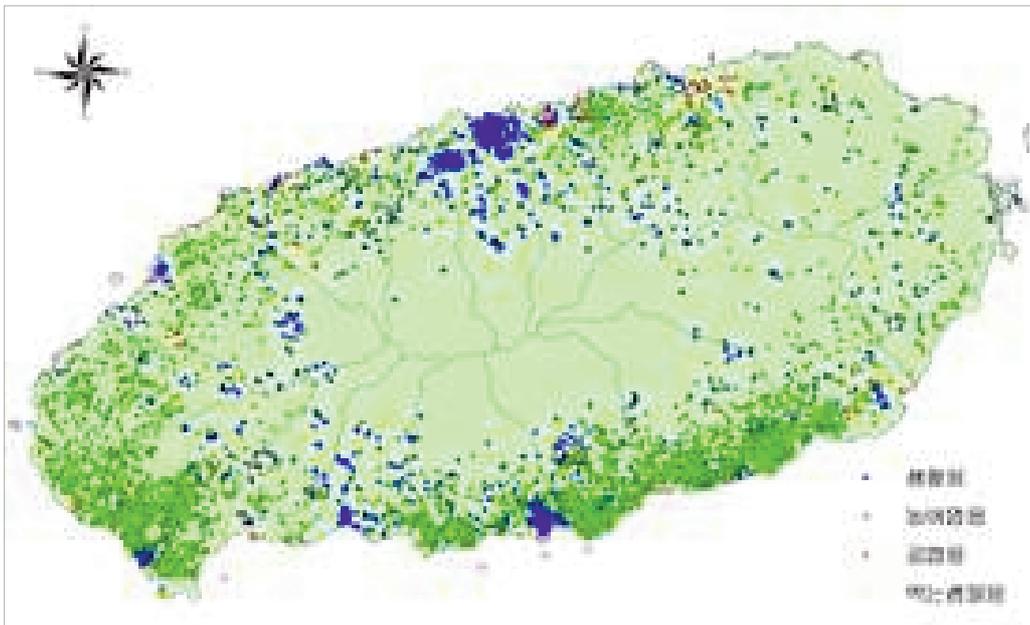


Fig. I -1. Groundwater status by usage in Jeju

대부분의 수자원을 지하수에 의존하고 있는 제주도는 최근 이상기후의 영향으로 인해 집중호우 및 가뭄이 빈번하게 발생하고 있다. 또한 가뭄에 의한 지하수위 변동에 따라 물 부족 현상도 빈번하게 발생하고 그 정도도 심화되고 있다. 제주도는 토지이용 변화에 따른 불투수층의 면적 증가 및 기후변화에 의한 가뭄 및 심도 증가로 인한 지하수 함양량 감소 등 지하수위 변동성 등에 대비하기 위하여 1991년

제주도개발특별법을 제정한 이래로 지하수를 체계적으로 관리하기 위한 지하수 영
향조사 제도(1993) 등을 도입하여 운영하고 있다. 또한, 2006년에는 제주특별자치도
로 승격 및 국제자유도시 조성에 관한 특별법을 제정을 통하여 지하수를 공공의 자
원으로 규정하고, 지하수의 관측정 설치·운영하는 등 단계적인 조치사항을 도입하
였다(제주특별자치도, 2013).

제주도의 수문학적 특성에 따라 지표수 이용에는 한계가 있다. 특히, 하천수 및
저수지의 수원을 농업용수로 이용하는 내륙지역과는 달리 제주특별자치도는 농업용
수의 약 94.2%(2018)를 지하수로 공급하고 있어 향후 기후변화로 인한 극한 가뭄과
농업형태의 변화 등은 지하수 의존도를 더욱 가속화시킬 것으로 전망된다.

제주도는 과거 용천수를 활용한 농업에서 1970년대 이후 지하수 개발이 활발하게
이루어지며 자연스럽게 지하수를 농업용수의 수원으로 사용하게 되었으며, 현재는
농업용수의 대부분을 지하수에 의존하고 있다. 또한, 지하수 관정 개발 이후 농업용
수 공급이 확대됨에 따라 농업형태도 시설하우스, 유리온실 등 전작의 형태로 다양
하게 변화하였다. 이와 같은 농업형태의 변화는 미래 농업용수 수요를 지속적으로
증가시킬 것으로 예측된다.

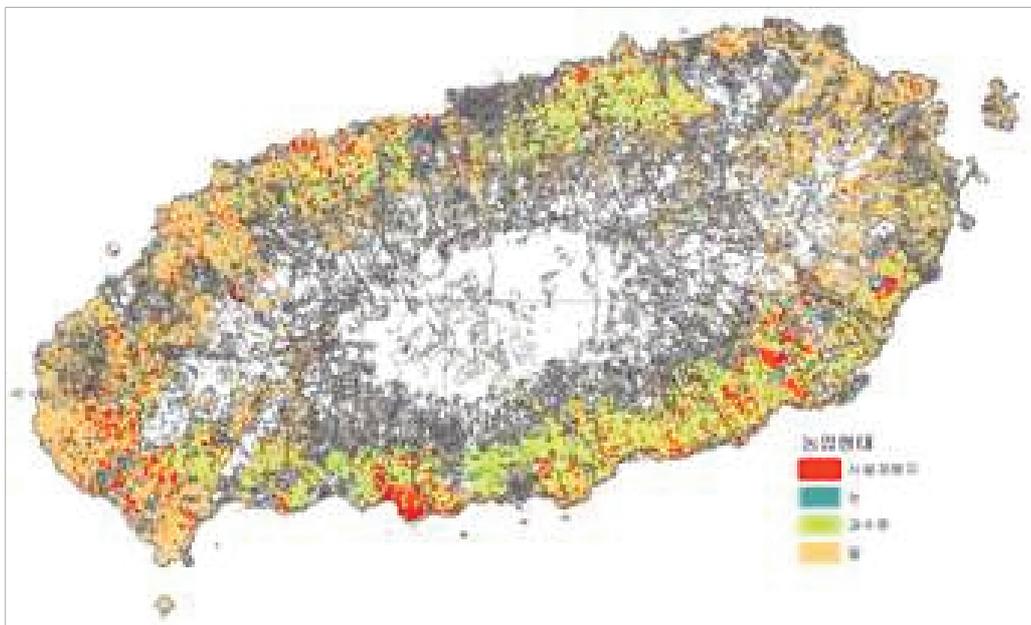


Fig. I -2 Agricultural form for classification of land use in Jeju(환경부)

증가하는 농업용수의 수요량을 충족시키기 위하여 추가적인 지하수 개발이 불가

피한 실정이나 지하수의 과도한 개발은 지하수 고갈 및 오염문제를 유발시키는 등 여러 문제점이 제기되고 있다. 제주도는 지하수의 보전·관리차원에서 신규관정개발을 최소화 하고 용수공급량의 부족과 불균형을 해소하기 위하여 활용 가능한 지표수(기저유출) 등의 대체수자원을 활용한 농업용수 공급방안 등이 필요한 실정이다.

2. 연구 목적

최근 이상기후로 인해 홍수 및 가뭄이 전세계적으로 빈번히 발생되고 있으며 산업화 및 도시화에 따른 물 수요도 급증하고 있으나 사용가능한 수원과 수질 등의 문제가 점점 심화되고 있어 용수 확보에 대한 연구개발이 시급한 실정이다.

제주도내 농업용수의 지하수 의존도는 약 96%로서 가뭄의 장기화와 물부족 등은 용수 공급에 큰 어려움이 발생할 것으로 보인다. 따라서 증가하는 농업용수의 수요량을 충족시키기 위해서 추가적인 지하수 개발이 불가피하지만 지하수 관정의 과도한 개발은 지하수 부족 및 오염문제를 발생 시킬 수 있어 대체수자원의 적극적인 이용과 새로운 용수의 공급방안 모색이 필요하다.

본 연구에서는 2011년부터 2019년까지 제주도 남부에 위치한 상시하천 및 용천수 대하여 최신 관측기기인 ADC를 활용한 정량적인 수량파악 및 수질검사를 통하여 유출량 및 수질 자료를 구축하고, 농업용 지하수의 대체수자원으로 확보가 가능한 상시하천 및 용천수 유출 지점을 선정하였다. 안정적인 농업용수 활용 가능량 산정을 위하여 중서귀 지역의 대표 유역인 악근천 유역에 대해 SWAT 모델을 통한 장기유출 분석 및 지하수 함양량 산정, 미래 기후변화 시나리오 RCP 8.5를 적용한 미래 유출량을 분석을 실시하였다. 또한, SWAT 모형 모의 시 산정된 지하수 함양량을 GMS-MODFLOW 모형에 적용하여 해당 유역의 지하수 수위 변화 및 유동특성을 파악하고, 강우-유출-지하수위 간의 상관관계를 분석하였다. 이러한 결과를 이용하여 농업용 지하수의 대체 수자원으로 활용 가능한 기저유출량과 하천유지용수량을 산정하였다.

이러한 연구 결과는 미래 기후변화 및 농업형태의 변화에 따라 증가하는 농업용수 수요량을 충족시켜 지하수의 과다한 개발·이용으로 향후 지하수 함양량 감소 등에 의한 용수문제를 사전에 예방하고, 보다 능동적인 수자원 확보와 가뭄에 대비하기 위한 대책수립에 기여할 수 있을 것으로 보인다.

3. 연구 동향

최근 전 세계적인 기후변화로 인하여 물 부족 문제가 심화되면서 농업용수 확보에 대한 연구개발이 시급한 실정이다. 우리나라의 경우 2007년 기준 농업용수 사용량은 159억 톤으로 수자원 총 이용량(333억 톤)의 약 48%(국토해양부,2011)로 매우 큰 비중을 차지하며, 대부분의 농업용수는 강과 댐을 수원으로 하고 있다. 그러나 향후 극단적인 가뭄 발생 시 강과 댐에서 수원을 확보하는 전통적인 방법으로 많은 양의 농업용수를 확보하는 것은 제한적일 수 있다. 따라서 미래 기후변화 등에 의한 농업용수 부족 현상을 사전에 대비하기 위하여 효율적인 관리 및 새로운 용수 확보 방안에 관한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다.

한국건설연구원(1996)은 우리나라 가뭄의 특성과 대책을 명확하게 파악하기 위하여 외국의 가뭄기록과 대책을 비교하고 가뭄에 대한 유연성을 강화하기 위하여 대체수자원 개발 방안을 조사·분석하였다. 국토해양부(2009)는 하천유지유량 재산정 및 고시, 관리의 필요성에 따라 우리나라 전국을 대상으로 하천유지유량을 산정하여 평가하고, 확보와 관리계획을 수립하기 위하여 2007년 금강권역을 시작으로 영산·섬진강 권역까지 시·공간적 분석하였다.

한국농촌경제연구원(2010)에서는 전체 수자원 및 농촌용수의 수급 전망, 농업용수리시설의 현황과 과제, 농촌용수와 수리시설의 이용 및 관리체계 등을 검토·분석을 통하여 용수의 공급 위주의 정책에서 효율적인 이용관리 및 수요관리 정책으로 전환 시키는 등의 연구를 진행한 바 있다.

최광준(2013) 등은 제주도의 농업용수 개발현황과 시기별 지역별 물이용 특성의 차이 등을 분석하고 향후 2020년 작물재배 면적 추정에 따른 권역별 농업용수 필요수량을 산정하여 제주도의 지역별 농업용수 공급 대책 방안 수립을 제시하였다.

안소라(2013) 등은 금강유역을 대상으로 장기 강우유출 모형인 SWAT을 이용하여 유역 유입량을 산정하고 하천유역 네트워크 물수지 모형인 MODSIM_DSS를 연계한 물수지 분석을 통해 가뭄 시 권역별 물 부족의 정도를 파악하고 농업용수 공급능력을 평가 하였다.

이문환(2016) 등은 충주댐과 소양강댐의 30일 최저유량을 이용하여 기후변화에 따른 저유량을 전망하고, 평가 시 발생하는 불확실성을 분석하였으며, 특히 수문모형과 기후변화 시나리오 상세화 기법의 불확실성을 분산분해기법을 이용하여 정량

적으로 평가하고 저감할 수 있는 방법을 제시 하였다

한국농촌경제연구원(2017)에서는 농업용수의 절대적인 부족뿐만 아니라 농업용수의 비효율적 배분 및 이용에 효과적으로 대응하기 위한 수요 측면에서의 농업용수 관리, 용수 및 수리권의 재배분에 대한 정책 수단을 분석하고, 농업인들의 수요 특성 분석 결과를 바탕으로 합리적이고 현실적인 수요 측면에서의 물부족 대응 방안을 제시하였다. 김철겸(2017) 등은 농업용수 수요량 산정에 핵심적인 인자인 증발산량의 정확한 추정을 위하여 SWAT 모형을 적용하고, 제주도 지역의 지형 및 기상, 유출, 물이용 특성을 반영한 유역 모델링 수행 및 기존 물수지 결과와 비교하여 모델링 신뢰성 평가를 통하여 제주도 전역의 농업용수 수요량 특성을 분석하였다.

정석제(2018)은 도시유역의 홍수유출 및 하수관거의 수리해석 모형인 EPA의 SWMM 모형을 이용하여 수원공과 관개수로 및 포장으로 구성된 관개시스템을 노드와 링크로 구성된 네트워크 모델로 구축하고 관개용수 해석을 통해 적용성을 검증하여 모의를 통한 최적의 용수공급 방법을 분석하였다.

4. 연구 방법

농업용수로 활용 가능성이 높은 상시하천 및 용천수가 분포하는 제주도 남부지역의 유역을 연구대상 선정하고, 물수지 분석 및 하천유지용수 산정을 위하여 유역설정이 가능한 악근천 유역을 대표 유역으로 설정하고 5개 용천수를 선정하였다.

제주도 남부에 위치하는 상시하천(3개소) 및 용천수에 대하여 2017년 6월부터 2017년 10월 까지 ADC 유속계 및 압력식 수위자동기록기인 DIVER를 설치하여 하천 유출량을 관측하고 수질검사를 실시하여 농업용수로 활용가능한 6개 지점을 선정하였다. 선정된 6지점에 대해서 2019년 6월까지 추가 유출량 관측 및 제주 수자원 방재연구단에서 관측된 데이터 수집을 통하여 장기 유출 자료(2011. ~ 2019.)를 확보하였으며, SWAT 모의, GMS-MODFLOW 모의 및 하천유지용수량 산정이 가능한 악근천 유역을 대표 유역으로 설정하여 분석을 실시하였다.

SWAT 모형 구축을 위하여 연구대상 유역에 인접한 기상대(서귀포)1개소 및 AWS(Auto Weather System) 3개소(윗세오름, 어리목, 중문)의 기상자료 및 연구대상 유역의 지형자료인 DEM, 토양도, 토지피복도와 같은 GIS자료를 구축하여 SWAT 모형을 구동하였으며, SWAT 모의 시 검·보정에 영향을 주는 매개변수 13개에 대하여 민감도 분석 실시하고 장기 관측 데이터를 통하여 모의치의 검·보정을 수행하였다.

GMS(Ground-water Modeling System)-MODFLOW 모의시 적용되는 함양량은 실측치에 의한 SWAT 모의 시 도출되는 결과를 적용하여 정상류 상태에 따른 지하수 유동특성을 분석하였다.

SWAT 모의 및 MODFLOW 모의 결과를 분석하여 강우-유출량-지하수위 변동간 상관분석을 실시하였으며, 미래 기후변화 시나리오를 이용한 2100년까지의 장기 유출량 및 지하수의 유동특성에 대한 상관관계를 분석하였다.

이들 결과를 통하여 하천유지유량을 산정하였으며, 미래기후변화 시나리오를 적용한 유출량 분석 결과를 적용하여 대체수자원인 상시하천 및 용천수의 농업용수 활용 가능량을 산정하였다.



Fig. I -3 Flow chart

II. 자료 및 연구방법

1. SWAT 모형

1.1 강우-유출모형

수문모형의 주된 분류기준으로 전원유출모형과 도시유출, 집중형(lumped parameter model)과 분산형(distributed parameter model), 사상 모형(event model)과 연속형 모형(continuous model)으로 구분된다.

유역특성에 따라 전원유출모형과 도시유출모형으로 나눌 수 있으며, 그 중 도시유출모형은 도시유역의 하수관거 모의가 가능한 특징을 갖고 있다. 특히, 공간적인 변화의 유무에 의하여 매개변수는 분산 및 집중형 모형으로 구분되며, 집중형 모형의 경우 모든 유역을 하나의 특별한 점(point)이라고 가정하여 입력자료, 경계조건, 유역의 지형적 특성 등의 공간적 변화를 고려하지 않는 상미분 방정식으로 결과를 계산하여 입력 값인 강우를 출력 값인 유출로 변환시킨다. 분산형 모형은 집중형 모형에 비해 공간적 변화를 고려하여 편미분 방정식을 지배방정식으로 하여 결과를 계산하여 대상 공간에서 발생하는 물리적 과정이 반영된 계산을 통해 자연 그대로의 현상을 규명함으로써 더욱 구체적 이론을 매개로한 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 구분 할 수 있다. 사상모형은 토양 침투능력 및 그 밖의 수문학적 차단 능력이 건조기간 내 변화되는 현상을 적용하지 못하는 반면, 연속형 모형은 장기적으로 발생하는 호우와 건조시에도 유출을 모의할 수 있다는 장점이 있다. Table II-1 은 사상모형과 연속모형의 구분에 따른 대표적인 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 이

상에서는 대유역 모형으로 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)
		IHM (Morris, 1980)
	Distributed	ILLUDAS (Terstriep et al., 1974)
		NWSRFS (Hydrologic Research Lab., 1972)
		SHE (Abbott et al, 1986)
		SWAT (Arnold et al., 1994)
		SWMM (Metcalf and Eddy, inc., et al., 1971)
		Mixed

이러한 강우-유출 모형은 합리식과 같은 간단한 모형에서 여러 개의 매개변수를 감안해야 하는 모형 등과 같이 다양한 모형들이 개발되었으며, 현재까지 주로 사용되었던 유출모형은 HEC-1, SSARR, SWMM, SWAT 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 년 동안인 연속유출 모형은 불가능하다. SSARR 모형은 모의시간단위가 0.1 시간에서 24시간까지 가능

하며 연속유출모형으로서 하도유출모의 저수지모의가 가능하다. 하지만 SSARR 모형은 집중형 모형이어서 모의결과의 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 구역특성 (경사, 조도 등)을 갖는 직사각형구역으로 계산함으로써 토지이용의 공간적 변화가 유출에 미치는 영향 등은 고려할 수 없다. SWAT 모형은 물리적 기반 모형으로서 과거부터 최근까지 GIS(Geographical Information System)로 구축된 자료로부터 토양 (soil type), 토지이용 (land use), 지형정보를 추출하여 입력자료로 사용함으로써 자세하고 정확한 모의가 가능하다는 장점이 있다. 또한 GIS로 작성하되 토지이용자료를 사용하기 때문에 토지이용의 공간적 변화가 유출에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있다는 장점과 대상유역을 HRU(Hydrologic Response Unit)라는 계산단위로 나눠 수문모의를 함으로서 소유역부터 대구역까지 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.

1.2 SWAT 모형의 이론

1.2.1 모형의 개요

준 분포형 장기·강우유출모형의 대표적인 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형은 해당구역의 각각의 다른 표면특성 반응을 위하여 소유역으로 분할하고, 각 소유역의 공간적 단일한 토양 특성 및 토지이용을 반영하기 위하여 수문학적 반응단위(Hydrologic Response Unit, HRU)별로 세분화한다. 또한, 물의 거동을 포함한 유사이동 등의 모의를 위한 입력 자료로 해당 구역의 기상, 토양, 지형, 식생 등 특성 자료가 사용된다. 각 대상 유역에 대한 수문 모의 시 유출, 유사, 영양

물질의 이동 등을 정확하게 반영시키기 위하여 수문순환의 토지부분 및 추적부분으로 구분하여 모의되어야 하며, 이는 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적 부모형의 4가지로 세분화 할 수 있다. 수문 부모형에서는 각 수문학적 반응단위(HRU)에서 물수지 방정식을 근거로 일 단위 강수량, 침투량, 증발산량과 지표면 유출량을 산정하고, 수정범용토양손실공식(Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE)을 이용하여 토양침식 및 유사량을 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.

1.2.2 모형의 구조

SWAT 모형 모의를 통한 모든 연구에 있어 대상 유역에서 발생하는 모든 상호작용 중 물수지 분석은 필수적이며, 모의 시 수문순환(hydrologic cycle)과정과 유역 내에서 실제 발생하는 현상을 일치시켜야 한다. 따라서 정확한 SWAT 모의를 위하여 수문순환에 대한 모의를 물, 영양물질, 침전물, 살충제의 부하량 조절을 위한 토지 부분과 해당 유역의 하천조직에서 출구까지의 물과 유사 이동으로 정의 되는 수문순환 추적으로 구분된다.

1) 수문순환-토지

SWAT 모형의 수문순환의 토지부분의 구성 요소는 Fig. II-1 와 같이 재현되며, SWAT 모의시 오류 발생을 최소화 하기위하여 물수지 방정식에 근거하여 각 수문 반응단위 별로 강수, 증발산, 지표 유출, 기저 유출, 지하수 등에 대하여 계산 할 수 있다.

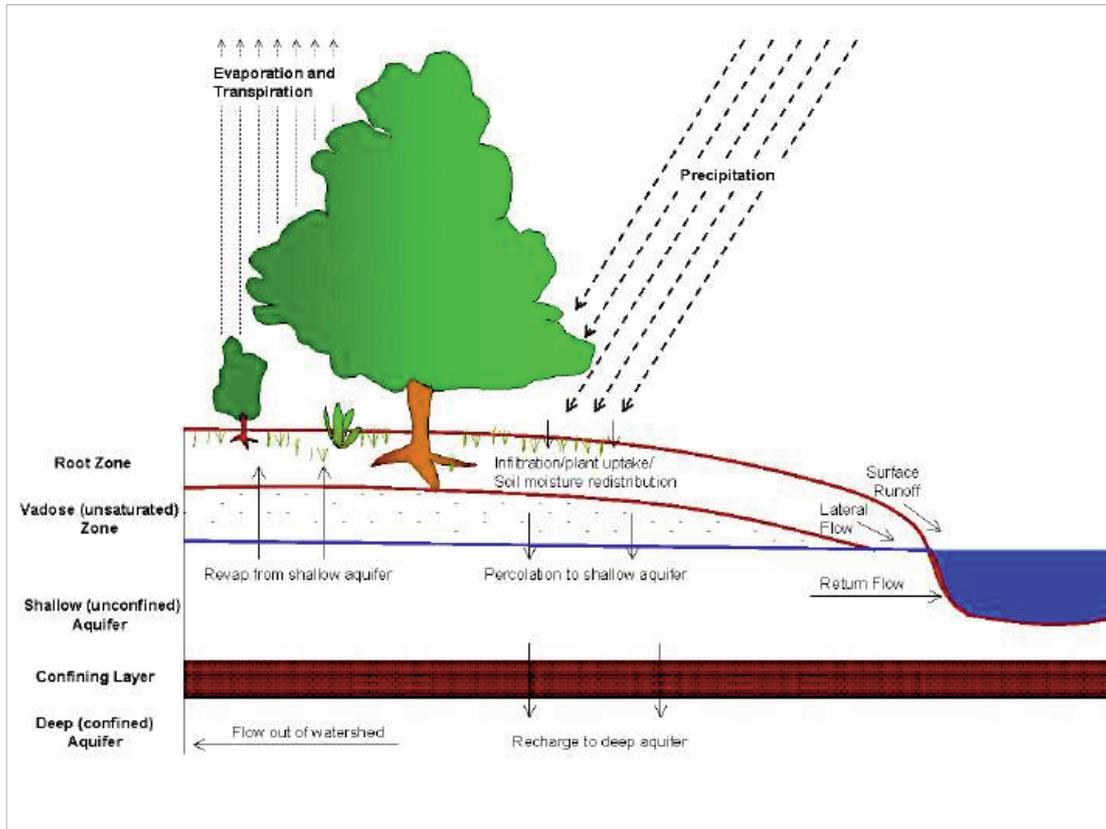


Fig. II-1. Floodgate circulation about the part of land (Arnold, 2000)

SWAT 모형에 적용되는 물수지 방정식은 식(1.1)과 같으며, 대상 유역을 여러 형태로 구분 모의 시 구분된 소유역의 작물 및 토양의 특징에 따른 증발산 반영이 가능하다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{t=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{식 (1.1)}$$

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)

또한, 각각의 수문반응단위별 유출 산정이 가능하고, 총 유출량 산정을 위하여 해당유역의 하도 추적이 이루어진다.

2) 수문순환-추적(routing phase of The hydrologic cycle)

수문순환 추적은 토지부분에 있어 주하천의 물 및 유사, 영양물질, 살충제 등의 부하 결정시 각각의 요소들은 HYMO(Williams and Hann, 1972)의 명령 구조와 유사하게 해당유역의 하천망을 통하여 추적된다.

SWAT에서 수문순환의 추적은 주된 하천이나 하도의 추적과 저수지 추적으로 구분되며, 하천이나 하도 추적은 홍수, 유사, 영양물질, 저수지추적은 유출량, 영양물질, 유입 유사 등을 추적할 수 있다.

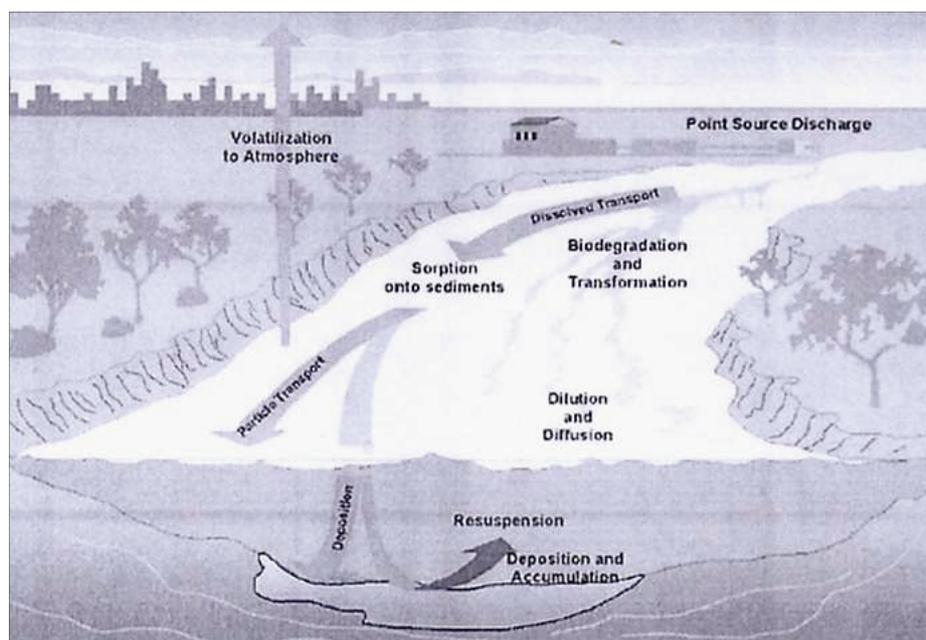


Fig. II-2. Tracing process of SWAT model about the river(Arnold, 2000)

1.2.3 기상

유역의 기상(climate)은 물수지 조절 및 수문순환 성분 중 상대적으로 중요한 사항을 결정하는 수분 및 에너지를 제공한다. SWAT에 입력되는 기상 변수들은 일강수량, 최고 및 최저기온, 일사량, 풍속 및 상대습도 등으로 각 요소의 값은 대상유역의 기상관측소의 관측 자료로부터 입력된다.

1) 에너지

유역의 물수지 분석을 위한 SWAT 모의 시 에너지의 유입은 필수적으로 고려되어야 하는 부분이다. 그 중 일사량과 온도 요소는 물의 거동을 조절하는 중요한 인자로 강수 등의 시스템 설명 시 필요하며, 이 요소들은 강설을 포함하여 모형에 가장 큰 영향을 차지한다. 또한 증발은 유역 모의 시 물의 주요 전이요소로서 물수지 분석의 정확성을 향상시킬수 있는 인자로 고려된다.

2) 기상발생기

일반적으로 SWAT을 모의하기 위하여 입력되는 기상자료는 기상관측소의 실 관측치를 데이터로 구축하여 입력 시키거나 기상발생기(weather generator)에 의한 매월 평균 값들의 모의 발생된 기상 자료를 사용하여 각각의 소유역별 기상 자료가 구축되어 모의가 이루어진다. 특히, Nicks(1974)에 의해 개발된 모형을 활용하여 관측자료의 결측치를 보완하는 등 강수량을 모의 발생시키기 한다.

3) 눈

SWAT 모형에 있어 강수량은 일평균 기온에 의해 강우나 눈으로 구분한다. 구분되는 임계온도(T_{s-r})는 모의자가 임의로 설정이 가능하다. 일평균 기온이 임계온도를 기준으로 강우나 눈으로 HRU에 적용되고, 눈을 물의 양으로 환산하는 강설량 등은 snow pack에 더해진다.

1.2.4 수문

강수가 발생되면 증발, 식물에 의한 차단 및 부착이 일어나며, 대부분은 지표면에 떨어져 토양층으로 침투되어 토양층을 포화시킨 후 지표면에서 유출 흐름을 보인다. 지표면의 흐름은 대부분 하천으로 유입되며, 최종적으로 강이나 바다 등으로 유출된다.

1) 지표 유출

지표 유출(surface runoff)은 강수 등으로 인한 지표층의 포화에 의해 발생되며, 지표면으로 침투되는 침투량 보다 수분공급량이 많을 때 일반적으로 발생된다. 강수 발생 시 초기 침투량은 토양의 성질에 따라 차이가 있으며, 토양 수분이 충전해

질수록 수분 공급량보다 침투량은 현저히 줄어들게 된다. 이러한 과정을 거치게 되면서 부터는 지표로 유출되는 유출량은 점진적으로 많아진다. 지표유출 평가를 위한 SWAT 모의시에는 일반적으로 SCS 유출곡선법(SCS, 1972)과 Green & Ampt 침투법(1911)을 선택할 수 있으며, 일 강우량 혹은 시 강우량을 적용하여 각각의 HRU별 지표 및 침투 유출량 모의가 가능하다.

① SCS 유출곡선법

SCS 유출 곡선법은 미국 농촌의 소유역을 대상으로 강우 및 유출의 관계를 규명하기 위한 연구결과로 1950년대에 사용된 경험모형이다. 이 방법은 유효우량 산정에 있어 비교적 정확성을 갖고 있으며, 토양특성을 비롯하여 수문학적 및 토양의 조건 등이 종합적으로 고려되었다.

식 (1.2)는 1972년에 연구된 SCS 유출곡선식이다.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad \text{식(1.2)}$$

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 의하여 공간적 및 시간적으로 변화한다. 즉, 공간적으로는 토양의 성질 및 토지이용, 경사 등의 변화, 시간적으로는 토양수분함량의 변동에 따라 변화한다. 저류 매개변수(S)는 식 (1.3)과 같이 정의되며, 초기손실 I_a 는 보통 0.2S로 나타낸다. 이 식(1.3)을 식 (1.2)에 적용하면 식 (1.4)와 같이 나타낼 수 있으며, 이 경우 유출은 $R_{day} > I_a$ 일 경우에만 발생한다.

$$S = 25.4 \left(\frac{100}{CN} - 10 \right) \quad \text{식 (1.3)}$$

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} - 0.8S)} \quad (1.4)$$

하지만, 실질적으로 통양의 성질을 양적으로 표현하기가 어려워 수문학적 토양군 (Table II-2)과 각각의 유역에 대한 토지이용 상태 및 식생 피복 처리상태(Table II-3)를 다음과 같이 분류하였다.

Table II-2. Classification of soil group in SCS runoff curve method

토양형	토양의 성질
A	낮은 유출율과 침투율이 매우 큰 자갈이 있는 부양질로 매우 양호한 배수조건
B	침투율이 대체로 크며, 돌 및 자갈이 섞인 사질토로 양호한 배수조건
C	대체로 침투율이 낮고, 가는 사질토로 불량한 배수조건
D	점토질 토양 및 불투수성으로 높은 유출율을 보이며 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
Pasture or range	Contoured	Poor	68	79	86	89
		Fair	49	69	79	84
		Good	39	61	74	80
		Poor	47	67	81	88
		Fair	25	59	75	83
Meadow	Contoured	Good	6	35	70	79
		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
Commercial and Business Area	85% impervious	-	89	92	94	95
Industrial Area	72% impervious	-	81	88	91	93
Residential Area	65% impervious	-	77	85	90	92
	30% impervious	-	59	71	86	86

② 유출 제적: Green & Ampt 침투법

Green & Ampt 침투법은 지표면에서의 과잉수를 가정한 침투 예측을 위하여 개발되었으며, 이 공식을 적용한 SWAT 모의 시 일 단위 이하의 강우자료를 입력하여 침투량으로 저류 시간을 모의 하는 방법이 사용된다. 또한, Green & Ampt 침투법의 적용은 토양층의 균질, 토양층 내 선형함수의 균일 분포, 물이 토양층 내부로 침투 시 습윤점 접촉면 상부의 토양은 완전히 포화되었다는 것을 기본 가정으로 한다.

식(1.5)는 Green & Ampt Mein Larson 침투율을 나타낸다.

$$f_{\infty,t} = K_e \cdot \left(1 + \frac{\psi_{wf} \cdot \Delta\theta_v}{F_{\infty,t}}\right) \quad \text{식 (1.5)}$$

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 침투 유출량(Peak runoff rate)

침투 유출량은 일정기간을 기준으로 유출량 곡선을 작성 시 가장 높은 유출량 지점을 말하며, SWAT 모의 시 도달시간 동안 발생하는 강우량의 추계학적 기법을 사용하여 전체 일강우량의 함수로 추정되는 수정 합리식을 이용하여 침투 유출량을 산정한다.

2) 증발산

증발산(evapotranspiration)은 지표의 증발 및 식물에 의한 증산 등에 의하여 발생하는 수증기량을 포함한 모든 과정을 의미하며, SWAT 모의 시 토양과 식물로부터의 증발은 Ritchie(1972)가 제안한 식을 사용한다. 또한, 잠재토양수분증발의 추정에는 잠재증발산과 엽면적 지수의 함수가 이용되며, 실제토양수분 증발량을 산정 시에는 토양심과 수분량의 지수함수, 식물의 증산은 잠재증발산 및 엽면적지수의 선

형 함수에 의해 모의 된다.

① 차단저류(Canopy storage)

침투·지표유출·증발산 등에 많은 영향을 미치는 차단저류는 강우 발생 시 식물의 표면에 부착된 형태로 증발 시 사용된다. SWAT 모형 모의에서 지표 유출량 산정을 위한 SCS 유출곡선 적용시에는 차단저류가 고려되며, Green & Ampt와 같은 방법이 침투 및 유출 산정에 적용시에는 차단저류를 별도로 구분시켜 고려하여야 한다.

식 (1.6)은 SWAT 모의 시 최대엽면적지수(LAI)를 토지 피복 적용 시 고려하여 차단·저장될 수 있는 최대값 산출을 위한 계식식이다.

$$can_{day} = can_{mx} \cdot \frac{LAI}{LAI_{mx}} \quad (1.6)$$

여기서, can_{day} : 해당 기간 내 차단 저류되는 최대수량(mm/day)

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

LAI_{mx} : 해당 기간 내 최대엽면적지수

② 잠재증발산(Potential evapotranspiration)

잠재증발산(Potential EvapoTranspiration; PET)은 토양을 완전히 덮고 있는 식생에 충분한 물이 공급 되는 상태에서 이류 및 열저류의 영향 없이 해당 지역의 증발산이 발생하는 비율(Thornthwaite, 1948)이며, Penman(1956)은 잠재증발산을 「지면을 완전히 덮고, 균일한 높이와 물부족이 전혀 없는 상태에서의 녹색 작물에 의해 증산되는 수분량」 이라고 정의하였다.

SWAT에서는 Penman-Monteith(Monteith, 1965; Allen, 1986), Priestley-Taylor (Priestley와 Taylor, 1972), Hargreaves(Hargreaves 등, 1985) 방법으로 잠재증발산량이 산정되며 각 방법의 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 식은 (1.7)과 같으며, 증발산 유지를 위한 에너지 및 수증기를 고려하지 않기 위하여 공기역학저항 등의 요소로 구성되어 있다.

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{\neq t} - G) + \rho_{air} \cdot c_p \cdot [e_z^0 - e_z] / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)} \quad (1.7)$$

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 는 식(1.8)과 같이 지표면이 습한 상태가 고려되며, 에너지 에너지 요소는 $\alpha_{pet} = 1.28$ 를 곱하는 방식을 취한다.

$$\lambda E_0 = \alpha_{pet} \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot (H_{\neq t} - G) \quad (1.8)$$

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($MJm^{-2}d^{-1}$)

③ 실제증발산(Actual evapotranspiration)

SWAT에서는 먼저 강우 발생시 식생에 의해 차단되는 증발량을 산정하고, Richtie(1972)의 방법과 유사하게 최대 증산량, 최대 승화 및 토양 증발량을 고려하여 실제 승화량과 토양 부분의 실제증발산량이 산출된다.

3) 토양수(Soil Water)

일반적으로 강우에 의해 침투된 물은 여러 형태로 거동하며 식물의 생장 및 증발의 형태로 소모된다. 토양수(Soil water)는 최종적으로 대수층에 충전되어 측방 이동을 통하여 하천수로 유출된다.

4) 지하수

지하수(groundwater)는 양압(Positive Pressure)이 작용하는 포화지대의 물로서 주로 침투(infiltration) 및 침투(percolation)에 의해 저류된다.

① 지하수 시스템(Groundwater System)

대수층은 '수문학적으로 물을 충분히 저장하고, 충분히 빠르게 운송할 수 있는 지질학적 단위(Dingman, 1994)'로 정의되며, 비피압 대수층은 대수층의 상부가 지하수위인 경우를 말하며, 지하수위는 수압과 대기압이 같아지는 깊이로서 정의된다. 피압 대수층은 상부에 피압층과 하부에 수리전도도가 대수층에 비해 매우 작은 값을 갖는 지질 구조로 되어 있는 대수층을 말한다. Fig. II-3 은 두 가지 형태의 대수층을 나타낸 것이다.

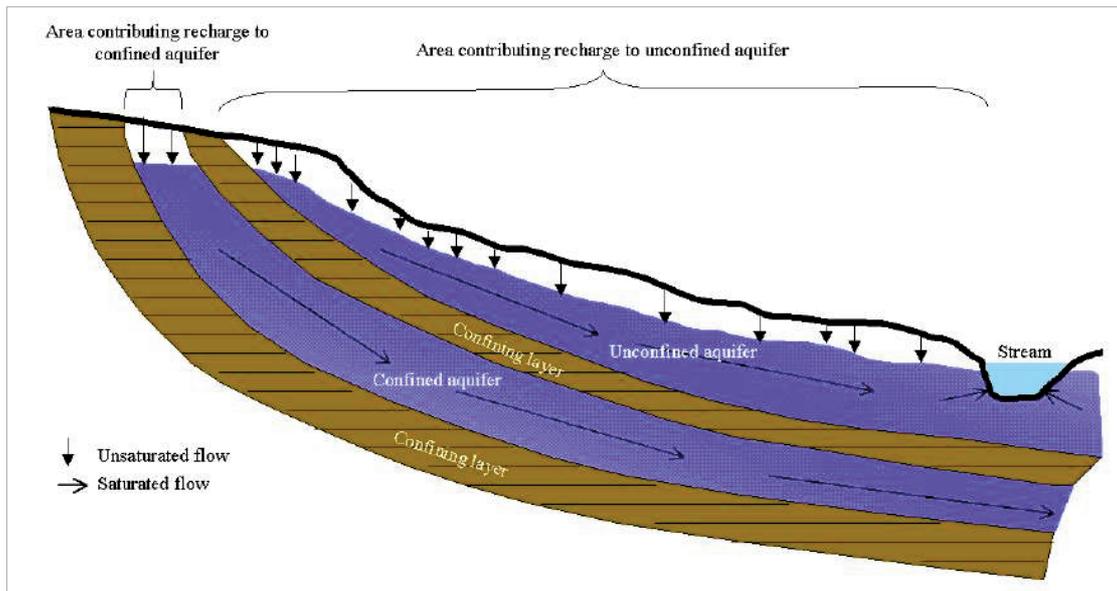


Fig. II-3. Oppressed/not-oppressed Aquifer(Dingmann 1994)

② 얇은 대수층(Shallow Aquifer)

얇은 대수층의 저류량은 모의기간 중 1일을 감한 얇은 대수층 유량과 모의기간의 대수층 함양수량을 합산하고, 동기간 내 주하천으로 유입되는 지하수량, 물 부족으로 인하여 토양지대로 이동하는 양, 얇은 대수층으로 침투되는 양 및 양수에 의해 얇은 대수층에서 배수되는 양을 감하여 산정된다(식, 1.15).

$$aq_{sh.i} = aq_{sh.i-1} + w_{rchrg} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{deep} - w_{pump.sh} \quad \text{식 (1.15)}$$

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)

물수지 분석에서 깊은 대수층으로 유입된 물의 양은 고려되지 않고, 시스템에서 손실로서 고려될 수 있으며 물수지는 식 (1.16)과 같이 나타낸다.

$$aq_{dp,i} = aq_{dp,i-1} + w_{deep} - w_{pump,dp} \quad \text{식 (1.16)}$$

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

SWAT 모형은 하나의 식물 성장모형을 통하여 모든 피복상태 모의에 적용시킨다. 이 식물 성장모형은 식생초기에서 수확기까지 또는 일 누가 열단위와 식물의 잠재 열단위와 같아질 때 까지 성장하는 일년생 식물과 연중 뿌리 조직 유지 및 겨울철을 휴기기를 갖는 다년생식물에 대하여 다르게 작용된다.

1.2.5 추적

1) 주 하천 및 하도에서의 추적

SWAT 모형에서는 Manning식을 적용하여 유속과 유량을 정의하며, 운동파(kinematic wave) 모형의 변형인 Muskingum 하도추적법이나 저류추적법은 형성된 하천망에 따라 유출을 추적된다.

변동추적법은 Williams(1969)에 의해 개발되었으며, 식 (1.17)과 같은 연속방정식은 주어진 하도구간에 대하여 기초로 작용하며,

$$V_{\in} - V_{out} = \Delta V_{stored} \quad (1.17)$$

V_{\in} : 시간 간격 동안의 유입량($m^3 H_2O$)

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

시점과 종점에서의 시간 간격 동안의 평균 유입율을 이용한 식으로 전개 시 식 (1.18)과 같이 된다.

$$q_{out,2} = SC \cdot q_{\in,ave} + (1 - SC) \cdot q_{out,1} \quad (1.18)$$

$q_{out,2}$: 종점에서서의 유출량(m^3/s) ,

$q_{out,1}$: 시점에서서의 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)

2) 저수지 추적

저수지의 물수지 분석에는 저수표면에서의 강수량, 유입량, 유출량, 증발량, 저수지 바닥으로의 침투량과 취수 등을 포함한다.

2. 지하수 유동해석 모형(MODFLOW)

현재 범용화되어 사용되는 지하수 유동해석 모형은 MODFLOW를 비롯하여 FELOW GW-VISTAS, PM, ARGUS, MS-VMS 등 여러 연구기관에서 각각의 특성에 맞게 개발되어 사용되고 있다. 그 중 MODFLOW 모형은 사용빈도가 가장 높은 모형으로 이론적 접근이 과학적으로 타당하고 각 현장 적용에 용이한 것으로 인정되고 있다(Han, 1999).

2.1 MODFLOW 모형의 이론적 배경

2.1.1 MODFLOW 모형의 개요

지하수를 해석하기 위한 대부분의 모형은 모의 시 해당 구역의 실제 지하수 환경을 일부 오차를 감안하여 특정 수치 등으로 단순화시켜 표현되며, 현 자연상태에서의 지하수 유동등 이와 관련한 상황 파악 및 미래의 예상되는 변화를 예측하는데 이용되고 있다.

일반적으로 특정한 유역을 대상으로 지하수 모의를 진행한다는 것은 유출량 예측 및 인접지역으로의 영향 파악 및 시공간적으로 변화하는 지하수두를 예측하여 효율적인 지하수 보전 및 관리하는데 목적을 둔다(Jung, 2003).

MODFLOW 프로그램은 지하수의 유동특성을 3차원으로 해석 가능한 모형으로 1998년에 개발되어 다공질 매체의 정류·부정류 상태의 유동해석이 가능하며, 모의하고자 하는 유역의 특성 반영성이 높다. 따라서, 지표수 및 지하수를 연계한 상호관계 분석, 지하수 이용에 따른 영향을 예측 분야의 해석 모형으로 사용되고 있다.

2.1.2 MODFLOW 모형의 방정식

본 모형에서는 3차원 유한차분법이 적용되어 다양한 수리·지질학적 구조 구현이 용이하며, 결과 또한 해석하기 간편하여 전 세계적으로 다양한 연구에 활용된다. MODFLOW 모형은 온도 및 밀도가 항상 일정한 상황임을 기본 가정으로 하고 있으며, 우물이나 강, 배수, 증발과 같이 복잡한 경계조건을 고려할 수 있다.

본 모델은 포화대에서 지하수 유동을 모의하고, 지배방정식은 다음과 같은 3개의

가정으로부터 도출된다.

- 모의 영역 : 포화대이며 대수층은 다공성 매질로 변형되지 않음
- 유체 : 비압축(incompressible) 상태
- 지하수 시스템 : 등온 조건

위 3가지 가정을 토대로 연속방정식 및 Darcy's의 법칙을 적용하면 지하수 유동 방정식을 유도할수 있으며, 이를 유한 차분하여 지하수 유동이 모의 된다. (식 2.1).

$$\frac{S}{b} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} (K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j}) \pm Q \quad (2.1)$$

K_{ij} : 수리전도도

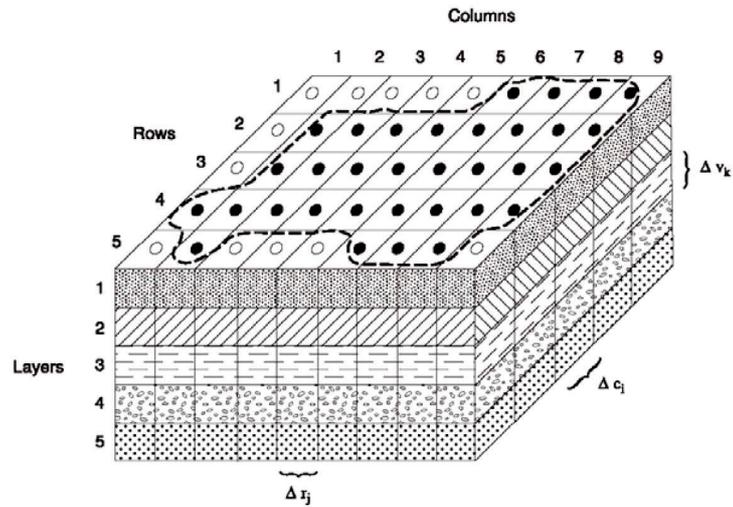
h : 동수두

Q : source&sink

s : 저류계수

b : 대수층 두께

유한차분법은 시각적 판단이 불가능하며, 지하수 유동특성 모의시 고려되는 다양한 특성인자들을 반영하기 위한 수치해석법으로 MODFLOW 모의 시 유한차분식을 지배방정식에서 직접 유도하고 pointwise approximation에 의한 방법으로 각 격자 점 간의 대수층 시스템을 cell block에 의해 공간적으로 도시한다(Choi, 2010)(Fig. II-4).



- 대수층 경계 (Aquifer Boundary)
- 활성화 셀 (Active Cells)
- 비활성화 셀 (Inactive Cells)
- Δr_j 횡방향으로 배열된 셀의 크기 (j는 종방향 Cell 수)
- Δc_i 종방향으로 배열된 셀의 크기 (I는 횡방향 Cell 수)
- Δv_k 수직방향으로 배열된 셀의 크기 (k는 layer 수)

Fig. II-4. Mimetic diagram of virtual aquifer

2.1.4 MODFLOW 모형의 Package

MODFLOW 모형은 사용이 용이하여 많은 연구분야에서 이용되고 있으며, 여러 서브루틴(subroutine)의 모듈을 주 운영체제와 연계한 각각의 패키지 활용은 수리·지질학적 문제 적용 및 해결을 위한 분석에서 뛰어난 적용성을 나타낸다.

유동성분의 Package는 BAS(basic), BCF(Block-Centered Flow), 우물(Well), 함양(Recharge), 강(River), 배수(Drain), 증발산(Evapotranspiration)등의 Package로 구성되어 있다.

BCF package는 대수층의 수리매개변수를 파악하여 어떠한 성질의 대수층인지 지정하고, 지하수 유동 지배방정식, cell × cell의 유동, storage의 유동을 계산한다.

Well package는 지하수관정의 위치, 양수량 등 입력, 유동 상황 모의, 지하수 관정의 영향을 유한차분식에 하나의 항으로 입력하여 계산한다. 여기서 격자내부에 위치한 지하수 관정은 항상 격자 중앙에서 양수가 이루어지는 것으로 계산된다.

RCH package는 함양율(recharge rate)을 이용하여 지하수 함양량 자료를 입력한다. 각각의 격자의 함양량은 함양율에 넓이를 곱한 값이 할당되며, 하나의 항으로서 유한차분식에 추가된다.

PCG2 package는 선형 및 비선형의 미분방정식으로 나타나는 유동방정식을 계산하는데 사용되며, 두 개의 preconditioning 조건을 갖는다. 하나는 다항식을 이용하고, 하나는 불완전한 Cholesky방법을 이용하며 비선형 문제의 경우에 Picard반복법을 이용한다.

이외 BAS package는 layer수, 격자수, 시간단위 등 모형의 전반적인 구조를 취급하고, River package는 하천경계조건, Drain package는 배수관, Evapotranspiration package는 증발산을 모의 하는데 사용된다. 흐름성분의 package는 각 cell에 대해 유한차분의 계수를 계산하는 역할을 하며, 각각의 스트레스 package는 특정한 경계 흐름을 설명하는 계수를 공식화한다.

3. 하천 유지용수

3.1 하천유지유량 및 기준지점 선정

최근 이상기후의 영향으로 물부족 문제가 심각하게 대두되고 있는 가운데 가속화 되는 도시화 및 산업화에 따라 물 사용량은 급격하게 증가하고 있다. 물 수요량의 증가는 자연스럽게 하천, 강, 호수에서 취수되는 물의 양 증가로 이어져, 하천 등이 건천화 되어 주변생태계에 위협을 주는 상황까지 발생 될 수 있다. 따라서, 하천이 본래의 정상적 기능 및 상태를 유지하기 위하여 항상 흘러야 하는 일정량의 물이 유지되어야 하는데, 이를 ‘하천 유지유량’이라고 한다.

하천 유지유량은 관리자에 의해 대상하천의 하도구간이나 대표지점에서 적절한 기준과 방법을 통하여 합리적으로 산정하여 자연 및 인위적 기능을 유지·보전하기 위하여 노력하여야 한다.

하천유지유량은 수리·수문 및 환경조건의 변화에 따라 조정될 수 있으나 하천에 인위적 물의 흐름 등을 형성함으로써 변경 될 수 있다.

하천유지유량은 산정을 위한 기준지점 선정은 ‘하천법 시행령(제59조 제2항)’에 따라 수량·수질 관리를 위해 기준이 되는 적절한 지점을 선정하여야 한다. 즉, 충분한 수문자료 구축 및 유량관측 자료 구축, 하천 유출수 사용이 빈번한 지점, 해수 침투 등의 영향이 없고 하천환경 보전 및 개선 기준이 되는 구간의 대표 지점에서 하천 유지유량 산정이 이루어 져야 한다.

3.2 국외의 하천유지유량 산정방법

일본에서의 하천유지유량은 ‘유수의 정상적인 기능 유지를 위한 필요 유량’의 의미를 갖으며, 정상유량이라는 용어로 사용된다. 정상유량의 산정 시 하천특성, 생태계, 경관, 수질등 기타 정령 5항목(염해의 방지, 하구 막힘의 방지, 하천 관리 시설의 보호, 지하수위의 유지 등)이 고려되고 있으며, 우리나라의 하천유지유량 산정방법과 유사하다.

미국에서 하천유지유량은 “Instream Flow” 또는 “Minimum Flow”라 하며, ‘하천 내에서 물의 가치와 이용을 허용수준 이상으로 유지하기 위해 필요한 유량’으로 정의된다. 하천유지유량 산정 시 우리나라 또는 일본과는 달리 하천환경의 제반 항목을 필수적으로 고려하여야 하며, 갈수량, 생태계, 경관, 수운 및 수상위락 요소가 이용된다.

영국은 우리나라와 달리 하천 생태환경 유지를 위한 유량 확보 및 수운이나 수상 및 하천경관등이 고려되지 않고 있으며, 단지 하천유량이 일정 기준 이하로 감소했을 때 취수를 제한하여 하천 고유의 자연적 기능을 유지하고 있다.

3.3 국내 하천유지유량 산정

우리나라에서 하천유지유량을 산정하는 과정은 먼저 해당 하천의 유황, 유입량, 하도 상황, 자연·사회환경 등의 조사를 실시한 후 하도 내 기준점에서의 세부 항목별 필요유량을 산정하여야 한다. 하천유지유량 산정 시 기본적으로 갈수량이 고려되며, 갈수량 이외의 하천 수질보전, 하천생태계 보호, 하천경관보전, 지하수위 유지, 염수 침입방지, 하구막힘 방지, 하천시설물 및 취수원 보호 등 여러 항목의 필요 유량 감안 시 가장 큰 값을 하천유지유량으로 결정하고 있다.

3.3.1 하천유지유량 산정시 고려항목

1) 갈수량

과거 자연 상태 하천에서 갈수기에 흘렀던 유량으로서 자연과 사람이 공유할 수 있는 최소한의 유량을 말하며 국내에서는 기준갈수량, 평균갈수량 등을 산정한 후 해당 하천의 규모나 특성 및 유량공급 가능성 등을 고려하여 결정한다(Table II-5. 갈수의 개념, 박정훈, 2002).

Table II-5. Minimum flow concept

구분	설명	비고	
갈수량	갈수량	· 과거 자연상태에서 갈수기에 흘렀던 유량으로 자연과 사람이 공유할 수 있는 최소한의 유량 · 기준갈수량, 평균갈수량을 산정한 후 해당 하천의 규모나 특성을 고려하여 결정함	
	평균갈수량	· 1년중 365일을 흐르는 매년의 유량을 평균한 값	
	기준갈수량	· 10년빈도의 갈수량, 즉 10년에 한번씩 발생하는 갈수량으로 평균갈수량보다 작은 값임.(때로는 30년 빈도의 3위값을 사용하기도 함)	
갈수구분	기준내갈수	· 계획기준년(10년빈도의 갈수량)의 범위 내에서 발생하는 갈수	
	이상 갈수	· 계획기준년을 초과하는 갈수	
갈수량 크기 비교	기준갈수량	수식	국내
	평균갈수량	수식	국내
	10년빈도 7일연속 갈수량	· 매년 7일 연속유량의 일평균 중 10년에 1번씩 발생 확률이 갖는 유량(미국, 영국등에서 사용)	
	최빈유량	· 연중 가장 빈번히 발생하는 유량	
	크기비교	· 최빈유량 > 평균갈수량 > 기준갈수량 > 10년 빈도 7일연속 갈수량	

2) 하천 수질보전을 위한 필요유량

환경기초시설 등으로 최대한 처리한 후 남은 오염부하량을 고려하여 적정 수질을 유지하는데 필요한 유량을 말한다. 수질보전을 위한 필요유량 산정 방법은 먼저 수질특성 파악 및 평가 항목을 선정 후 목표수질을 설정하고 수질예측모형 등을 이용하여 필요 유량을 산정하고 있다.

3) 하천 생태계 보호

하천내 동식물의 서식처 유지에 적절한 수심, 유속 등 수리 조건을 제공할 수 있는 유량을 말한다. 국내에서 하천 생태계 보호를 위하여 사용하고 있는 방법은 어류의 서식처 유지에 필요한 수리조건을 제공하는 것에 그 초점을 맞추고 있으며, 하도구간별 어류 분포, 대표어종 및 대리어종 선정, 한계구간 등을 설정하여 산정한다.

4) 하천 경관 보전

하천이 풍부하고 정서적으로 안정된 분위기를 제공할 수 있는 자연공간으로 유지될 수 있도록 시각적으로 만족감을 느낄 수 있는 최소한의 유량을 말한다. 국내에서 하천 경관에 대한 수리학적 기준은 명확히 제시되어 사용된 것은 없는 실태이나 수면폭과 유속, 수심에 대한 수리학적 조건이 언급되어 있다. 또다른 산정 방법으로 기준 지점을 설정 한 후 해당 지점에서의 경관상에 대한 설문조사를 시행하고, 설문조사 결과를 분석하여 만족스런 경관을 창출하는 유량을 추정하는 방법을 사용하고 있다. 이때, 대상하천내의 주요 명승지, 관광지, 사적 등이 그 주요한 기준지점의 대상이 되고 있다.

5) 염수 침입 방지

바닷물이 하구로 침입하여 염분 농도가 높아지면 하천수를 직접 이용할 수가 없게 되므로 이를 억제하거나 침입을 방지할 수 있는 최소한의 유량을 말한다.

6) 하구막힘 방지

하구 유속감소로 인해 하구에서 토사의 퇴적과 해안 모래의 침입 등으로 하구가 막혀 유수소통에 지장을 초래할 수 있으므로 이를 제거하기 위한 유량을 말한다.

7) 하천 시설물 및 취수원 보호

하천수위가 낮아져 물 속에 잠겨있던 하천시설물이 노출되어 부식되는 것을 방지하거나 또는 취수원 수심 확보를 위해 필요한 유량을 말한다.

8) 지하수위 유지

하천유량의 증감은 하천 주변의 지하수위에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 하천변에서 안정적으로 지하수위를 유지할 수 있는 유량을 말한다.

9) 수상이용(수운 및 물놀이)

하천내에서 이루어지는 수상이용 중에서 수운과 관련하여 수심, 수로폭을 고려하여 산정하는 유량을 말한다.

Ⅲ. 연구대상 유역의 개황 및 농업용수 수요량

1. 연구대상 유역의 개황

제주도의 하천은 한라산 정상부에서 발원하여 경사가 급한 남·북측으로 143개의 지방하천 및 소하천이 분포하고 있다. 이들 하천의 대부분은 높은 함양 특성으로 인하여 평상시 건천의 형태를 보이며, 9개의 하천은 기저유출 성분으로 인해 상시적으로 하천의 흐름이 발생되고 있다.

본 연구에서는 제주 남부지역에 위치한 서귀포시 안덕, 서서귀, 중서귀 수역을 대상으로 상시하천 및 용천수의 농업용수 이용 가능성 분석을 위한 연구 대상유역으로 선정하였다. 또한 상시하천 및 용천수의 농업용수 활용 가능수량 산정을 위하여 연구대상 수역의 수문 및 지질학적 특성을 대표 할 수 있는 약근천 유역을 대상으로 물수지 분석을 실시하였다(Fig. III-1.).

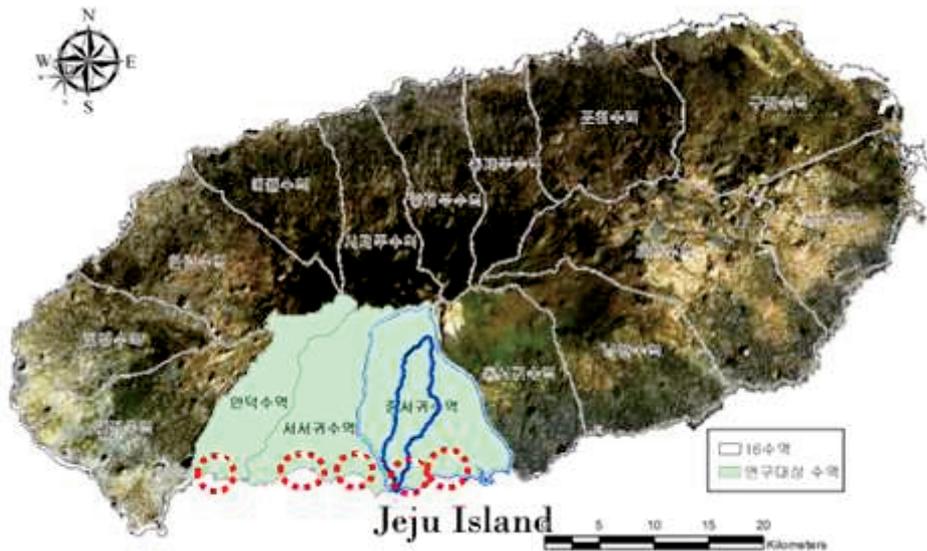


Fig. III-1. Map of basin for this study

2. 농업용수 수요량

2.1 단위용수량 및 2020년 기준 주요작물재배면적

현재 '제주 농업용수 통합 광역화사업'에 따른 농업용수 수요량 산정에 의하면 현재 제주도의 농경지 54,142ha 는 논 711ha, 밭 36,642ha, 과수원 16,584ha, 기타 205ha로 분류된다. 농업용수의 대부분이 밭관개로 이루어지고 있으며, 밭관개를 전제로 한 농업용수 단위용수량은 제주시 동지역이 0.00109 ($m^2/sec/ha$)로 한림읍 0.00080, 한경면 0.00087, 애월읍 0.00066, 조천읍 0.00093 ($m^2/sec/ha$)보다 많은 양이 산정되었고, 서귀포시 지역은 동지역이 0.00095, 대정읍 0.00095, 안덕면 0.00081, 남원읍 0.00088, 표선면 0.00062, 성산읍 0.00057($m^2/sec/ha$)로 나타나는 것으로 조사되었다. 또한, 2020년 기준 주요작물 재배면적은 농업용수 수요량이 적은 잡곡류를 제외한 채소류, 감귤, 식량작물을 대상으로 산정되었으며 결과는 Table III-1. 과 같다.

Table III-1. Plantation area by crop in 2020

(단위 : ha)

권역	총 재배면적	채소 재배면적	감귤 재배면적	식량작물 재배면적	주요 재배작물 (채소류)	
제주도	48,421.2	15,010.7	18,500.0	14,910.5		
제주시	소계	25,331.0	8,786.1	5,599.7	10,945.2	
	동지역	2,798	220	1,679	899	무, 파
	한림읍	3,724	1,121	507	2,096	양배추, 양파, 마늘
	애월읍	4,786	2,122	1,303	1,361	양배추, 파, 무 양파, 수박, 마늘
	구좌읍	6,334.7	2,869.1	78.2	3,387.4	당근, 무, 감자, 마늘, 파, 양파
	조천읍	2,475	571	1,271	633	호박, 마늘, 무, 양파, 수박
	한경면	5,213	1,883	762	2,568	마늘, 양파, 양배추, 무, 파
서귀포시	소계	23,090	6,225	12,900	3,965	
	동지역	4,386	17	4,357	12	-
	성산읍	3,908	2,574	845	489	무, 당근, 호박, 감자, 배추
	표선면	2,661	620	1,482	559	무, 호박, 감자, 당근
	남원읍	4,809	1	4,790	18	-
	안덕면	2,361	251	817	1,293	마늘, 감자, 파
	대정읍	4,965	2,762	609	1,594	마늘, 호박, 감자, 무, 양파, 양배추, 배추

2.2 농업용수 수요량

제주특별자치도의 재배작물, 작물별 면적, 작부체계, 토양과 기후의 지역적 특성을 반영하여 산정한 수요량을 기준으로 한 농업용수 수요량은 11개 권역의 계획 급수대상면적 37,071ha중 급수계획면적 33,824ha에 대한 10년 빈도 가뭄 시 채소류, 감귤, 감자의 농업용수 수요량 산정결과(2020년 기준), Table III-2.와 같이 제주시 539,554m³/일, 서귀포시 699,998m³/일로 총 1,239,552m³/일로 조사되었다.

Table III-2. Agricultural water demand in Jeju

구분	급수 대상면적 (ha)	급수 계획면적 (ha)	수요량 (m ³ /일)	비고
제주특별자치도	37,031	33,824	1,239,552	
제주시	15,855	14,851	539,554	
서귀포시	21,176	18,973	699,998	

주) 농업용수 수요량 산정은 농어촌연구원 FAO에서 제안한 방법에 따라 작성한 관개용수량 산정프로그램 이용

자료 : 제주특별자치도 농업용수 통합 광역화사업 예비타당성 조사(2016년도), 한국개발연구원

2.3 농업용수 과부족량 검토

제주특별자치도 11개 권역에서 이미 개발된 농업용수량은 제주시 406,147m³/일, 서귀포시 513,512m³/일로 총 919,659m³/일로서 농업용수 수요량 1,239,522m³/일에 대한 과 부족량은 제주시 -133,407m³/일, 서귀포시 -186,486m³/일로 총 319,893m³/일이 부족한 것으로 조사되었다(Table III-3.).

Table III-3. Agricultural water demand in regional

권역	급수대상면적 (ha)	급수계획면적 (ha)	단위용수량 (m ³ /일/ha)	농업용수 수요량 (m ³ /일)	기 확보량 (m ³ /일)	과부족량 (m ³ /일)	
제주도	37,031	33,824	-	1,239,552	919,659	-319,893	
제주시	소계	15,855	14,851	-	539,554	406,147	-133,407
	동지역	3,062	2,636	46.91	123,652	58,055	-65,597
	한림읍	2,602	2,470	34.76	85,856	72,116	-13,740
	애월읍	4,888	4,586	28.49	130,653	105,081	-25,572
	조천읍	2,084	1,986	40.28	79,995	49,224	-30,771
	한경면	3,219	3,173	37.63	119,398	121,671	+2,273
서귀포시	소계	21,176	18,973	-	699,998	513,512	-186,486
	동지역	4,192	3,908	41.21	161,047	116,371	-44,676
	성산읍	1,847	1,473	24.59	36,220	25,286	-10,934
	표선면	2,438	2,192	26.79	58,722	45,328	-13,394
	남원읍	5,547	4,510	37.97	171,244	110,302	-60,942
	안덕면	1,857	1,646	34.93	57,459	40,279	-17,180
	대정읍	5,295	5,245	41.05	215,306	175,946	-39,360

자료 : 제주특별자치도 농업용수 통합 광역화사업 예비타당성 조사(2016년도),
한국개발연구원

IV. 유출량 관측 및 농업용수 활용 가능성 분석

1. 상시하천 및 용천수 관측

제주도 서귀포시에 위치하는 주요 기저유출 하천인 2개의 상시하천 및 8개 용천수에 대하여 농업용수 활용 가능성 분석을 위한 관측 기간(2017. 06 ~ 2017. 10) 동안 초음파 디지털 유속계를 활용하여 월 2~4회 유출량 관측을 실시하고 압력식 수위계(DIVER)를 설치하여 각 관측지점의 연속적인 수위 자료를 확보하였다. 또한, 농업용 수질 적합성을 판단하기 위하여 각 관측시 마다 질산성 질소·염소이온에 대한 수질 분석을 실시하였으며, 관측 기간 내 농업용수 사용 기준 14개 항목에 대하여 갈수기 1회에 한하여 종합 수질분석을 실시하였다.

1.1 유출량 관측

상시하천 및 용천수의 세부조사 지점은 향후 대체수자원으로의 활용가능성을 고려하여 환경적 영향이 적고 안정적인 용수공급이 가능한 바다로 유출되는 출구점을 관측 지점으로 설정하였다.

상시하천 및 용천수의 유출량 조사는 총 15회 실시 되었으며, 관측결과는 Table IV-1과 같다.

Table IV-1. Spring water observation using ADC

(단위 : m^3/s)

관측일자	속골물	조이통물	평망물	선켓내물	논짓물	논짓물	작지물	대왕수	하강물
					남탕	여탕			
2017.06.09	0.157	0.149	0.428	0.098	X	X	X	0.058	0.032
2017.06.27	0.261	0.211	0.462	0.072	0.016	0.011	X	0.072	0.025
2017.07.05	0.327	0.143	0.402	0.085	0.006	0.009	X	0.066	0.032
2017.07.18	0.284	0.247	0.415	0.066	0.012	0.008	X	0.033	0.035
2017.07.26	0.199	0.110	0.456	0.084	0.007	0.007	0.076	0.036	0.014
2017.08.02	0.260	0.142	0.333	0.052	0.008	0.007	0.078	0.024	0.011
2017.08.09	0.343	0.225	0.352	0.059	0.007	0.007	0.087	0.024	0.010
2017.08.16	0.266	0.180	0.349	0.070	0.007	0.007	0.090	0.040	0.026
2017.08.23	0.202	0.245	0.368	0.112	0.010	0.009	0.097	0.046	0.029
2017.09.01	0.199	0.173	0.342	0.082	0.004	0.007	0.085	0.036	0.044
2017.09.08	0.163	0.184	0.308	0.092	0.008	0.007	0.094	0.036	0.031
2017.09.15	0.145	0.181	0.268	0.083	0.003	0.007	0.090	0.028	0.031
2017.09.22	0.201	0.186	0.317	0.071	0.011	0.004	0.084	0.022	0.029
2017.09.29	0.220	0.164	0.377	0.092	0.016	0.012	0.078	0.031	X
2017.10.06	0.391	0.297	0.569	0.204	0.013	0.014	0.146	0.101	0.038

1.2 수질 관측

상시하천 및 용천수의 농업용수 활용 적절성을 파악하기 위하여 연구대상 기간 동안 매 관측시 마다 질소 및 염소이온에 대하여 수질 검사를 실시하였으며, 농업용수 사용 기준 14개 항목에 대해서는 갈수기 1회에 한하여 분석을 실시하였다.

농업용수 수질 기준에 대한 주요 성분 분석 결과는 Table IV-2. 과 같다.

Table IV-2. Principal component analysis for agricultural water quality standards

회차	관측지점	속골물	조이통물	평망물	선곶넛물	논곶물	대왕수천	작지물	하강물	악근천	예래천
	성분	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L						
1회	CI-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	NO3-n	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2회	CI-	7.1	5.7	8.0	9.4	15.0	13.9	X	23.1	6.7	17.9
	NO3-n	1.9	1.0	2.8	2.7	3.9	2.4	X	4.7	0.8	3.7
3회	CI-	6.8	5.6	7.9	9.2	15.0	13.7	X	21.3	5.3	16.0
	NO3-n	1.8	0.9	2.8	2.8	3.8	2.7	X	3.9	0.8	3.9
4회	CI-	6.9	5.7	7.7	9.2	15.9	14.4	X	57.9	5.4	x
	NO3-n	1.8	0.9	2.4	2.5	4.2	2.5	X	5.2	0.7	x
5회	CI-	6.6	5.5	7.5	9.0	15.6	14.5	X	32.3	5.3	18.0
	NO3-n	1.8	0.8	2.2	2.4	4.1	1.9	X	3.9	0.7	3.6
6회	CI-	7.2	6.3	8.4	9.4	15.9	14.3	1603.5	38.7	6.2	20.0
	NO3-n	1.8	1.0	3.4	2.9	4.4	2.0	5.6	4.3	0.8	3.8
7회	CI-	7.1	6.3	7.8	9.3	16.8	47.4	1368.8	30.5	5.5	20.7
	NO3-n	0.4	0.9	1.3	3.1	4.4	0.2	8.2	4.1	0.5	2.5
8회	CI-	7.3	6.0	9.0	9.8	17.4	14.4	1258.3	32.0	5.6	19.6
	NO3-n	2.2	1.9	4.5	3.9	4.8	3.1	8.5	5.1	1.3	4.4
9회	CI-	7.6	6.5	9.1	9.8	18.7	14.4	1157.2	28.0	6.2	16.6
	NO3-n	2.7	2.4	4.6	3.7	5.1	3.9	5.9	6.0	1.6	5.0
10회	CI-	7.0	5.8	8.0	9.1	16.6	15.4	1047.1	23.9	5.4	19.3
	NO3-n	1.9	1.3	2.7	2.2	4.4	1.5	5.4	5.2	0.7	3.8
11회	CI-	6.9	6.3	8.2	9.3	17.9	15.0	1332.6	73.5	5.4	15.0
	NO3-n	2.1	1.3	3.5	3.0	4.5	2.2	5.4	6.0	1.0	3.0
12회	CI-	6.9	5.7	7.9	9.1	17.2	14.8	1152.7	21.3	5.4	17.2
	NO3-n	1.5	0.9	3.0	2.4	4.4	1.7	4.4	4.2	0.5	3.4
13회	CI-	6.7	5.7	7.9	8.9	16.7	15.0	1414.7	20.9	5.2	16.0
	NO3-n	1.9	1.1	2.6	2.9	4.3	2.3	5.4	4.6	0.8	3.5
14회	CI-	6.9	5.8	7.8	9.1	16.7	15.3	632.7	x	5.3	19.3
	NO3-n	1.7	0.4	2.2	불검출	4.0	불검출	4.7	x	0.7	2.8

2. 농업용수 활용 가능 유출수 선정

농업용수로 활용 가능한 2개 상시하천수 및 8개 용천수의 평가 기준은 관측자료를 바탕으로 유출량 및 농업용수 수질의 적합성을 판단하여 분석하였다. 해당 관측 지점의 유출수를 농업용수로 사용하기 위한 방법으로는 인근 공공 농업용 고가수조에 물을 공급하는 소규모 이용 형태를 활용하는 방법, 인근지역을 포함한 수조를 시설하고 상시하천수 및 용천수를 끌어올려 저류한 후 하류지역 농경지에 공급하는 방안 등이 있다. 이들 방법으로 농업용수로 공급하기 위해서는 첫째, 유출수가 농업용수 수질 기준을 충족하여야 하며, 둘째 경제성등을 고려했을 때 일 2000~3000m³의 유출수가 필요할 것으로 판단된다(제주도,2016).

따라서, 본 연구에서 농업용수 활용 가능성 분석을 위하여 농업용수 14개 수질 기준 충족 및 일평균 유출량 2000~3000 m³ 이상으로 기준을 설정하였으며, 유출량의 경우 가뭄 빈도 상승 및 외부 취수 등으로 한시적 수위 강하가 발생된 경우에는 세부 유출자료를 토대로 농업용수 활용 가능성을 판단하였다. 유출량 산정 및 수질 분석 결과는 다음과 같다.

2.1 유출량 산정

상시하천 및 용천수의 유출량은 관측 자료를 기반으로 산정하였으며, 산정 결과 평균 유출량은 평망물이 18,690.2 (m³/day) 으로 가장 많은 유출이 나타나는 것으로 분석 되었으며, 속골물 18,172.0 (m³/day), 조이통물 14,662.9 (m³/day) 등의 순으로 유출량이 분석되었다(Table IV-3).

Table IV-3. Results of calculation for runoff

관측지점	유출량		
	최저유출량(m ³ /일)	최고유출량(m ³ /일)	평균유출량(m ³ /일)
악근천	1043.6	113389.2	8130.5
예래천	2114.4	3001.6	2583.1
속골물 하류	6313.3	32504.8	18172.0
조이통물 하류	11406.3	18600.4	14662.9
평망물 하류	8402.8	34702.6	18690.2
선켓내물 하류	4290.8	20380.3	7449.9
논짓물(남탕) 유입부	322.1	1004.5	702.2
논짓물(여탕) 유입부	368.7	1155.2	695.8
대왕수 하류	492.5	18946.1	3623.8
작지물 하류	7060.4	9581.9	8090.1
하강물 하류	1487.6	3658.3	2402.0

2.2 수질 분석

상시하천 및 용천수의 수질을 농업용수 사용기준 14개 항목에 대비하여 분석한 결과 작지물을 제외한 나머지 9개 지점의 수질은 선정기준에 적합한 것으로 판단되었다.

2.2.1 농업용수 수질 기준에 대한 주요 성분 분석

농업용수 수질 기준의 적합성을 상시적으로 판단 시 주요 항목인 질산성 질소 및 염소이온에 대한 분석을 우선적으로 실시한다. 질산성 질소의 농업용수 사용 기준은 20mg/L 이하로 과거의 유기오염 정도를 나타내는 데 쓰이며, 염소 이온은 수중에 용존하고 있는 염화물 중의 염소분을 말하며 농업용수 사용 기준은 250mg/L 이하이다. 농업용수 수질 주요 성분에 대한 분석 결과는 다음과 같다(Fig. IV-1. ~2., Table IV-4. ~6.)

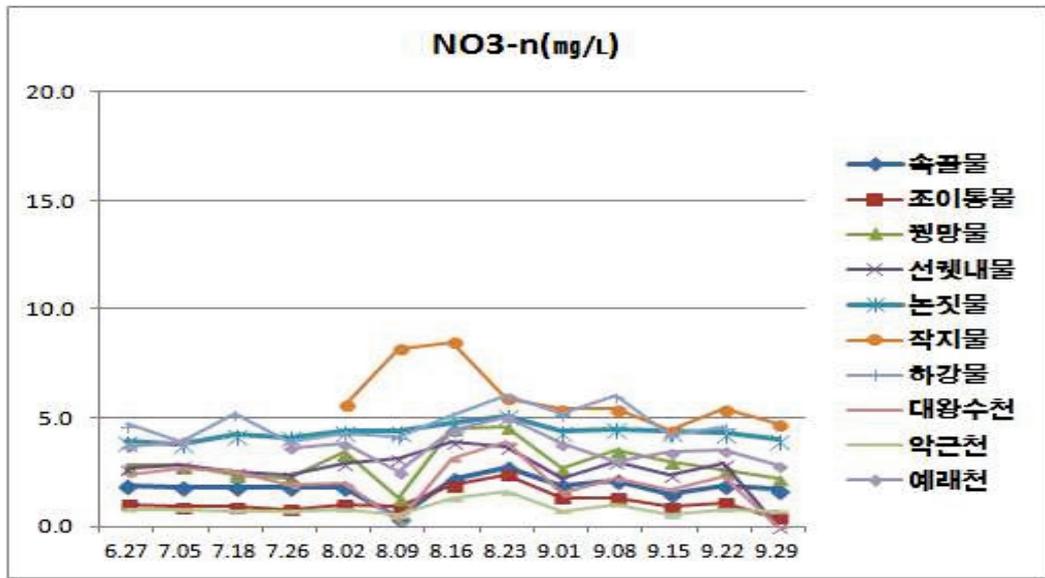


Fig. IV-1. Analysis of water quality standards for agricultural water(NO_3^-)

Table IV-4. Analysis of water quality standards for agricultural water(NO_3^-)

$\text{NO}_3 - N$		$\text{NO}_3 - N$ 수질기준 : 20mg/L 이하		
구분	최소	최대	평균	수질기준
속골물	0.4	2.7	1.8	적합
조이통물	0.4	2.4	1.1	적합
평망물	1.3	4.6	2.9	적합
선켓내물	2.2	3.9	2.9	적합
논짓물	3.8	5.1	4.3	적합
대왕수	0.2	3.9	2.2	적합
작지물	4.4	8.5	5.9	적합
하강물	3.9	6.0	4.8	적합
악근천	0.5	1.6	0.8	적합
예래천	2.5	5.0	3.6	적합

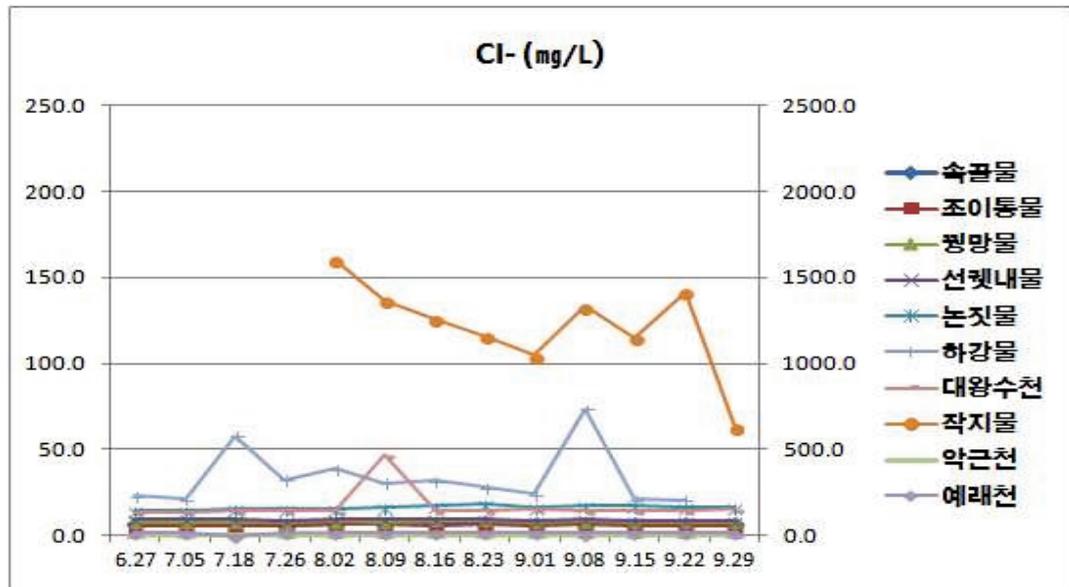


Fig. IV-2. Analysis of water quality standards for agricultural water(Cl⁻)

Table IV-5. Analysis of water quality standards for agricultural water(Cl⁻)

Cl ⁻ 수질기준 : 250mg/L 이하				
구분	최소	최대	평균	수질기준
속골물 하류	6.6	7.6	7.0	적합
조이통물 하류	5.5	6.5	5.9	적합
평망물	7.5	9.1	8.1	적합
선젯내물	8.9	9.8	9.3	적합
논짓물	15.0	18.7	16.0	적합
대왕수	13.7	47.4	17.1	적합
작지물	632.7	1603.5	1218.6	부적합
하강물	20.9	73.5	33.6	적합
약근천	5.2	6.7	5.6	적합
예래천	15.0	20.7	18.0	적합

Table IV-6. Analysis of water quality standards for agricultural water(14)

구분	수질검사 일자					2017년 9월 22일				
	검사항목(용도)					농업용수 14개 항목				
성분	속골 물	조이 통물	평망 물	선켓 내물	논짓 물	작지 물	하강 물	대왕 수	약근 천	예래 천
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
수소이온농도	7.1	7.4	7.7	7.9	7.4	6.6	7.1	7.7	7.7	7.9
질산성질소	1.9	1.1	2.6	2.9	4.3	5.4	4.6	2.3	0.9	3.5
염소이온	6.7	5.7	7.9	9.9	16.7	1414.7	20.9	15.0	5.2	16.0
카드뮴	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
비소	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
시안	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
수은	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
유기인	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
페놀	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
납	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
6가크롬	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
트리클로로 에틸렌	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
테트라클로로 에틸렌	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
1,1,1-트리클로 로에탄	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
수질기준 초과항목	없음	없음	없음	없음	없음	염소 이온	없음	없음	없음	없음
판정	적합	적합	적합	적합	적합	부적합	적합	적합	적합	적합

2.3 농업용수 활용 가능성 분석

본 연구에서 농업용수 활용 가능성 분석을 위하여 관측 기간(2017. 06 ~ 2017. 10)동안 농업용수 14개 수질 기준 충족 및 일 평균 유출량 2000~3000 m^3 이상 기준을 설정하여 농업용수 활용 가능성을 분석한 결과 악근천, 대왕수, 선곶내물, 평망물, 조이통물, 속골물 지점이 지속적이고 안정적으로 농업용수 공급이 가능한 것으로 분석되었다.

악근천은 최저유량이 1,043 (m^3/day) 로 설정된 유량 범위를 벗어났으나, 관측이 실시된 2017년은 가뭄 등으로 인하여 일시적인 유출량 감소가 발생되었으나 평균유출량 8130.5 (m^3/day)를 기록하는 등 외부적인 요인이 작용하지 않을 시에는 농업용수 활용 가능성이 높을 것으로 판단되었다.

예래천의 경우 유량과 수질 범위는 모두 충족하였으나 하수처리장 내에 위치하고 있으며, 하천수를 일부 정화용수로 이용되는 등의 이유로 농업용수로 활용 가능한 지점에서 제외시켰다. 또한, 논짓물(남·여탕)은 유출량 자체가 현저히 낮게 형성되어 농업용수 활용 용천수에서 제외시켰으며, 작지물과 하강물 추가 주변 환경조사 결과 간헐적 염수 침투의 우려로 대상 용천수에서 제외시켰다.

V. SWAT-MODFLOW 모의

1. SWAT 모형에 의한 장기유출 모의

미국 농무성의 농업연구소(USDA, Agricultural Research Service, ARS)와 Jeff Arnold 등이 개발한 준 분포형 장기-강우유출모형 SWAT은 일 단위로 모의가 가능하고 토양특성과 토지이용도 및 토지관리의 영향에 의한 물, 유사 및 농업화학물질의 이동 특성에 대한 영향성을 예측이 가능하다.

SWAT 모형 모의 시 적용되는 기본 입력 자료는 크게 기상자료와 지형자료로 구분된다. 먼저, 입력되는 기상자료로 강우, 일사량, 습도, 풍속, 최고·최저 기온 등이 있으며, 각각의 자료는 기상관측소의 위치정보 등 속성 값이 입력되어야 한다. 또한 물리적 특성 반영을 위한 지형자료로는 토지피복도, 토양도 및 해당 유역에 포함되는 하천망 자료 등의 구축을 통하여 모의 분석이 가능하다.

1.1 대상 유역의 수문·기상 자료 구축

SWAT 모형 구동 시 연구대상유역에 대한 수문자료와 기상자료를 각각의 소유역 입력 자료로 적용하는 것이 가장 이상적인 방법이지만, 모의하고자 하는 유역의 대부분의 경우 소유역에 대한 각각의 입력 자료를 구축하는 것은 한계가 있다. 따라서, 이러한 한계점을 보완하기 위하여 SWAT 모형에서는 각 소유역에 영향을 미치는 인접한 기상관측소의 자료를 각 소유역별 수문·기상자료로 사용한다.

수문·기상자료 구축 시 주의 해야 할 사항으로는 각각의 자료에 기상관측소의 위치정보를 포함시켜 모의 시 각 기상관측소의 값이 유기적으로 연계 될 수 있도록 하는 것이다. 즉, 해당 관측소의 위치정보 속성을 연계하기 위하여 파일명은 pre.*, climate.*, hum.*, solar.*, wind.* 등으로 구축하고, 각 데이터 파일에 해당하는 기상자료 값을 읽어 들일 수 있게 해야 한다.

1.1.1 기상자료 구축 및 분석

현재 제주도에서 운영되는 기상관측소는 종관 기상관측 4(제주, 서귀포, 성산포, 서귀포)개소, AWS(Auto Weather System) 36개소, 제주시 재난안전대책본부가 관

할하는 48개소로 총 88개소로 면적대비 매우 조밀하게 분포하고 있다. 하지만, 본 연구의 연구대상구역인 악근천 유역내에 위치하는 관측소가 없는 관계로 악근천 유역에 영향을 주는 유역 인근 4개소의 기상관측소 자료를 모의 자료로 적용하였다.

1) 기상자료 구축

악근천 유역의 주변 기상관측소는 서귀포 기상대 및 윗세오름, 어리목, 중문의 자동강우량 관측시스템(AWS)이 위치하고 있으나 SWAT 모의에 활용된 기상관측소는 ASOS 기준으로 작성된 티센망 내에 위치하며 악근천 유역에 영향을 주는 기상 자료를 연구대상 기간(2003. 01 ~ 2019. 06)의 기상자료를 구축하였다. 하지만, 연구대상 유역의 기상 시황등을 고려하기 위하여 나머지 3개의 관측소에 대한 강우자료에 대해서도 강우분석을 실시하였다. SWAT 모의 기초 자료로는 서귀포 기상대 자료를 이용하여 일강우량, 최고·최저 기온, 태양복사량, 평균풍속, 습도에 관한 데이터베이스를 구축하였다(Table V-1.).

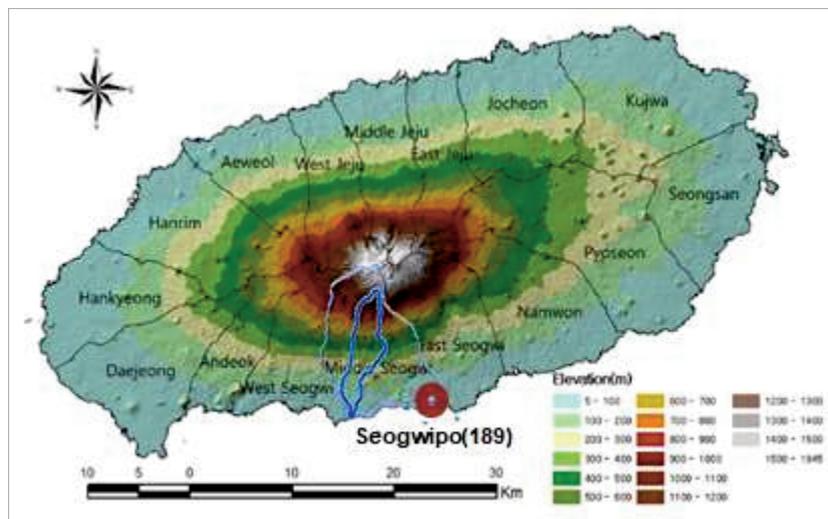


Fig. V-1. Location of meteorological observatory of the basins to be studied

Table V-1. Location of meteorological observatory of the basins to be studied

Observation post	Name	Latitude	Longitude	Elevation(m)
Weather station (189)	Seogwipo	33.24	126.56	47
AWS (328)	Jungmun	33.24	126.40	63
AWS (753)	Eorimok	33.39	126.49	967
AWS (871)	Wekse	33.36	126.51	1668

2) 기상자료 분석

가. 강우량 분석

약근천 유역에 영향을 주는 기상대 및 해당 유역에 인접한 강우 관측소의 기상자료를 비교·분석한 결과는 년별 Fig. V-2., Table V-2. 및 월별 Fig. V-3., Table V-3. 과 같다.

각 기상관측소에서 구축된 기상자료 16(2003. 01 ~ 2018. 12)개년의 연도별 평균 강우량은 서귀포 1963.2 mm, 중문 1691 mm, 어리목 3141.5 mm, 윗세오름 3762.1 mm 이다. 연도별 최대 강우량은 2014년 윗세오름에서 관측된 7331 mm 이며, 최소 강우량은 서귀포 기상대에서 2013년 관측된 1109.0 mm이다. 특히, 구축된 자료 16(2003. 01 ~ 2018. 12)개년 중 4개의 기상대 중 가장 낮은 강우량을 보인 기간은 2013년과 2017년으로 해당 기간은 무강우일수의 증가로 인한 가뭄 발생 시기로 분석되었다.

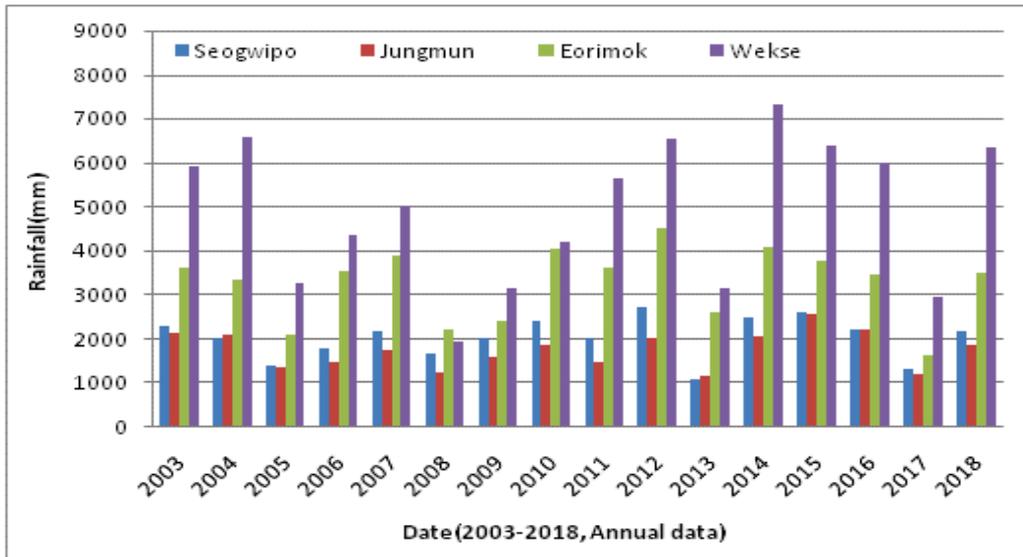


Fig. V-2. Annual rainfall data at location of meteorological observatory

Table V-2. Annual rainfall data at location of meteorological observatory

Year	Seogwipo	Jungmun	Eorimok	Wekse
2003	2309	2154	3636	5938
2004	2038	2106	3370	6575
2005	1413	1345	2101	3271
2006	1781	1480	3549	4380
2007	2195	1763	3899	5012
2008	1693	1247	2211	1958
2009	2035	1579	2406	3153
2010	2423	1877	4066	4202
2011	2036	1465	3616	5646
2012	2728	2019	4507	6559
2013	1109	1169	2616	3157
2014	2502	2064	4094	7331
2015	2620	2572	3791	6404
2016	2210	2229	3462	6006
2017	1334	1194	1646	2973
2018	2171	1887	3511	6370
2019	779	608	926	2021
Total	33,376	28,758	53,407	80,956
MAX	2728	2572	4507	7331
MIN	1109	1169	1646	1958
AVERAGE	1963.3	1691.6	3141.6	4762.1

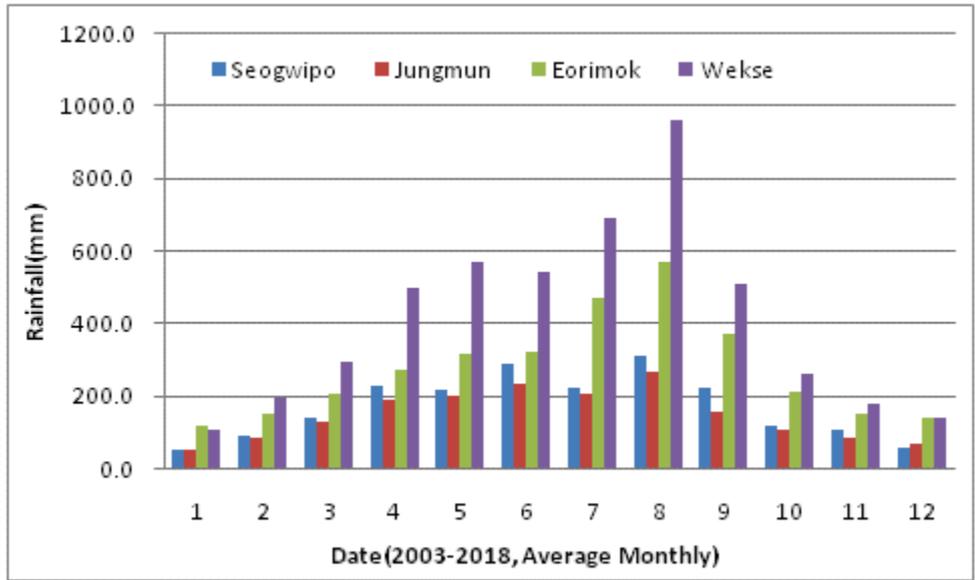


Fig. V-3. Monthly rainfall data at location of meteorological observatory

Table V-3. Monthly rainfall data at location of meteorological observatory

	Seogwipo	Jungmun	Eorimok	Wekse
1	51.5	52.3	114.4	106.6
2	87.9	82.8	149.9	191.8
3	139.9	124.5	206.8	292.3
4	225.3	190.3	271.1	496.2
5	215.8	197.2	315.1	567.2
6	289.1	232.9	319.5	539.4
7	221.0	205.7	468.6	693.3
8	311.4	263.3	571.8	961.5
9	220.1	157.4	368.8	510.2
10	115.3	107.3	209.2	258.7
11	107.4	81.7	147.4	177.5
12	52.7	64.3	137.4	138.9

나. 최고·최저 기온 분석

SWAT 모의 시 입력 자료로 사용되는 최고·최저 기온은 서귀포기상대를 제외한 나머지 3개의 AWS에서는 기록되지 않기 때문에 서귀포기상대의 단일 자료를 모의·분석의 인자로 사용하였다.

최고·최저기온에 대하여 분석한 결과 연구대상기간(2003.1.01~2018.12.31)까지 일 최고기온은 35.5℃로 나타났고 일 최저기온은 -3.9℃로 나타났으며, 입력자료는 Fig. V-4, 와 Table V-4. ~5. 과 같다.

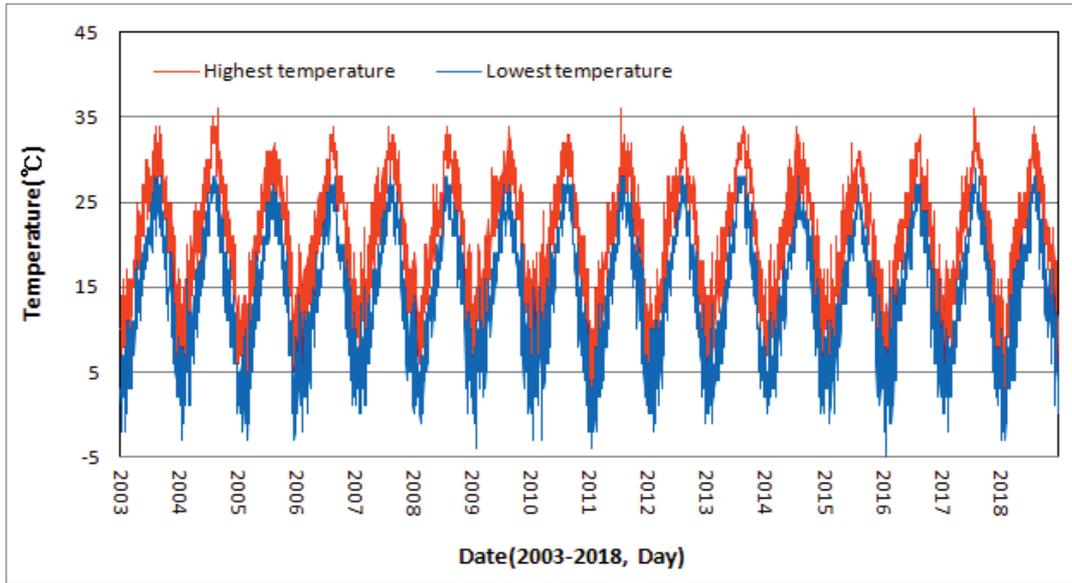


Fig. V-4. Temperature data of Seogwi meteorological post

Table V-4. Highest temperature data of Seogwi meteorological post

온도(최고)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2003	10.1	13.0	14.7	19.8	22.7	26.0	27.1	30.9	29.0	23.9	20.7	13.6
2004	11.4	13.6	15.9	20.1	22.5	27.0	30.4	32.4	28.2	23.7	18.7	14.7
2005	9.5	9.9	13.1	18.6	22.0	25.5	28.6	29.0	28.0	23.5	19.5	10.3
2006	12.0	11.4	15.0	18.8	21.5	24.7	27.9	31.7	26.9	25.5	19.3	13.8
2007	12.0	14.2	15.3	19.3	23.5	25.0	28.6	31.5	28.3	23.9	18.2	13.7
2008	11.2	9.9	15.0	18.6	22.3	23.2	30.3	30.7	27.9	24.7	18.0	13.7
2009	10.0	14.2	15.5	19.2	24.1	25.2	28.1	29.5	27.9	24.9	17.5	12.7
2010	11.2	12.4	14.4	16.8	22.0	25.1	28.8	30.9	28.8	23.1	18.2	12.6
2011	7.5	12.8	13.3	18.2	21.9	24.1	29.3	29.1	28.4	23.5	20.8	12.0
2012	10.1	9.8	14.1	18.9	23.7	25.5	28.7	30.7	26.6	23.7	16.6	11.5
2013	10.5	11.9	16.2	18.5	22.9	25.2	29.9	32.2	29.0	25.0	17.6	12.6
2014	12.1	12.2	15.4	19.7	23.6	24.8	28.2	28.0	27.5	23.9	19.0	11.5
2015	12.1	12	14.9	18.5	22.9	24.1	26.9	29.1	26.0	22.8	18.2	13.2
2016	9.3	10.9	14.7	19.5	22.2	24.3	28.2	30.7	26.4	23.3	18.0	14.0
2017	11.1	11.8	13.9	19.2	23.0	25.3	30.1	31.5	27.5	22.9	17.4	10.9
2018	9.2	9.7	15.5	19.6	21.9	25.0	29.4	30.4	26.5	21.6	18.3	12.7
Average	10.6	11.9	14.8	19.0	22.7	25.0	28.8	30.5	27.7	23.7	18.5	12.7

Table V-5. Lowest temperature data of Seogwi meteorological post

Year	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2003	2.6	6.1	7.7	12.9	16.7	19.9	23.0	25.2	22.8	16.0	14.2	6.4
2004	3.8	6.3	8.2	12.3	16.6	20.7	25.1	26.3	22.2	15.9	11.0	7.5
2005	3.0	3.5	5.1	11.6	14.6	19.8	23.5	24.1	22.7	16.8	11.7	3.2
2006	5.4	4.6	7.1	11.6	15.1	19.3	23.6	26.1	20.7	17.7	12.2	6.7
2007	5.0	6.4	8.1	11.0	16.1	19.5	23.1	25.7	22.8	17.2	10.1	7.4
2008	5.2	2.5	7.6	12.0	15.3	18.9	25.1	24.4	22.4	17.5	10.7	6.3
2009	3.7	8.0	8.0	11.5	16.5	19.7	23.5	24.5	21.9	17.3	11.0	5.9
2010	4.3	6.2	7.2	10.3	15.5	19.8	24.1	26.2	23.1	16.5	9.8	5.4
2011	0.9	5.7	5.9	10.6	16.3	19.9	24.8	24.7	22.3	16.9	14.4	5.3
2012	4.1	3.7	7.7	12.1	16.9	20.3	24.2	25.8	20.3	16.4	10.0	4.9
2013	3.7	5.1	8.0	10.6	16.1	20.1	25.8	26.7	22.4	18.1	10.4	5.6
2014	4.7	5.9	8.7	12.7	16.2	19.5	23.3	23.6	21.7	17.0	11.8	4.3
2015	5.2	4.9	7.6	12.2	16.1	19.2	22.4	23.9	20.2	15.4	12.7	7.1
2016	3.5	4.3	7.7	12.9	15.9	19.6	24.0	25.2	21.5	18.2	11.6	7.3
2017	4.5	3.9	6.9	12.8	16.2	19.5	25.7	25.8	21.8	17.1	10.3	4.4
2018	2.8	3.0	8.2	12.7	16.3	19.5	24.7	25.9	20.9	14.6	11.3	7.0
Average	3.9	5.0	7.5	11.9	16.0	19.7	24.1	25.3	21.9	16.8	11.5	5.9

다. 평균 풍속

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. V-5., Table V-6.).

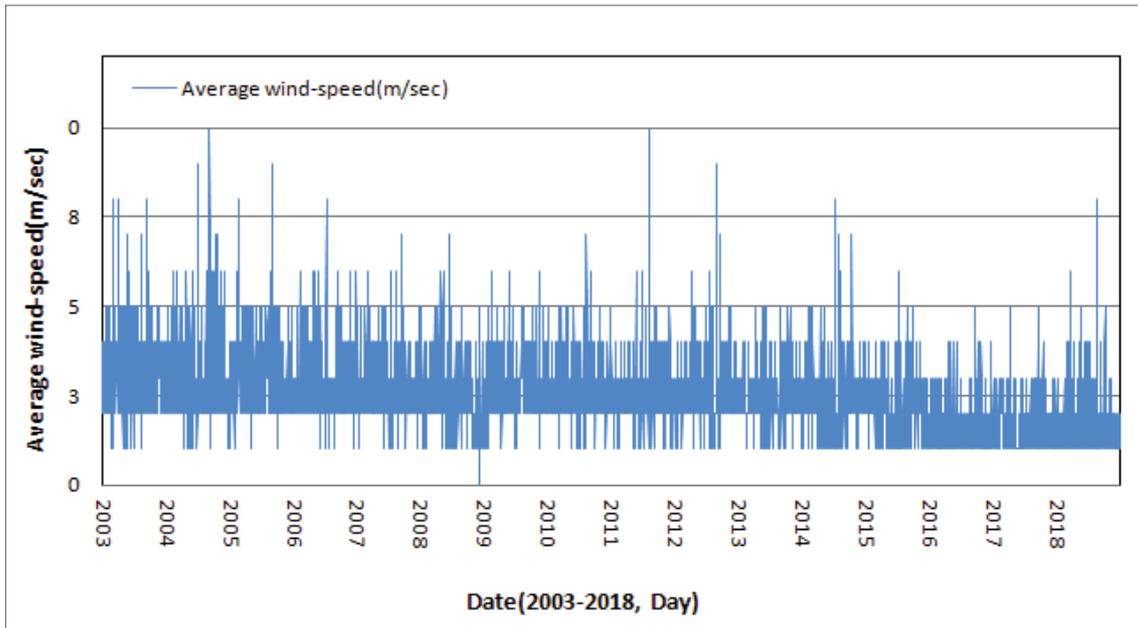


Fig. V-5. Average wind speed data of Seogwi meteorological post

Table V-6. Average wind speed data of Seogwi meteorological post

Year	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2003	3.4	3.0	3.5	3.4	3.5	2.9	3.5	2.9	3.3	3.2	3.2	3.2
2004	2.9	3.3	3.2	2.9	2.6	2.6	3.0	3.3	3.9	3.7	2.9	2.5
2005	2.6	3.2	3.2	3.1	2.9	3.0	3.1	3.1	3.9	3.0	2.4	2.9
2006	2.6	3.0	3.2	2.9	3.3	2.5	2.6	2.4	3.5	2.5	3.2	2.6
2007	2.6	2.9	3.1	2.6	2.8	2.9	2.5	2.9	3.1	2.4	2.4	3.1
2008	2.3	2.7	3.1	2.8	2.5	2.9	1.9	2.8	2.5	2.1	1.9	1.8
2009	2.7	2.7	2.7	2.7	2.6	2.5	2.7	3.1	2.7	2.8	2.6	2.6
2010	2.9	2.4	3.3	3.0	2.7	2.5	2.3	2.7	2.8	2.9	2.3	2.9
2011	2.4	2.3	2.5	2.7	2.7	2.4	2.4	3.0	2.6	2.5	2.5	2.2
2012	2.2	2.6	2.7	3.1	2.5	2.8	2.2	3.2	2.6	2.5	2.6	2.5
2013	2.4	2.3	2.4	2.7	2.3	2.4	2.5	2.3	2.6	2.9	2.5	2.4
2014	2.2	2.9	2.4	2.4	2.2	2.1	2.2	2.9	2.7	3.0	2.2	2.4
2015	2.4	2.2	2.1	2.3	1.8	1.8	2.3	2.0	2.7	2.1	1.9	1.7
2016	1.6	2.0	1.8	1.8	1.5	1.6	1.6	1.8	1.8	2.1	1.5	1.7
2017	1.8	2.0	1.8	1.8	1.5	1.5	1.8	1.8	2.1	2.4	1.5	1.6
2018	1.6	1.8	2.1	1.7	2.1	1.7	1.8	2.3	2.0	1.9	1.7	1.5
Average	2.4	2.5	2.6	2.6	2.4	2.3	2.4	2.6	2.8	2.6	2.3	2.3

라. 상대 습도

서귀포 관측소의 연구대상기간동안의 상대습도자료를 분석한 결과 최대 상대습도는 96.90%로 나타났으며, 상대습도 역시 계절에 따른 경향성을 보이고 있는 것으로 분석되었다(Fig. V-6., Table V-7.).

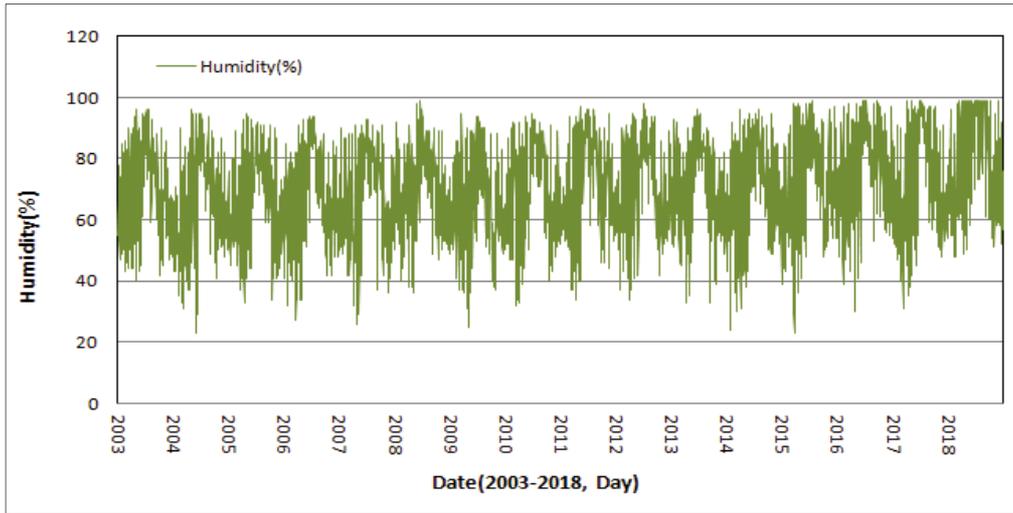


Fig. V-6. Relative humidity data of Seogwi meteorological post

Table V-7. Relative humidity data of Seogwi meteorological post

Year	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2003	61.3	63.5	61.3	67.5	72.5	76.0	87.9	78.8	71.5	57.9	68.6	56.6
2004	56.3	53.0	53.7	60.1	74.2	70.7	82.2	74.5	74.7	58.0	63.6	60.2
2005	57.2	62.6	57.7	62.2	64.5	76.3	81.2	78.4	74.0	60.8	57.9	59.5
2006	60.1	59.9	56.2	62.6	74.8	80.5	88.2	75.7	67.9	59.5	60.3	60.9
2007	60.7	62.4	61.5	52.1	61.9	81.0	81.7	78.6	74.9	64.4	53.4	61.2
2008	68.8	56.7	64.1	67.0	69.9	83.8	83.5	77.2	74.9	64.3	63.3	61.1
2009	63.2	67.6	59.6	58.2	60.1	77.7	82.9	76.3	68.7	53.0	65.2	60.4
2010	62.3	67.1	65.3	62.1	69.4	77.7	85.3	82.6	75.7	61.4	58.4	63.1
2011	61.6	66.5	54.1	62.9	76.3	89.1	84.6	84.7	67.9	63.8	72.8	65.2
2012	60.6	65.7	66.0	68.7	69.0	80.4	87.4	82.1	73.5	60.3	61.4	67.1
2013	63.9	68.0	63.9	62.1	72.6	85.3	85.4	77.9	68.3	65.6	63.7	60.2
2014	60.5	69.8	64.0	63.6	66.1	82.5	85.4	83.8	73.6	68.1	66.8	63.7
2015	62.8	63.7	61.5	75.3	69.6	84.8	89.2	81.0	73.6	62.2	76.6	68.8
2016	65.5	62.5	67.1	75.7	75.4	87.9	91.8	77.1	83.2	80.7	72.4	68.2
2017	66.8	59.4	58.7	71.2	73.8	80.3	95.0	83.7	75.8	76.1	65.6	61.2
2018	69.4	64.3	78.9	77.2	84.2	88.5	93.3	91.7	85.2	68.7	71.4	72.1
Average	62.6	63.3	62.1	65.5	70.9	81.4	86.6	80.3	74.0	64.0	65.1	63.1

1.2 수치지형자료 구축

1.2.1 DEM

SWAT 모형의 DEM(Digital Elevation Model)은 지형의 고도 값을 수치로 표현한 GIS 공간 자료로 수치표고 모델은 경사, 방향, 토지이용, 토지피복 등의 속성자료를 포함 하며, 이 자료는 기하학적 왜곡 보정 등 여러 목적으로 사용된다.

본 연구유역에 관한 DEM(Digital Elevation Model) 자료는 수치지도에서 등고선을 먼저 추출한 후 30m×30m 해상도의 DEM을 다시 ArcInfo를 활용하여 가공 되었으며, 1초에 30m 간격의 격자 단위로 구축된다. DEM 분석결과 제주도는 0~1945m 표고를 가지고 있으며, 평균표고는 283.69m, 유역의 평균 경사는 9.04%로 확인되었다(Fig. V-7.).

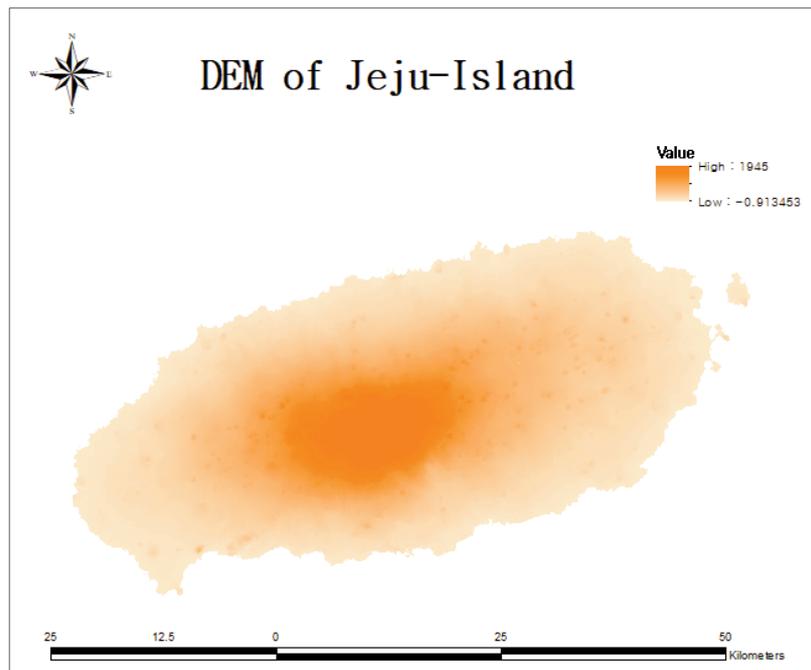


Fig. V-7. DEM of stream to be studied

1.2.2 토지피복도(Landuse map)

토지피복도는 인공위성이 촬영한 영상을 이용하여 지표면의 상태를 표현한 지도를 말하며, 숲, 초지, 콘크리트 포장과 같은 지표상의 물리적 상황을 분류한 것이다.

토지피복도는 특성에 따라 7개의 대분류 항목으로 구분되고, 22개의 중분류, 41개의

항목으로 구분되며, 각 항목별로 색상체계와 분류코드가 지정되어 있다(Table V-8).

Table V-8. Code on entries of landuse map

대분류		중분류		세분류			
7개 항목	분류코드	22개 항목	분류코드	41개 항목	분류코드		
시가화 건조지역	100	주거지역	110	단독주거지역	111		
				공동주거지역	112		
		공업지역	120	공업	121		
		상업지역	130	상업업무지역	131		
		위락시설지역	140	혼합지역	132		
		교통지역	150			위락시설지역	141
						공항	151
						항만	152
						철도	153
						도로	154
		공공시설지역	160			기타 교통, 통신시설	155
						환경기초시설	161
						교육, 행정시설	162
기타 공공시설	163						
농업지역	200	논	210	경지정리가 된 논	211		
		밭	220	경지정리가 안된 논	212		
		하우스재배지	230	경지정리가 된 밭	221		
		과수원	240	경지정리가 안된 밭	222		
		기타재배지	250			하우스재배지	231
						과수원	241
산림지역	300	활엽수림	310	목장	251		
		침엽수림	320	기타재배지	252		
		혼효림	330	활엽수림	311		
초지	400	자연초지	410	침엽수림	312		
		인공초지	420	혼효림	331		
				자연초지	411		
			골프장	421			
습지	500	내륙습지	510	묘지	422		
		연안습지	520	기타 초지	423		
나지	600	자연나지	610	내륙습지	511		
				갯벌	521		
				염전	522		
		인공나지	620			해변	611
						강기슭	612
				암벽/바위	613		
수역	700	내륙수	710	채광지역	621		
				운동장	622		
				기타나지	623		
		해양수	720			하천	711
						호소	712
						해양수	721

본 연구에서 사용된 토지이용도는 2007년도에 SPOT 5 위성영상을 활용하여 갱신된 전국 단위의 중분류 토지피복도로써 2008년에 제공된 1:25000 토지피복 자료를 이용하여 분석을 실시하였다.

악근천 유역의 토지피복상태는 산림지 65.26%, 농업지역 29.06%로 유역의 대부분을 차지하고 있으며, 주거지 3.21% 기타 0.17% 순으로 차지하고 있는 것으로 분석되었다(Fig. V-8., Table V-9.).

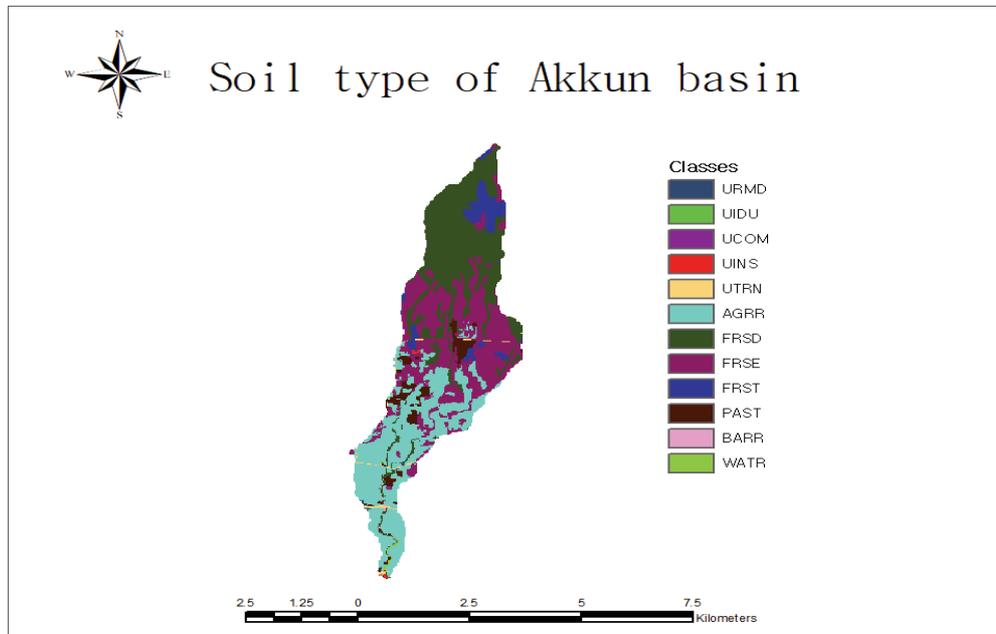


Fig. V-8. Soil map of Akguen stream to be studied

Table V-9. Soil map of Akguen stream to be studied

대분류	중분류	세부항목	면적(km ²)	비율(%)
시가화 건조	URMD	주거지역	0.03	0.16
	UIDU	공업지역	0.00	0.02
	UCOM	상업지역	0.01	0.06
	UINS	공공시설지역	0.03	0.14
	UTRN	교통지역	0.12	0.64
농업	AGRR	밭	5.41	29.06
산림	FRSD	활엽수림	5.66	30.38
	FRSE	침엽수림	5.56	29.84
	FRST	혼효림	0.94	5.04
초지	PAST	자연초지	0.81	4.37
수역	BARR		0.02	0.10
	WATR	내륙수	0.04	0.19

1.2.3 토양도(Soil Type map)

토양도(Soil Type Map) 자료는 농업과학기술원에서 제공하는 농업토양정보시스템(ASIS) 제공하는 1:25000 정밀 토양도를 토양통별로 구분하여 입력자료로 구축하였다.

악근천 유역의 토양통은 흑악통 44.14%를 비롯하여 제주통, 오라통, 동귀통, 그외의 순서로 분포된 것으로 분석되었다(Fig. V-9., Fig. Table V-10.).

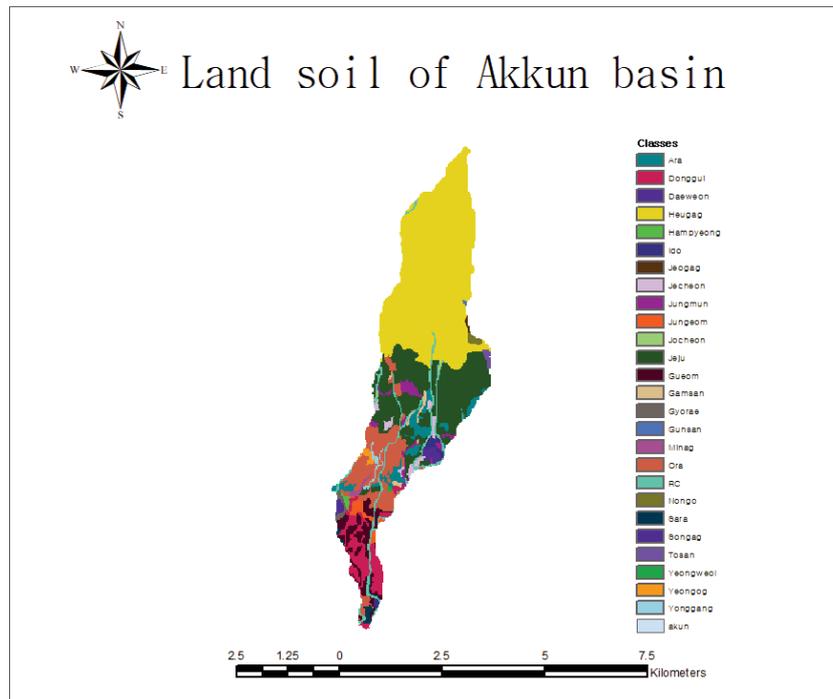


Fig. V-9. Soil map of Akguen stream to be studied

Table V-10. Rate and dimension by soil series at the basis of Akguen river

Land soil	Area	Percent(%)
Ara	0.655	3.516
Donggui	0.950	5.100
Daeweon	0.130	0.696
Heugag	8.224	44.146
Hampyeong	0.042	0.227
Ido	0.122	0.657
Jeogag	0.215	0.130
Jecheon	0.215	1.154
Jungmun	0.318	1.705
Jungeom	0.172	0.923
Jocheon	0.010	0.053
Jeju	3.845	20.639
Gueom	0.692	3.714
Gamsan	0.105	0.565
Gyora	0.069	0.372
Gunsan	0.011	0.058
Minag	0.058	0.314
Ora	1.749	9.389
RC	0.785	4.212
Nongo	0.064	0.343
Sara	0.111	0.594
Songag	0.057	0.304
Tosan	0.058	0.309
Yeongweol	0.013	0.072
Yeongog	0.068	0.367
Yonggang	0.082	0.440

1.3 SWAT 모형의 적용

1.3.1 매개변수 추정

매개변수 민감도 분석은 모형에서 수행된 출력 값의 변화가 각 매개변수의 허용 가능치 내의 수치를 수정하여 모형화된 시스템을 가장 잘 구현하기 위한 방법으로 모형 매개변수를 적절하게 조정하여 모의 결과와의 관련성을 분석에 의의가 있다. 모형 모의 시 민감도 분석을 실시하는 가장 기본적인 목적은 모의 결과에 민감한

매개변수를 식별하는 것으로 모의 정확도 및 효율성을 높이는데 매우 중요한 역할을 한다(김대곤 등, 2012).

SWAT 모의시 결과에 영향을 미치는 인자는 7(Crop.dat, Basin input, Chemical, Ground water, HRU General, Soil, Main channel, Management)개의 대분류로 분류되며, 세분 인자는 총 28가지이며 Table V-11. 과 같다.

Table V-11. 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	SCS 유출곡선지수(AMC-II조건)	35	98

본 연구에서는 과거 제주도 하천을 대상으로 실시된 연구(정, 2008, 강, 2012)를 토대로 매개변수 보정 대상이 아닌 물리학적 매개변수를 제외하였으며, 유출과 관

련한 수문학적 매개변수에 대하여 민감도 분석을 실시하였으며, 대상 매개변수는 지하수 부분 매개변수 4개(GW_REVAP, REVAPMIN, GWQMN, ALPHA_BF)를 비롯하여 지표수 매개변수 CN_2, 증발산량 매개변수 ESCO, CH_K2, 토양수분 매개변수 SOL_AWC 를 추가 선정하여 연구를 진행하였다(Table V-12.).

Table V-12. Value for analyzing the sensitiveness of hydrological parameters related to runoff

Parameters	Lowest limit		-100%	-50%	0	50%	Upper value
ALPHA_BF	0	1	0	0.25	0.5	0.75	1
GWQMN	0	5000	0	1250	2500	3750	5000
GW_REVAP	0.02	0.2	0.02	0.065	0.11	0.155	0.2
REVAPMIN	0	1000	0	250	500	750	1000
ESCO	0	1	0	0.25	0.5	0.75	1
SOL_AWC	0	1	0	0.25	0.5	0.75	1
SOL_K	0	2000	0	500	1000	1500	2000
CN_2	35	98	35	50.75	66.5	82.25	98

1.3.2 매개변수 민감도 분석

SWAT 모의를 위한 민감도 분석결과는 Table V-2에 제시되어져 있는 수문학적 매개변수 8개를 기준값에서 각각 $\pm 25\%$, $\pm 50\%$ 의 value 값을 변화시키면서 민감도 분석을 실시하였다.

SWAT 모형 영향인자 8개에 대하여 약근천 유역에 적용하여 매개변수 민감도를 검토한 결과 총 유출량에 영향을 준 인자는 SOL_K(15.8~-0.1%), 지표유출에서는 SOL_K(131.3~0.6%), 기저유출에서는 SOL_AWC(-299.54~-37.89%) 매개변수 인자가 가장 큰 변동성을 보였다. 그 외 GWQMN 인자와 ESCO 인자는 총유출과 기저유출의 경우, GW_REVAP는 총유출, CN_2 인자는 총유출, 지표유출, 기저유출 전반에 걸쳐 민감한 영향을 받는 것으로 분석되었다(Table V-13.~15.).

Table V-13. Rate of change of Water yield according to the rate of parameter at Akguen stream except for a river

Parameters	Range		100%	50%	0	50%	100%
	ALPHA_BF	0	1	10.94	0.00	0.00	0.00
GWQMN	0	5000	-3.84	-2.56	0.00	2.11	3.74
GW_REVA P	0.02	0.2	-3.40	-1.65	0.00	1.39	2.53
REVAPMN	0	1000	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.05
ESCO	0	1	-8.58	1.27	0.00	-2.98	-10.65
SOL_AWC	0	1	-15.41	-1.67	0.00	-1.44	-1.44
SOL_K	0	2000	15.80	0.30	0.00	-0.08	-0.13
CN_2	35	98	1.47	0.88	0.00	-1.52	-7.89

Table V-14. Rate of change of SURQ according to the rate of parameter at Akguen stream except for a river

Parameters	Range		100%	50%	0	50%	100%
	ALPHA_B F	0	1	0.00	0.00	0.00	0.00
GWQMN	0	5000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
GW_REV AP	0.02	0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
REVAPM N	0	1000	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.50
ESCO	0	1	-9.78	1.92	0.00	-4.29	-11.09
SOL_AWC	0	1	-5.87	-16.44	0.00	-11.91	-11.91
SOL_K	0	2000	-131.30	-1.61	0.00	0.43	0.64
CN_2	35	98	13.85	7.09	0.00	-7.96	-20.09

Table V-15. Rate of change of GWQ according to the rate of parameter at Akguen stream except for a river

Parameters	Range		100%	50%	0	50%	100%
	ALPHA_B F	0	1	100.00	-0.02	0.00	-0.02
GWQMN	0	5000	-46.91	-31.23	0.00	25.74	45.60
GW_REV AP	0.02	0.2	-42.90	-20.83	0.00	17.58	31.89
REVAPM N	0	1000	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.50
ESCO	0	1	-43.02	3.21	0.00	-11.94	-56.06
SOL_AWC	0	1	-299.54	-37.89	0.00	0.00	0.00
SOL_K	0	2000	99.99	-93.40	0.00	26.32	41.32
CN_2	35	98	-108.40	-54.16	0.00	55.63	99.96

1.4 실측유량을 이용한 SWAT 모의

1.4.1 SWAT 모형의 모의 결과 보정

1) 모의 보정을 위한 유출량 관측자료

SWAT 모의 시 모의값의 보정을 위해서는 장기간 관측된 실측자료가 필요하다. 하지만 제주도의 경우 물수지에 관한 기초자료가 부족하고, 이미 구축되어진 자료들은 자료 미 갱신 등에 의한 신뢰성 확보에 무리가 따른다. 따라서 본 연구에서는 제주대학교 수자원연구단에서 관측된 장기(2012. ~ 2014., 2017. ~ 2018.) 관측 유량값을 적용하여 보정을 실시하였다.

대상 연구유역의 유출량 자료는 2011년 7월부터 2019년 6월 까지 최신 계측기기인 ADC를 이용하여 매월 2회 현장에서 관측된 실측자료이며, 관측 자료 중 자료의 신뢰성 확보 차원에서 관측일과 관측전일에 10mm 이상의 강우 발생 시에는 해당 관측자료는 사용하지 않았으며, 실제 적용된 관측 유량은 다음과 같다(Table V-16.).

Table V-16. Comparison of stream baseflow discharge measurement method

Date	Discharge(m^3/s)	Date	Discharge(m^3/s)
2011-07-08	1.2787	2013-04-26	0.302
2011-07-22	0.6863	2013-05-31	0.1986
2011-08-02	1.242	2013-06-16	0.5658
2011-08-18	1.2098	2013-06-29	0.4994
2011-09-02	0.7661	2013-07-12	0.1652
2011-09-16	0.6763	2013-07-26	0.367
2011-09-30	0.7175	2013-08-09	0.1264
2011-10-28	0.5374	2013-08-23	0.1374
2011-11-25	0.5722	2013-10-12	0.1271
2011-12-09	0.362	2013-11-01	0.1046
2011-12-23	0.3505	2013-12-06	0.4775
2012-01-06	0.3505	2014-01-03	0.0999
⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮
2012-10-26	1.0217	2018-07-25	0.99414
2012-11-09	1.2743	2018-08-05	0.97364
2012-11-19	0.8637	2018-08-21	0.84362
2012-12-22	0.3545	2018-09-05	0.92693
2013-01-18	0.4618	2018-09-19	0.9008
2013-02-15	0.523	2018-10-17	1.27125
2013-03-03	0.2771	2018-10-31	1.02469
2013-03-15	0.3308	2018-11-14	1.2941
2013-03-29	0.529	2018-11-29	1.21287
2013-04-12	0.1904		
Maximum			1.795
Minimum			0.063

2) 매개변수 최적화

본 연구에서는 SWAT 모의 시 적용되는 매개변수에 대한 민감도 분석을 바탕으로 CN_2, ESCO, SOL_AWC 인자를 이용하여 SWAT 모의 값 보정을 실시하였다. 유역 전반의 모든 유출에 영향을 미치는 CN_2 인자를 선 적용하였으며, 총 유출과 기저유출에 민감한 ESCO, 기저유출에 민감한 SOL_AWC 인자 순으로 적용하였다.

약근천 유역은 SWAT 모의시 CN_2를 -1 하향 고정 후 ESCO +0.03, SOL_AWC +0.01 상향하여 모의결과 값을 보정하였다(Table V-17.).

Table V-17. Calibrated parameters of Akguen stream

입력파일	매개변수	정의	범위		보정값
			하한값	상한값	
*.mgt	CN_2	SCS 유출곡선지수(AMC-II 조건)	35	98	-9
*.hru	ESCO	토양증발 보상계수	0	1	+0.03
*.sol	SOL_AWC	토양층 유효수분량	0	1	+0.01

3) SWAT 모의 결과 보정

매개변수를 통한 SWAT 모의 결과 값 보정 결과 약근천 유역의 결정계수 R^2 은 0.65 이며, 평균제곱근오차 RMSE는 1.06으로 나타났다(Fig. V-10.). 매개변수 보정을 통한 모의 적용 시 실측치에 가까운 모의가 가능했으며, 15년간(2004~2018년)의 지표 유출율은 6.9~31.4%(평균 21.2%), 기저유출은 17.3~23.2%(평균 20.0%)로 분석되었다(Fig. V-11.~12.). 특히, 최근 여름 가뭄이 심했던 2013년과 2017년은 예년보다 적은 강우의 영향으로 여름(6~8월)의 지표유출율은 15년 평균 유출율에 비해 85.9 (%), 48.7(%) 감소한 것으로 나타났으며, 기저유출율은 56.4 (%), 64.9 (%) 감소한 것으로 분석되었다.

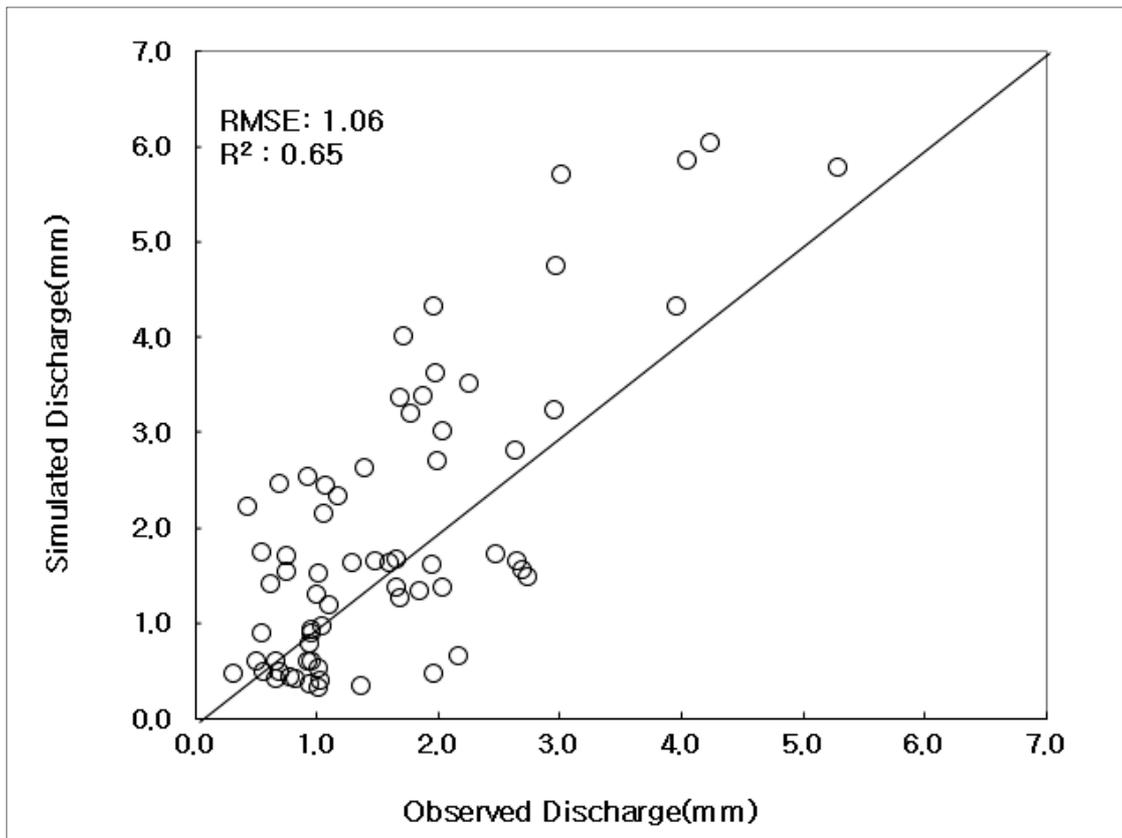


Fig. V-10. Result of calibration of Akkun stream

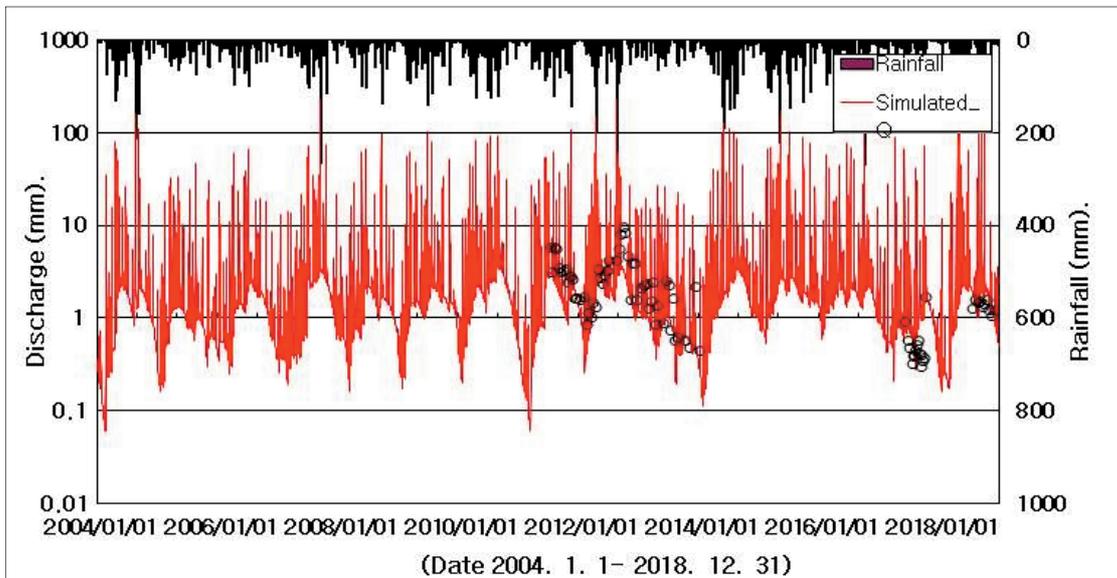


Fig. V-11. Result of runoff simulation of the basin of Akguen Akkun stream

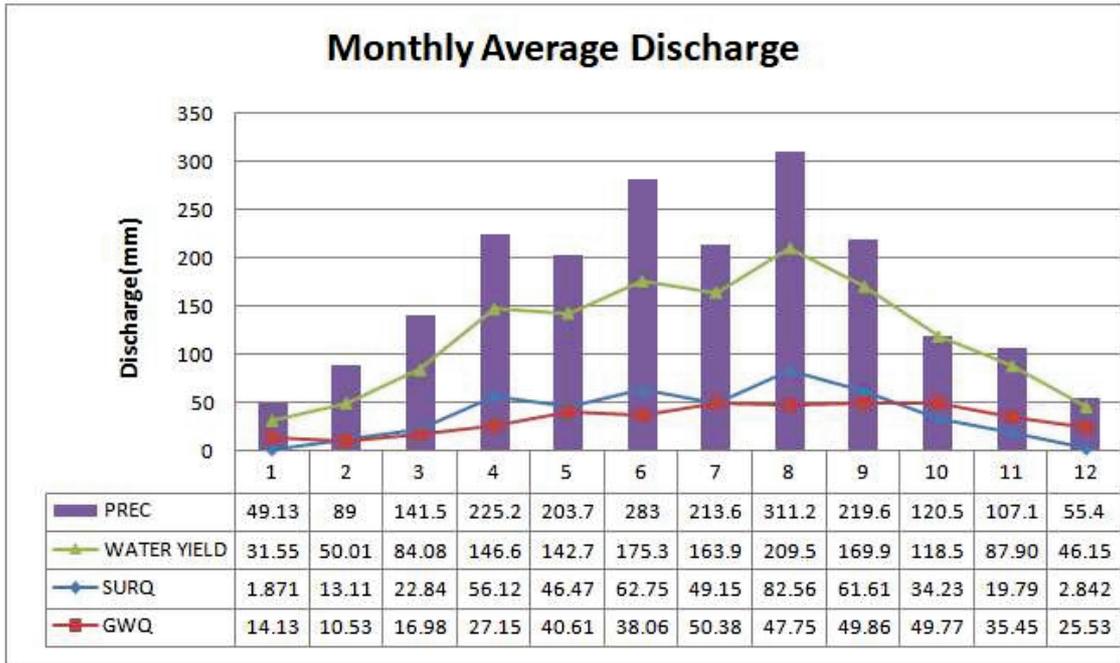


Fig. V-12. Monthly average discharge of Akkun stream(2004-2018)

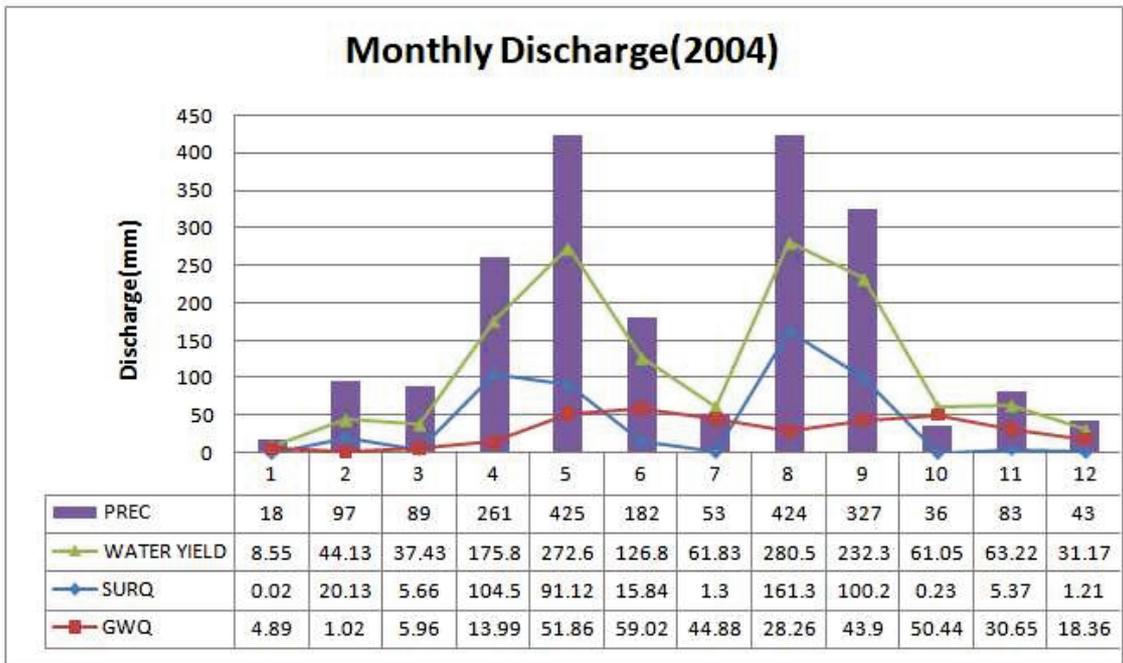


Fig. V-13. Monthly discharge of Akkun stream(2004)

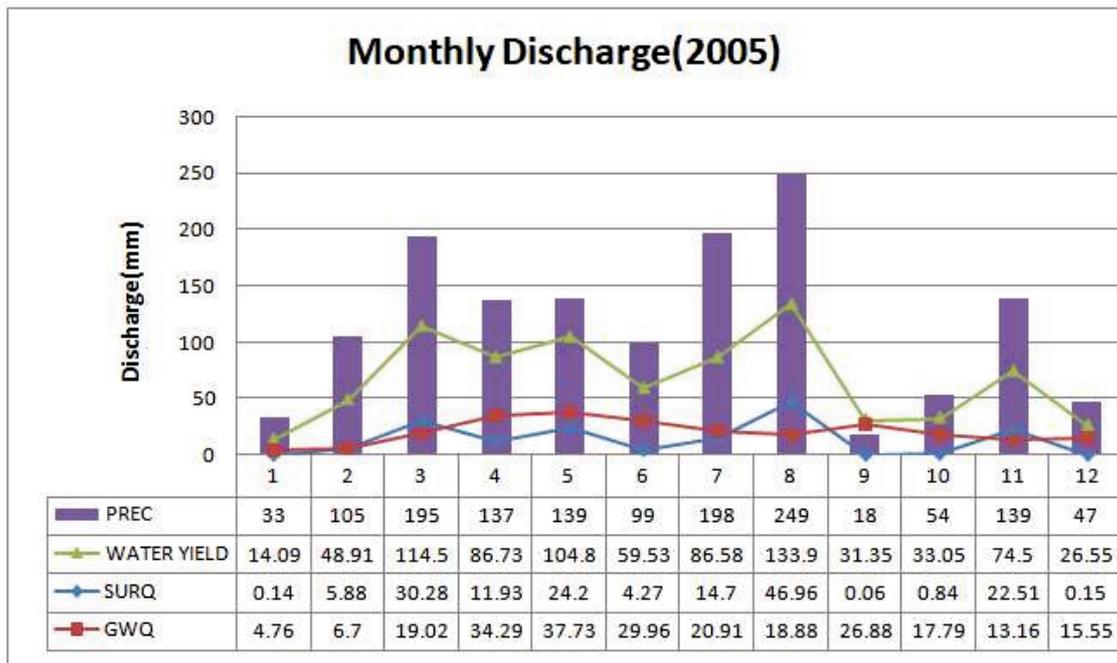


Fig. V-14. Monthly discharge of Akkun stream(2005)

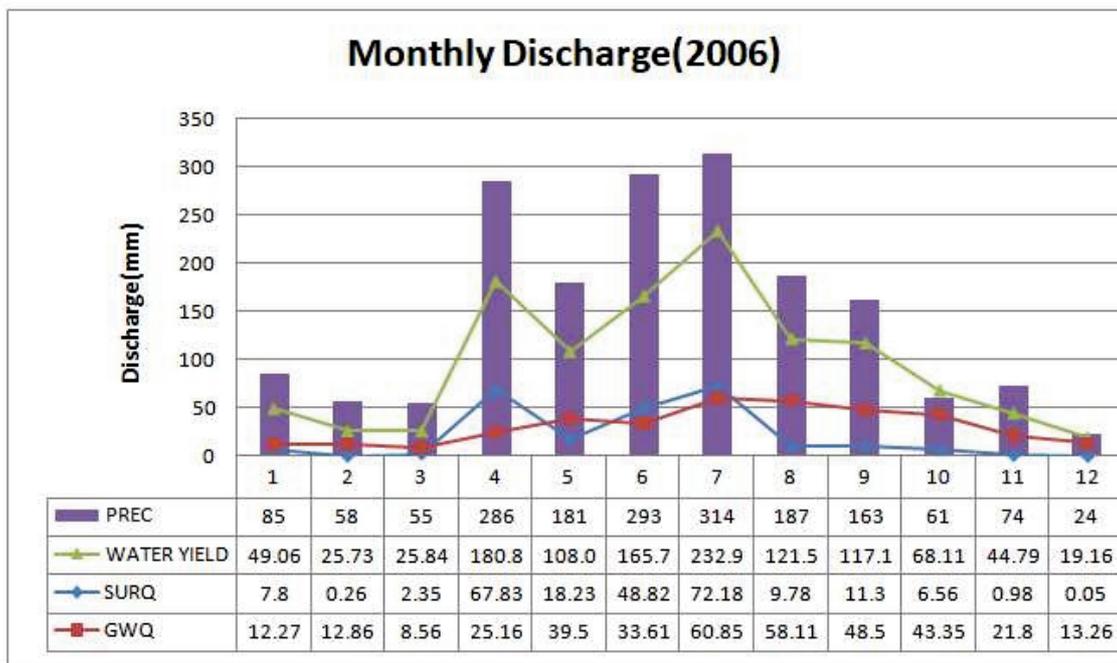


Fig. V-15. Monthly discharge of Akkun stream(2006)

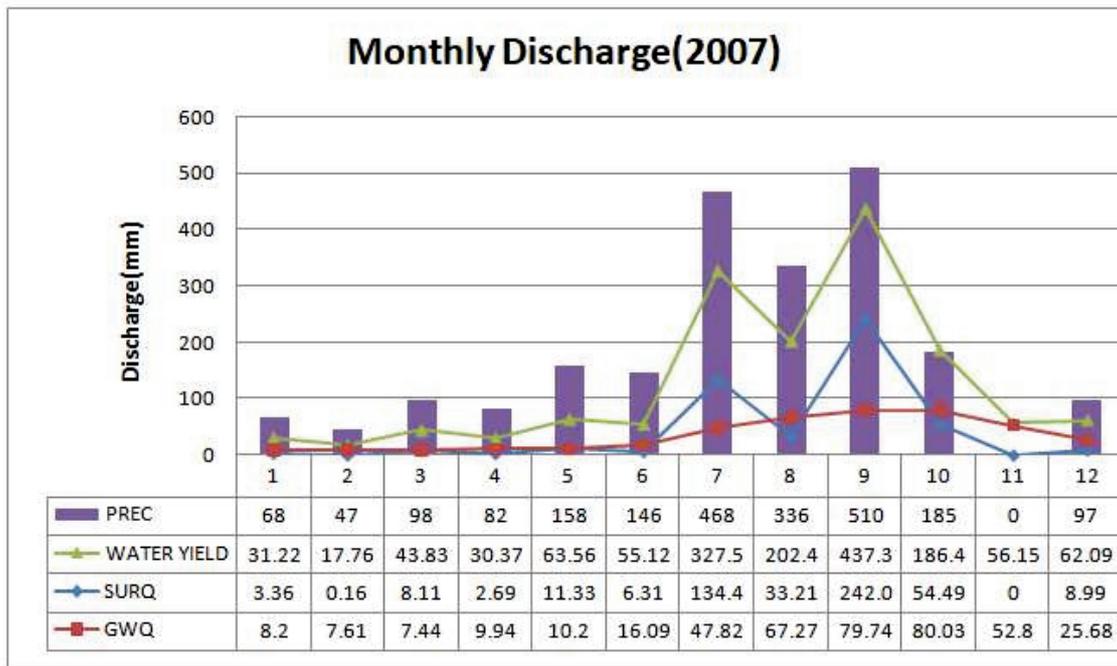


Fig. V-16. Monthly discharge of Akkun stream(2007)

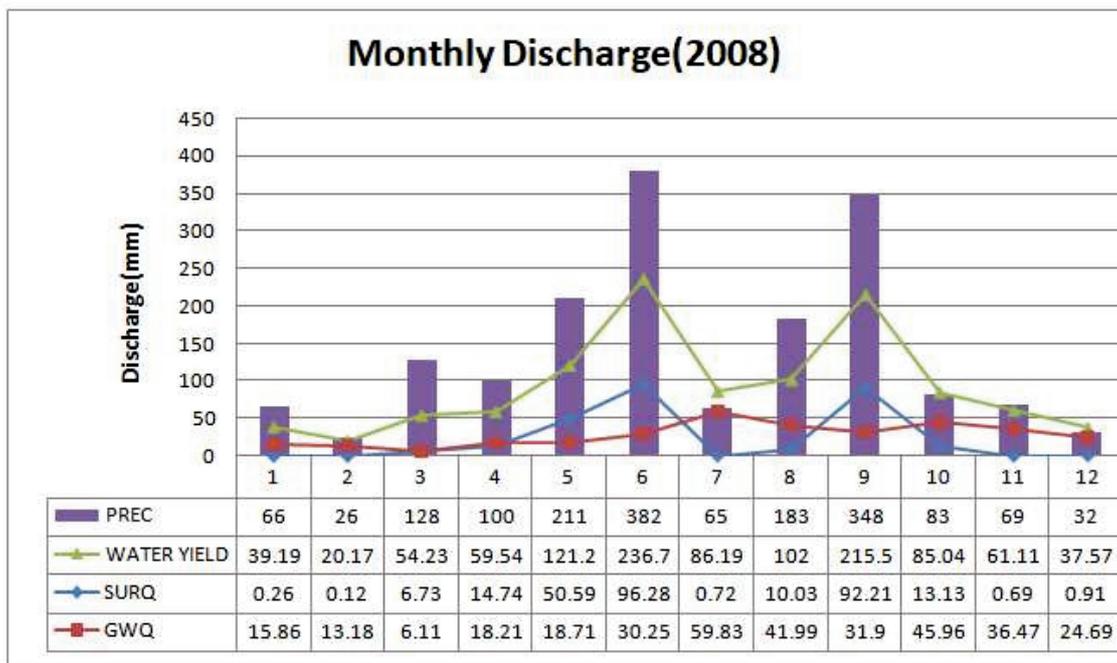


Fig. V-17. Monthly discharge of Akkun stream(2008)

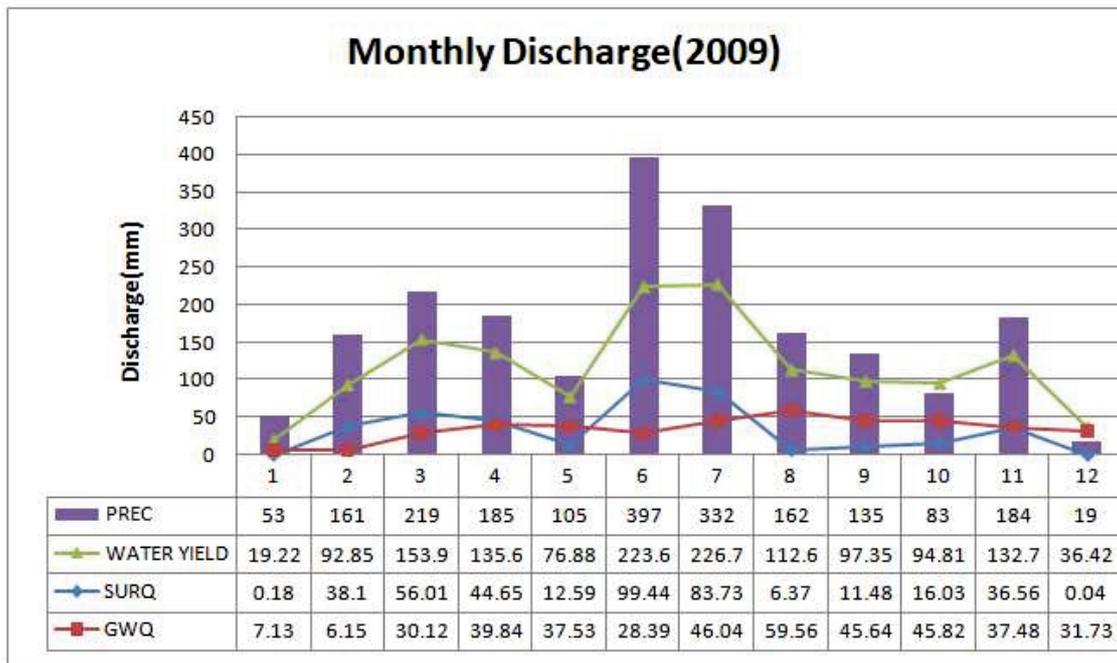


Fig. V-18. Monthly discharge of Akkun stream(2009)

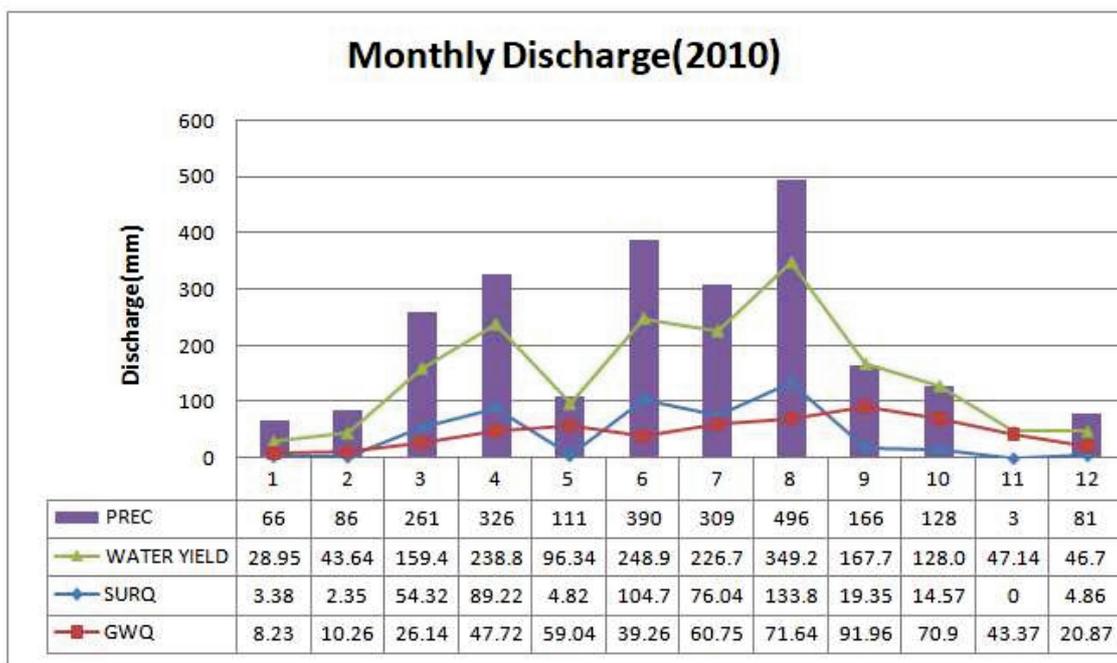


Fig. V-19. Monthly discharge of Akkun stream(2010)

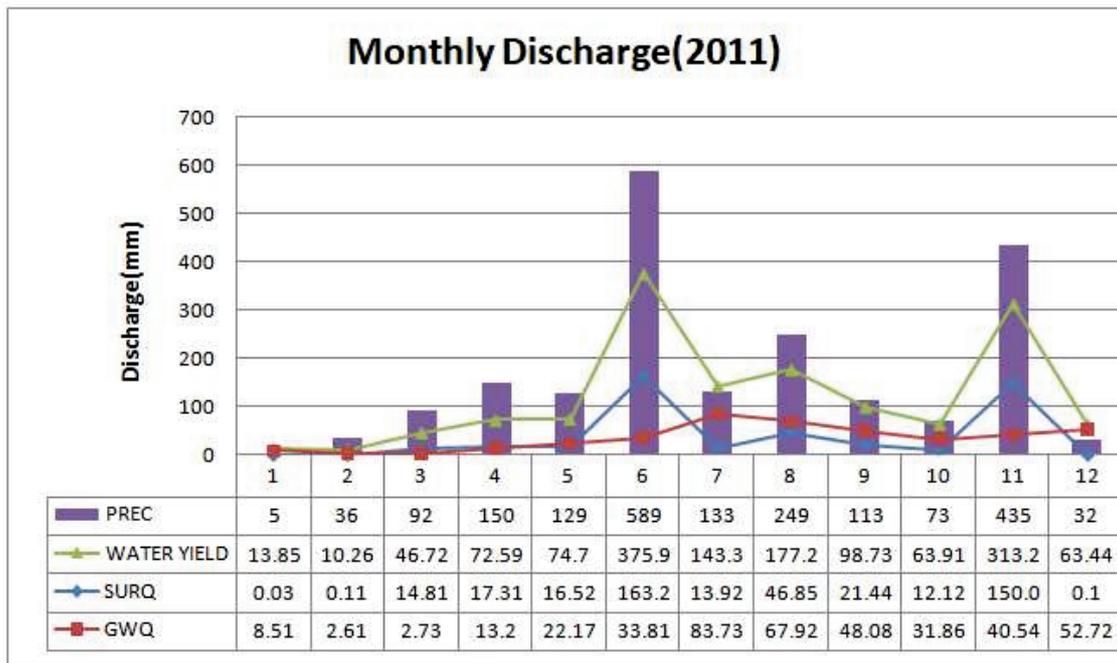


Fig. V-20. Monthly discharge of Akkun stream(2011)

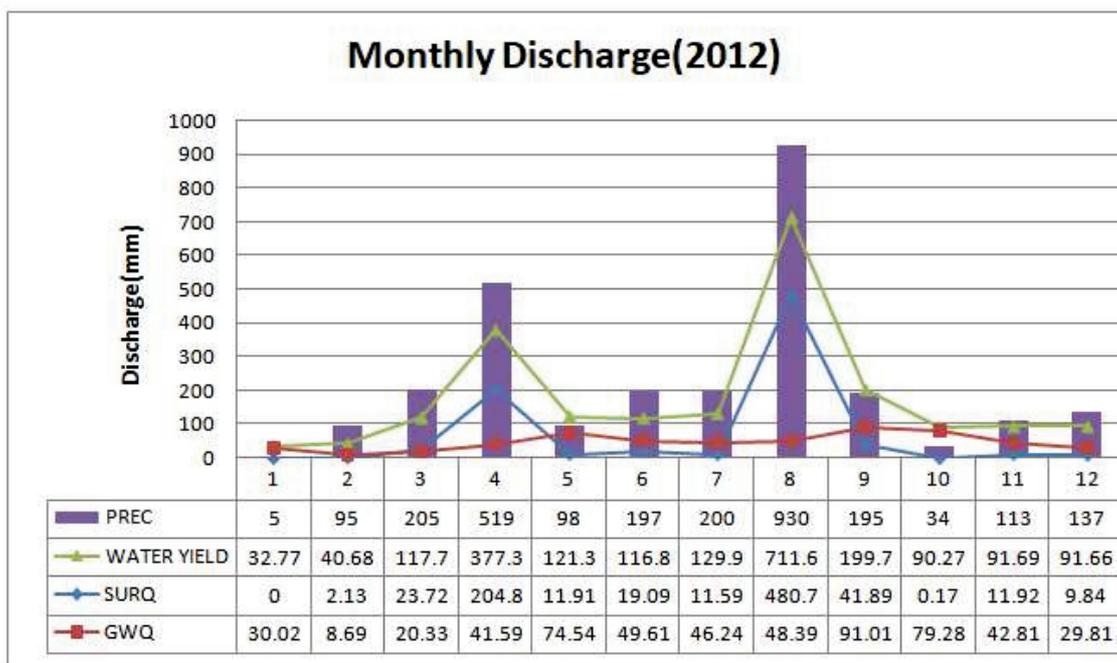


Fig. V-21. Monthly discharge of Akkun stream(2012)

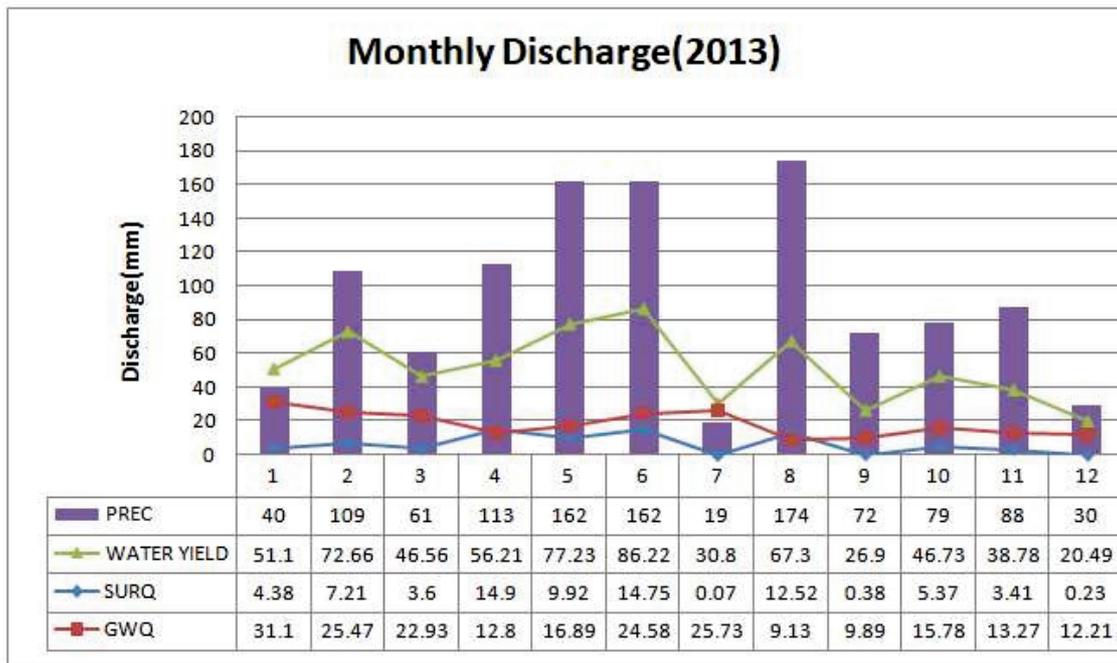


Fig. V-22. Monthly discharge of Akkun stream(2013)

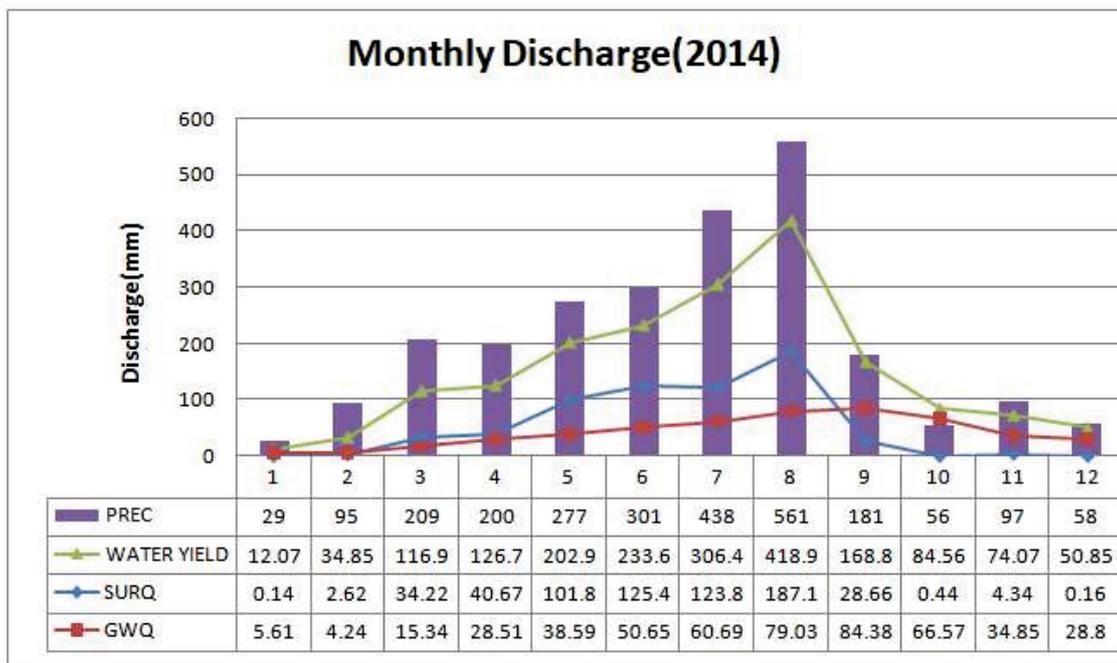


Fig. V-23. Monthly discharge of Akkun stream(2014)

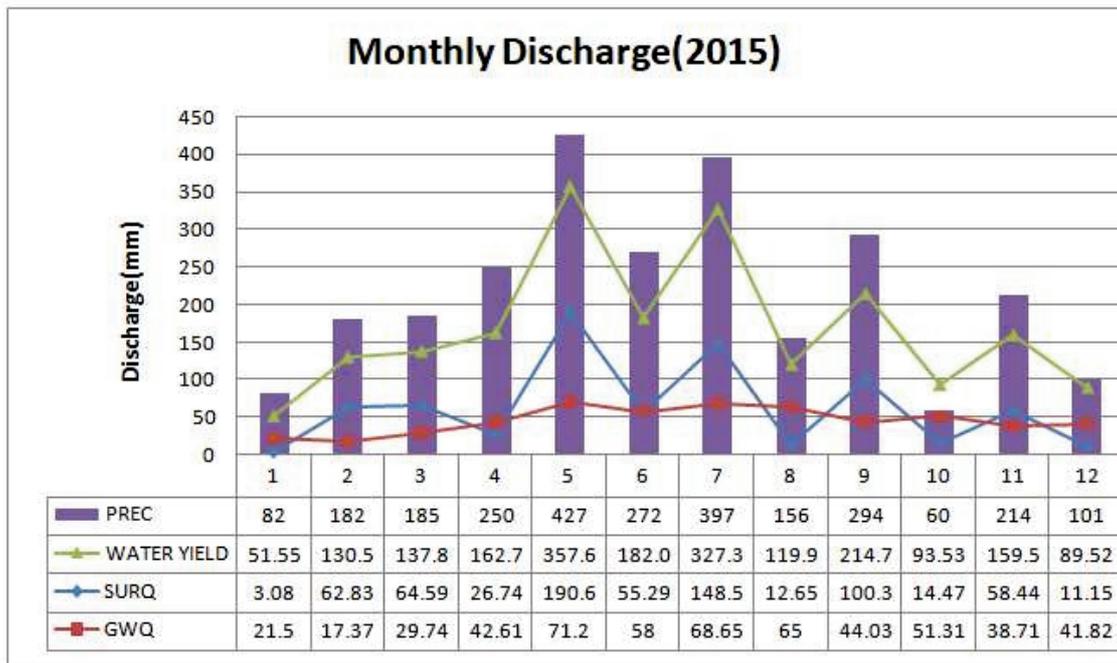


Fig. V-24. Monthly discharge of Akkun stream(2015)

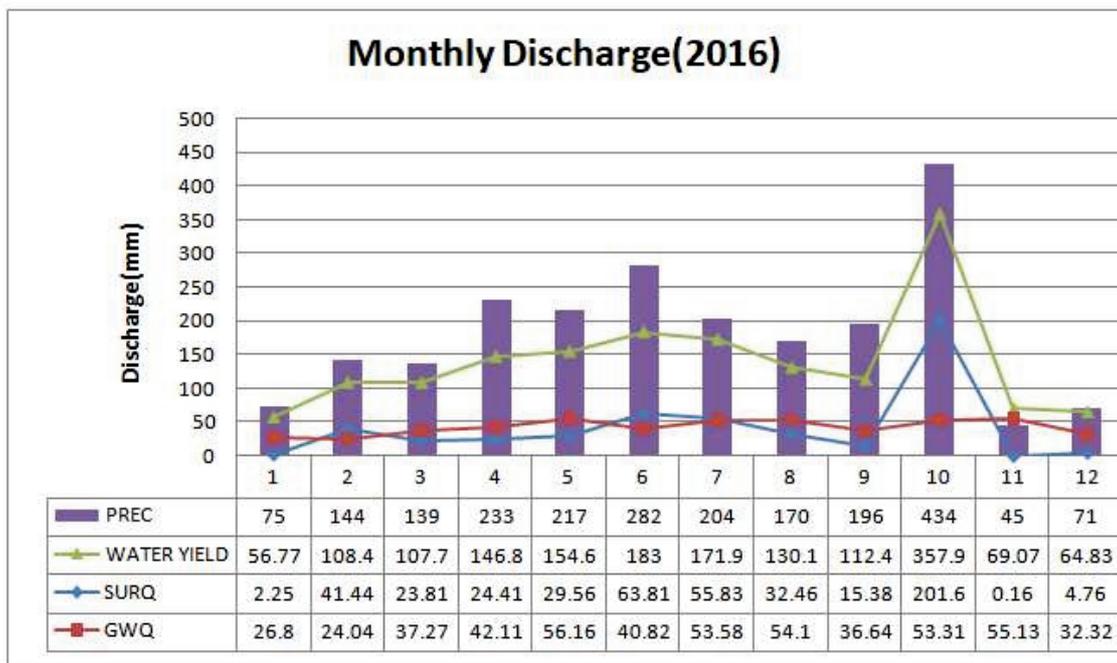


Fig. V-25. Monthly discharge of Akkun stream(2016)

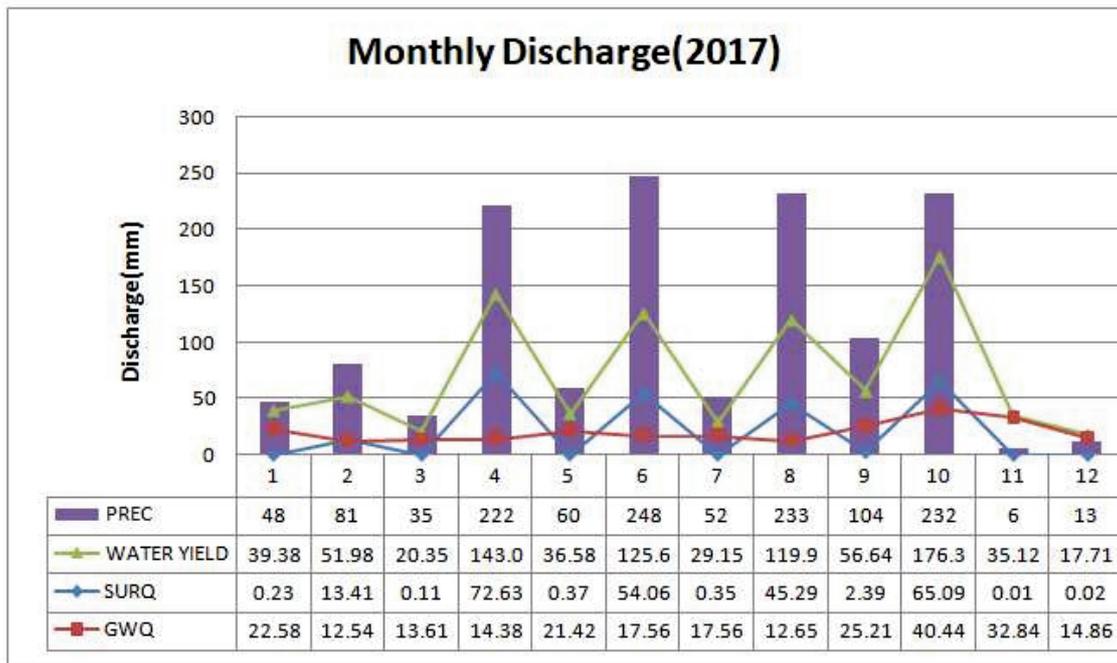


Fig. V-26. Monthly discharge of Akkun stream(2017)

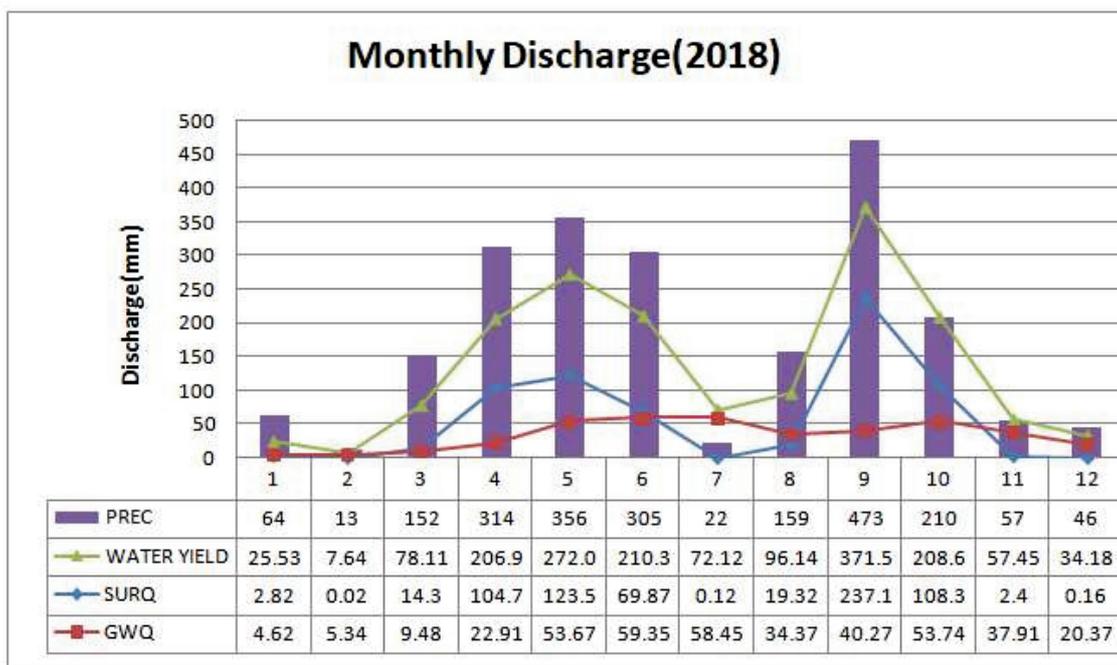


Fig. V-27. Monthly discharge of Akkun stream(2018)

1.5 기후변화 시나리오 적용에 따른 유출량 분석

1.5.1 장기 유출량 분석

기후변화 시나리오는 온실가스 농도 값을 설정 한 산정되며, RCP(Representative Concentration Pathways) 시나리오는 RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP 8.5 4가지로 분류된다.

- RCP 2.6 : 지구가 인간 활동에 따른 영향을 스스로 회복 가능한 경우 (실현불가)
- RCP 4.5 : 온실가스 저감에 대한 정책이 상당히 실행
- RCP 6.0 : 온실가스 저감에 대한 정책이 어느 정도 실행
- RCP 8.5 : 현재 추세로 온실가스 배출

본 연구에서는 약근천 유역을 대상으로 현재 추세를 반영하기 위한 RCP 8.5 기후변화 시나리오에 해당하는 기상자료를 사용하고, 실측유량을 이용한 SWAT 모의 보정시의 매개변수를 적용하여 미래 유출량 산정을 모의 하였다(Fig. V-28).

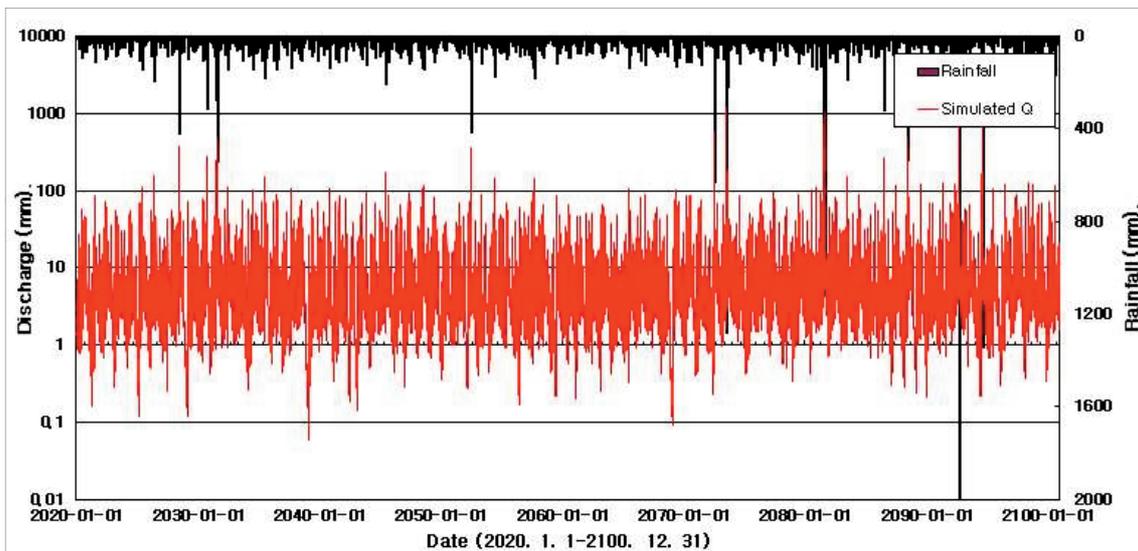


Fig. V-28. Future present comparison of direct runoff of Akkun stream

악근천 지역의 미래 60(2020~2100)년간의 총 강우 대비 지표 유출율은 8.1~66.2% 로 평균 지표 유출율은 18.2%로 나타났다(Fig. V-29.). 또한 악근천의 유출 성분인 기저 유출량은 13.3 ~ 35.7%의 변동 폭을 보이며 평균 28.7% 유출되는 것으로 분석되었다(Fig. V-30.). 또한 지표유출량과 기저유출량은 2068년부터 10년 이동평균 값이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

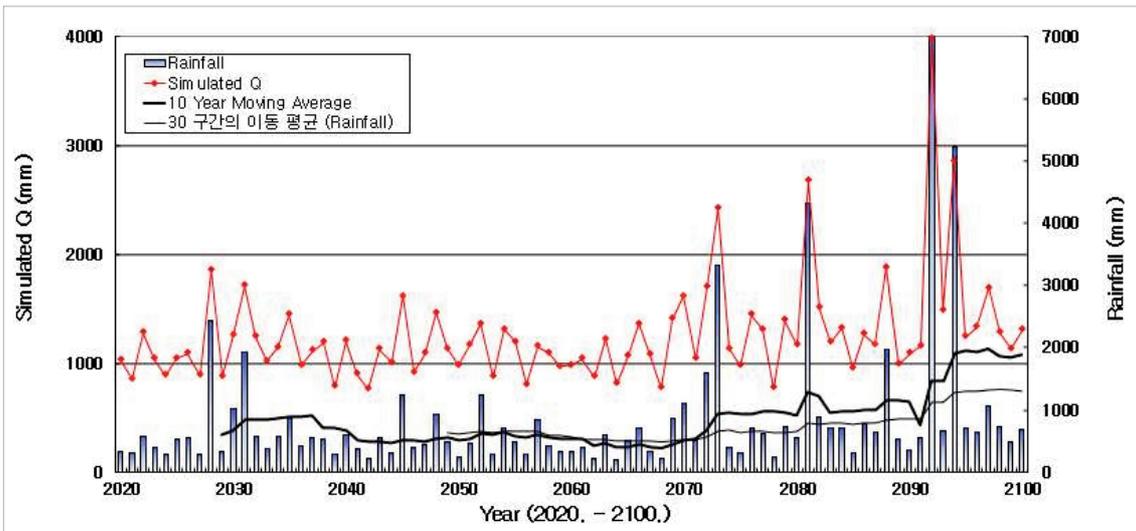


Fig. V-29. Future present comparison of direct runoff of Akkun stream

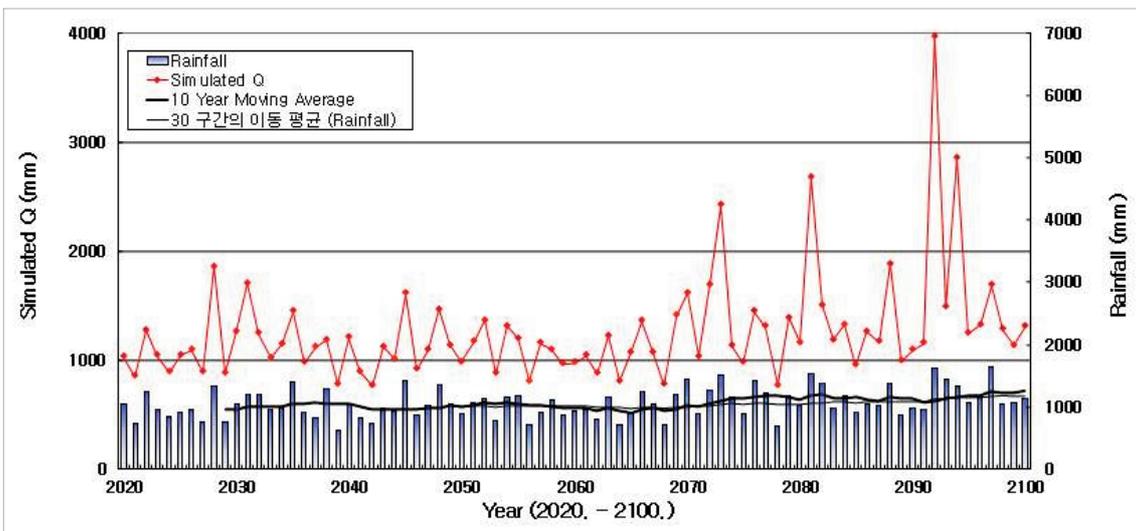


Fig. V-30. Future present comparison of ground water runoff of Akkun stream

1.6 지하수 함양율 추정

지하수 유동특성 분석을 위하여 SWAT 모의를 이용하여 악근천 유역의 소유역 별 지하수 함양율을 산정하였다. 지하수 함양율 산정 기간은 지하수 유동특성 모의 기간과 동일한 2017. 01. ~ 2019. 06. 이며, 소유역별 년 평균 지하수 함양율을 산출하였다.

모의 결과 2017년 지하수 함양율은 소유역 별 최소 42.27 ~ 43.67 %, 2018년은 최소 44.43 ~ 47.01 %, 2019년 6월 까지 35.93 ~ 37.74 %로 나타났다.

소유역 별 함양특성을 비교한 결과 ZONE-1 유역의 년 평균 함양율은 42.58 %로 다른 4개의 소유역에 비해 가장 큰 함양율을 나타냈으며, 유역 출구지점인 ZONE-5 유역의 경우 41.10%로 함양율이 작게 나타났다(Fig. V-31., Table V-18.).

Table V-18. Annual recharge rates of sub-basin (2017-2019)

Recharge area	2017	2018	2019	Average
1	43.00	47.01	37.74	42.58
2	43.17	46.68	36.68	42.18
3	42.27	45.61	35.92	41.27
4	43.67	45.73	36.75	42.05
5	42.59	44.43	36.28	41.10

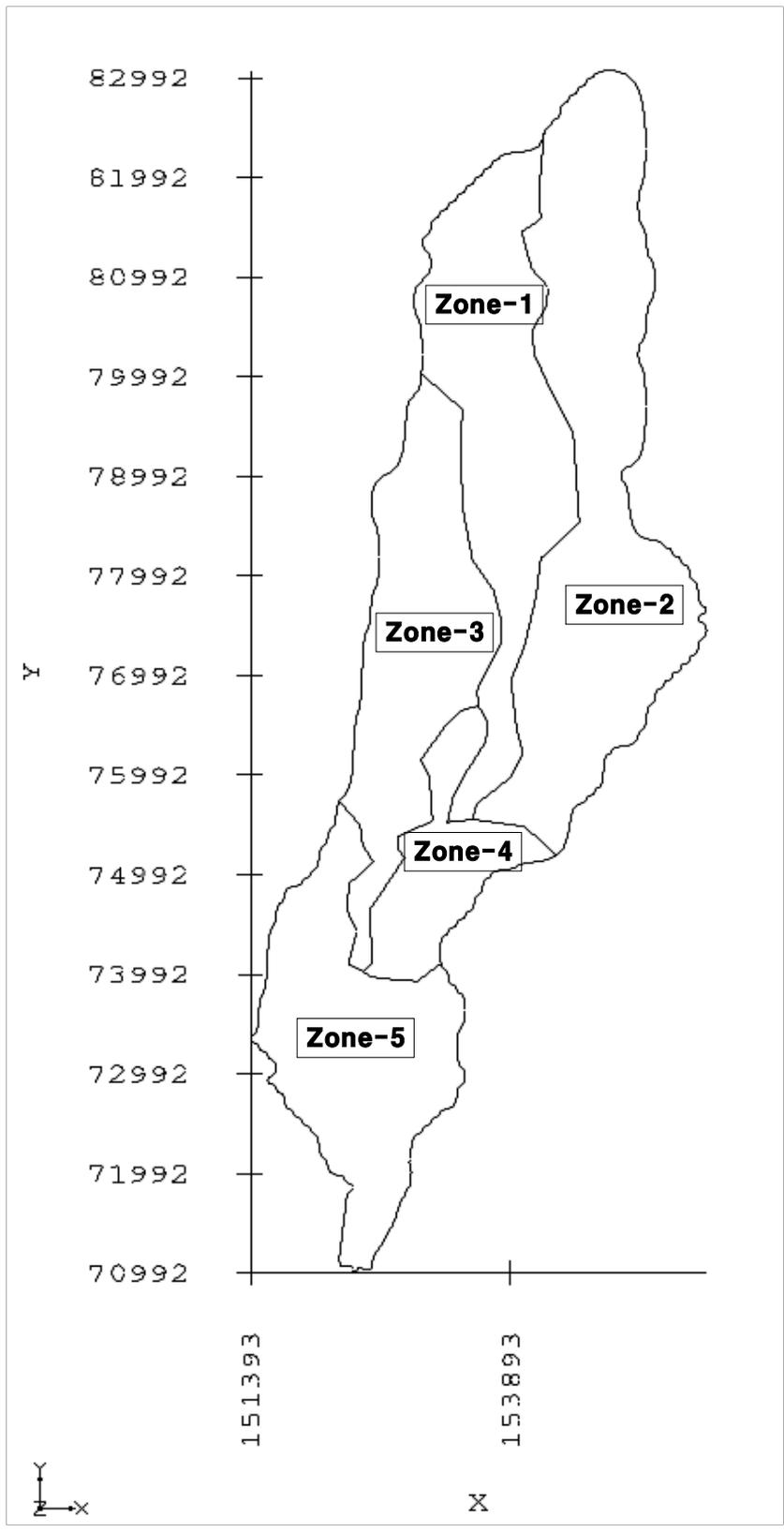


Fig. V-31. Recharge area of the studied basin

2 MODFLOW 모형의 모의

2.1 개념모형의 구축

악근천 유역의 지하수 모의를 통하여 함양량 변동시 단계별 기준 수위의 수렴 범위를 설정하기 위하여 개념모델인 MODFLOW 모형을 구축하여 모의·분석을 실시하였다(Fig. V-32.).

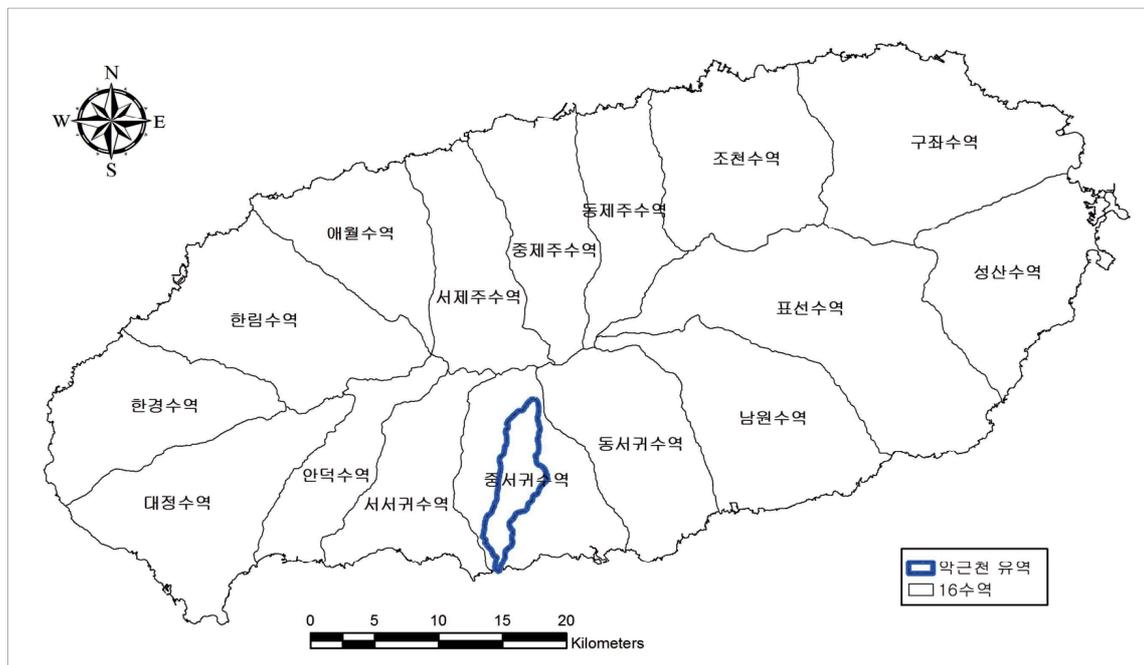


Fig. V-32. Map of basin for Akkun stream

개념모델을 구동하기 위하여 유역경계, 투수계수, 함양량 등의 Coverage를 생성하여 개념모델에 적용하였으며, 유역 경계설정 시 모의 영역의 수직적인 지층은 U층 상부 분포도를 참고하여 경계설정을 단순화 하였다. 우선 1층 상부구간(1 Layer Top)은 수치지형도를 이용하여 생성한 수치고도자료(DEM)를 보간(interpolation)하여 실제 수직적인 층을 재현하였고, 1층 하부경계 구간(1 Layer Bottom)은 U층 상부 분포도를 고려하였다(Fig. V-33.).

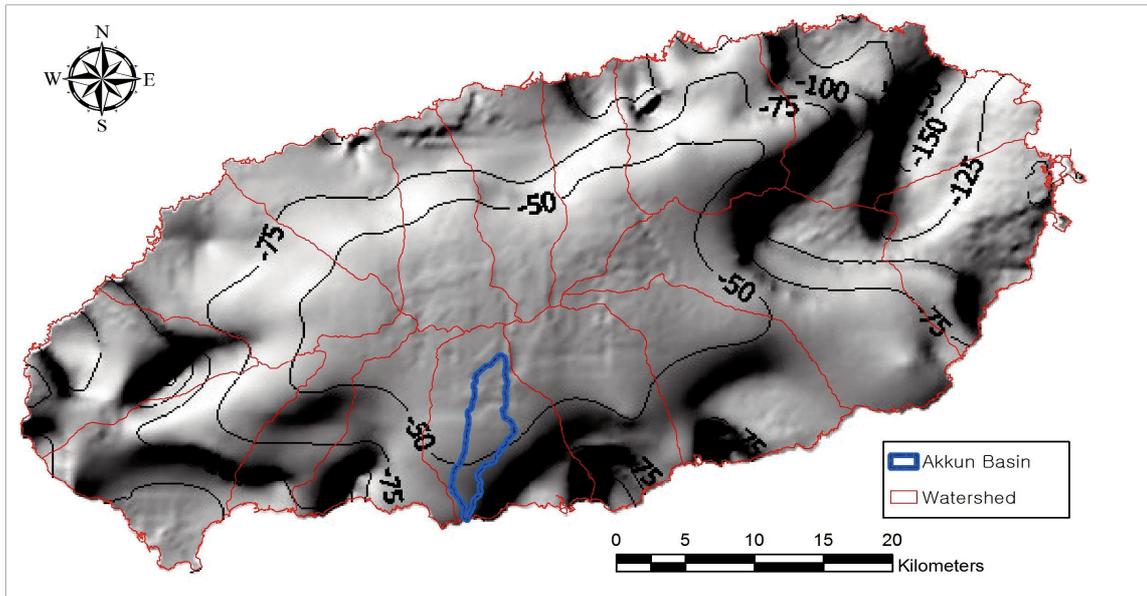


Fig. V-33. U-Formation (박기화 외, 2008)

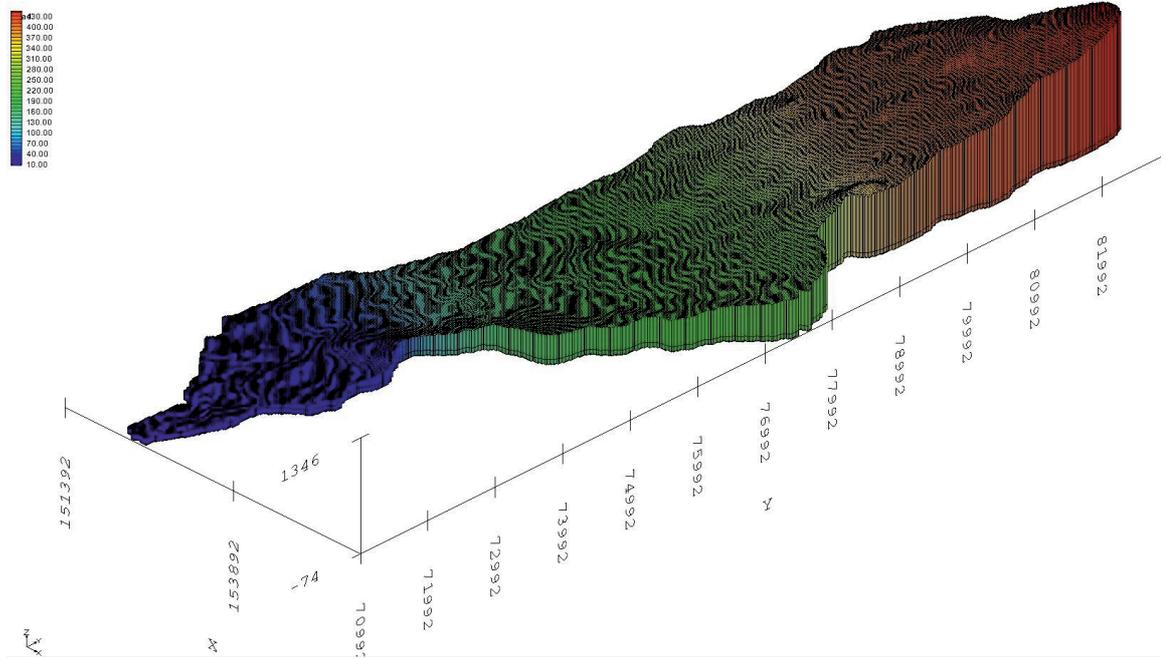
조사수역 내 격자망 구성은 20 m × 20 m로 설정하고, 대상수역을 제외한 지역은 비활성화셀(Inactive cells)로 구분한 결과, 수역 내 활성화셀(active cells)은 58,966개의 셀 격자망으로 구성되었다(Table V-19).

Table V-19. Grid network configuration

구분	격자망 구성
Cell refine	Base size: 20.0 m, Bias : 1.0, Max. size: 20.0 m
Number of Cells	665 rows × 242 columns = 160,930 cell (Active cells: 58,966 cell / Inactive cells: 101,964 cell)

약근천 유역의 지하수 함양지대 구분은 SWAT 모의에서 구분된 5개 소유역의 년도(2017. 1. ~ 2019. 6.)별 지하수 함양량을 평균값을 입력 자료로 사용되었으며, 조사수역 경계면 외곽지역은 지하수 흐름이 없는 NO-FLOW 상태 및 해안가 경계는 일정수두경계(Constant Head Boundary)로 설정하였다(Fig. V-34).

-. 3D GRID(3D View)



-. 3D GRID(SIDE View)

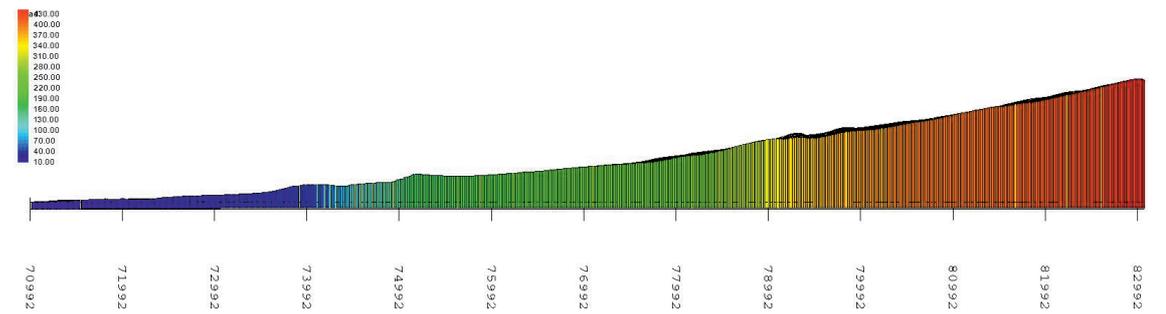


Fig. V-34. 3D GRID (Side View)

2.2 정상류 상태에 따른 지하수 유동해석

지하수 모델이 예측의 역할을 위해 사용되려면, 모델이 실제 대수층의 거동에 가깝게 모의 된다는 것을 입증해야 한다. 이를 위해서 지하수 모델링의 중요한 부분 중 하나인 모델 보정(Calibration)이라는 과정을 거쳐야 한다.

악근천 유역에서 수행한 지하수 모델링 모의치의 보정은 제주도 전역에 운영 중인 관측망의 수위 관측자료 중 해당 유역 내에 위치한 1개소, 농어촌공사에서 조사된 농업용 공공관정 3개소, 개인용 사설관정의 개발당시 수위 등 총 5개소의 최근 수위자료(2017 ~ 2019년 6월까지)를 이용하여 실제 관측수위에 부합하도록 보정작업을 수행하였다(Fig. V-35.)

모델링 보정에 필요한 인자 중 지하수 함양량은 SWAT 모의 결과를 적용하였으며, 화산암층의 수리인자 값 및 공극률은 “제주도 광역상수도 및 해수침투 감시관측정 자료(제주도, 2003)”에서 제시하고 있는 수리상수를 고려하여 입력하였다. 또한, 모의를 보다 현실적으로 고려하기 위해 공극율은 기 문헌자료를 참고하여 적정 값을 입력하여 모의에 적용하였다(Table V-20).

Table V-20. The value of the modeling of the argument

구분		Recharge rate (m/d)	Horizontal K ¹⁾ (m/d)		Vertical K (m/d)		Porosity ²⁾	
			보정 전	보정 후	보정 전	보정 후	보정 전	보정 후
소유역구 분	Zone-1	0.001997	10 ¹ ~ 10 ³	9.39 (mean)	10 ⁻¹ ~ 10 ²	10 ⁻¹	0.03 ~ 0.35	0.30
	Zone-2	0.001978						
	Zone-3	0.001935						
	Zone-4	0.001966						
	Zone-5	0.00192						

1) 「제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(Ⅲ)」(제주도, 2003).

2) 「수리지질과 지하수환경」(한정상, 내하출판사, 2011).

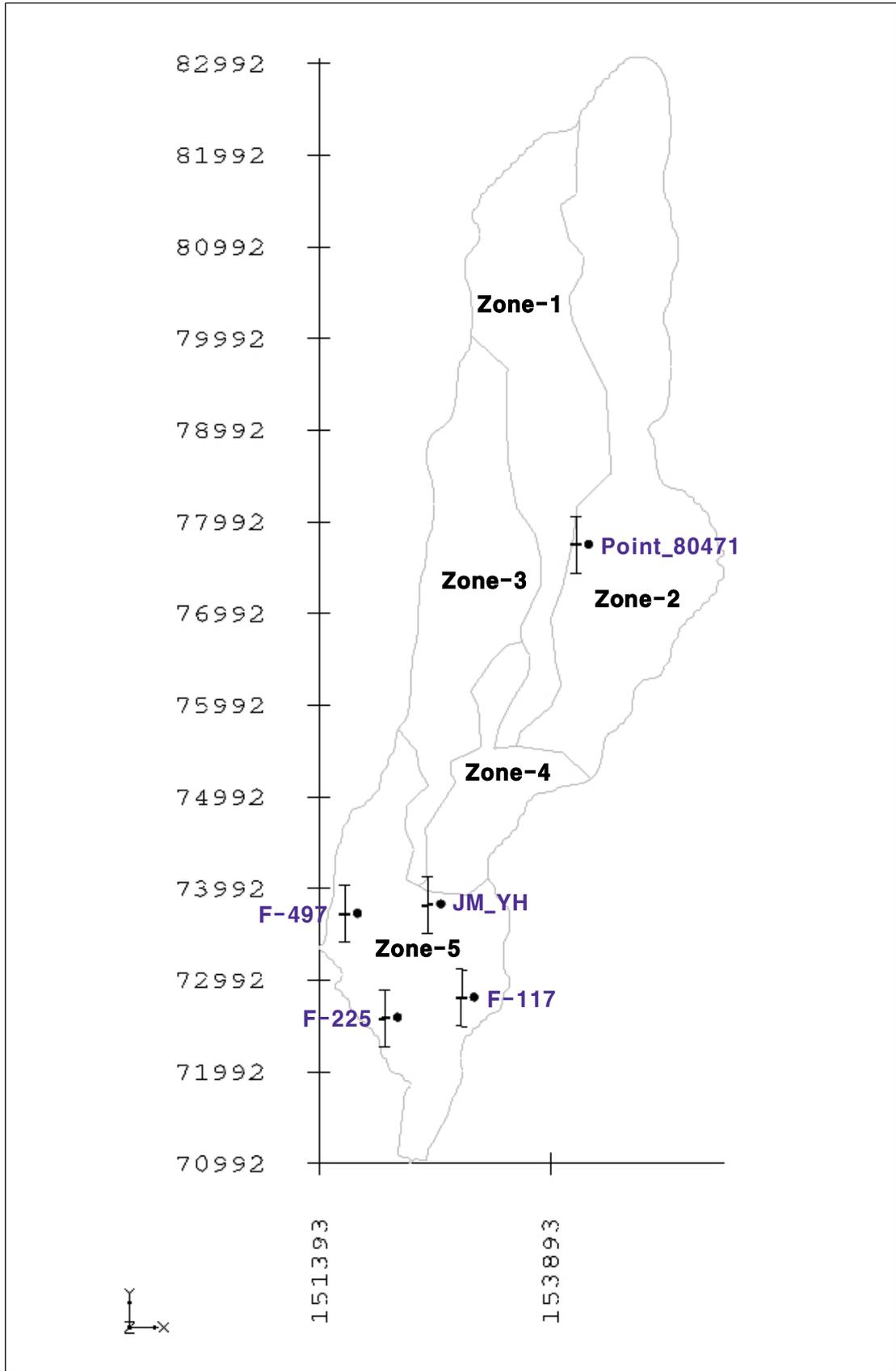


Fig. V-35. Calibration Target

악근천 유역내 위치한 5개소의 관측정 수위자료를 이용하여 지하수 유동모형의 불확실한 입력치를 보정하여 관측수위와 모델링 수위를 최대한 근접시키는 보정작업을 실시하였다. 모델링 수위결과 값과 실제 관측수위와의 대수차인 잔류치(residual)를 이용하여 다음과 같은 평균잔차(mean residual), 절대평균잔차(mean absolute residual), RMS(root mean square) 잔차 등을 계산할 수 있다.

$$\text{평균잔차} : R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i$$

$$\text{절대평균잔차} : RA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_i|$$

$$RMS : S = \sqrt{\sum \frac{r_i^2}{n}}$$

모델링 보정 후 계산된 값과 관측정 수위 값 사이의 오차에 대한 통계결과는 평균(Mean Residual)값 -0.002 m, 절대평균(Mean Absolute Residual)값 0.011 m, RMS 0.011 m로 산출된 수위와 관측수위 값의 오차는 크지 않은 것으로 분석되어 계산된 관측수위가 모델분석에 잘 반영된 것으로 판단된다(Table V-21.~22., Fig. V-36.).

모델인자를 보정하고, 최적 인자 값을 정하여 정류상태에서 모의를 한 결과, 지하수 흐름은 지형고도를 반영하여 조사수역 북쪽 상류부에서 남쪽 해안방향으로 이동하는 것으로 나타났다(Fig. V-37.).

Table V-21. Calibration results of underground water level

Item	Value(m)	Remark
Mean Residual(Head)	-0.002	
Mean Absolute Residual(Head)	0.011	
Root Mean Squared Residual(Head)	0.011	

Table V-22. Comparison Observation Head vs. Computed Head

관측점명	Obs. Head (EL. m)	Obs. Head interval (m)	Obs. Confidence (%)	Computed Head (EL. m)	Residual Head (m)
F-117	21.72	1.0	95	21.71	-0.00932
F-225	19.11	1.0	95	19.13	0.0142
F-497	35.06	1.0	95	35.05	-0.01125
JM_YH	31.52	1.0	95	31.52	0.00296
point_80471	248.0	1.0	95	248.02	0.0154

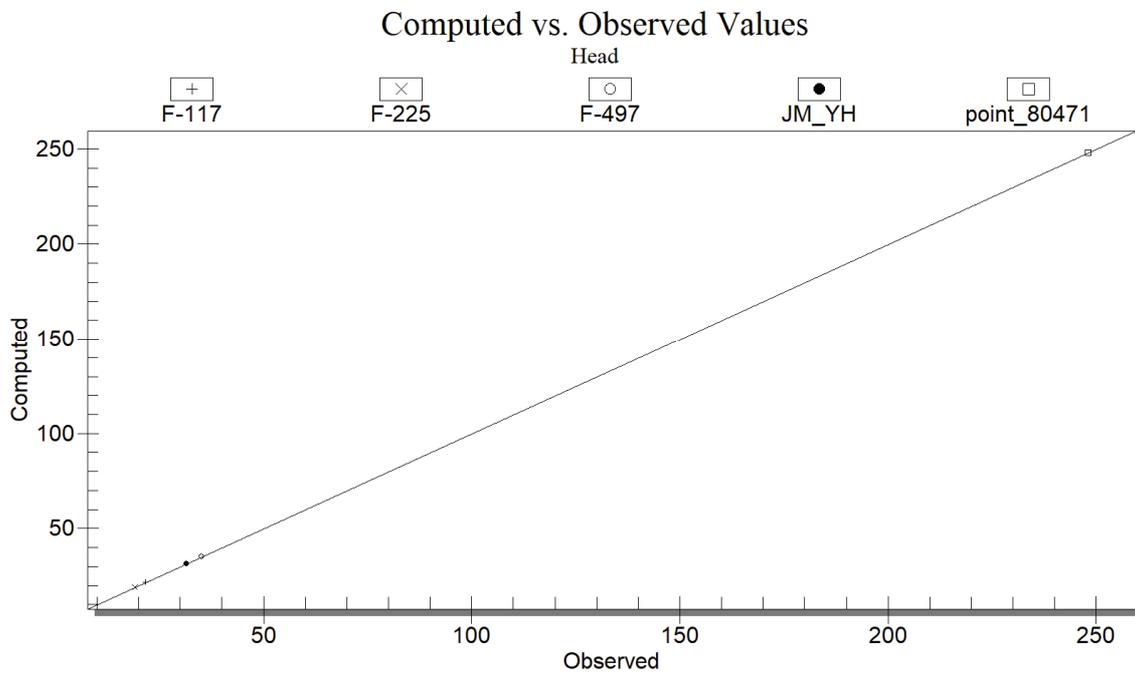


Fig. V-36. Computed vs. Observed Values

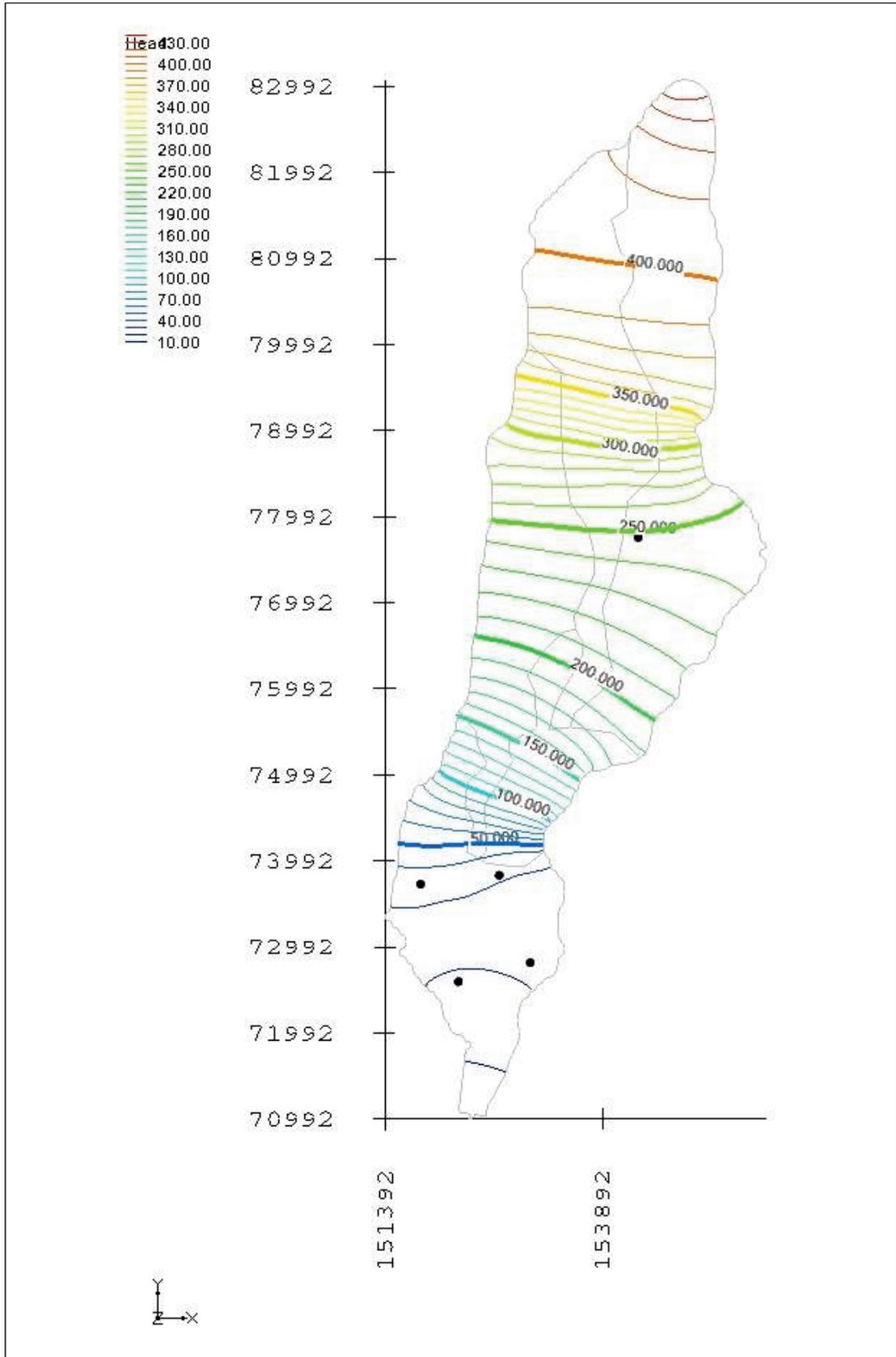


Fig. V-37. Groundwater table contour map under steady state

2.3 지하수 함양량에 따른 지하수 유동특성 및 기준수위 설정

2.3.1 지하수 함양량에 따른 지하수 유동특성

지하수 개발에 따른 조사지역의 지하수 환경의 변화를 살펴보기 위하여 함양량을 변화하여 구축된 모델내의 지하수 유동특성을 파악하였다.

악근천 유역의 함양량 변화에 따른 지하수위 유동특성을 파악하기 위하여 정상류 상태에서 소유역 별 지하수 함양량을 -10 ~ -50%, 10 ~ 50 %를 변화시켜 모의·분석을 진행하였다.

분석 결과 함양량 10% 감소시 1.34 ~ 10.41 m, 20% 감소시 2.69 ~ 21.19 m, 30% 감소시 4.07 ~ 32.89 m, 40% 감소시 5.47 ~ 44.06 m, 50% 감소시 6.89 ~ 56.27 m 의 지하수위 하강 특성을 보였으며, 각 관정의 함양량 감소율에 따라 최소 4.1%에서 최대 36.0%까지 지하수위가 내려가는 것으로 분석되었다. 또한 함양량 10% 증가시 1.31 ~ 10.06 m, 20% 증가시 2.61 ~ 19.82 m, 30% 증가시 3.88 ~ 29.28 m, 40% 증가시 5.14 ~ 38.5 m, 6.39 ~ 47.48 m 의 지하수위 상승폭을 나타냈으며, 최소 4.05% 에서 최대 32.74% 까지 지하수위가 상승하는 것으로 확인되었으며, 함양률 증감 시 모든 관정이 유사하게 지하수위의 상승 및 하강 특성을 보이는 것으로 분석되었다(Table V-23., Fig V-38.~42)

Table V-23. Changes in the groundwater level due to recharge increase

% Obs.	-50	-40	-30	-20	-10	정상류	10	20	30	40	50
F-117	13.9	15.5	17.1	18.7	20.2	21.7	23.1	24.6	26.0	27.4	28.8
F-225	12.2	13.6	15.0	16.4	17.7	19.1	20.4	21.7	23.0	24.2	25.5
F-497	23.2	25.7	28.1	30.5	32.8	35.0	37.2	39.3	41.4	43.5	45.5
JM_Y H	20.8	23.0	25.2	27.3	29.4	31.5	33.5	35.4	37.4	39.3	41.1
point_8 0471	191.7	203.9	215.6	226.8	237.6	248.0	258.0	267.8	277.3	286.5	295.5

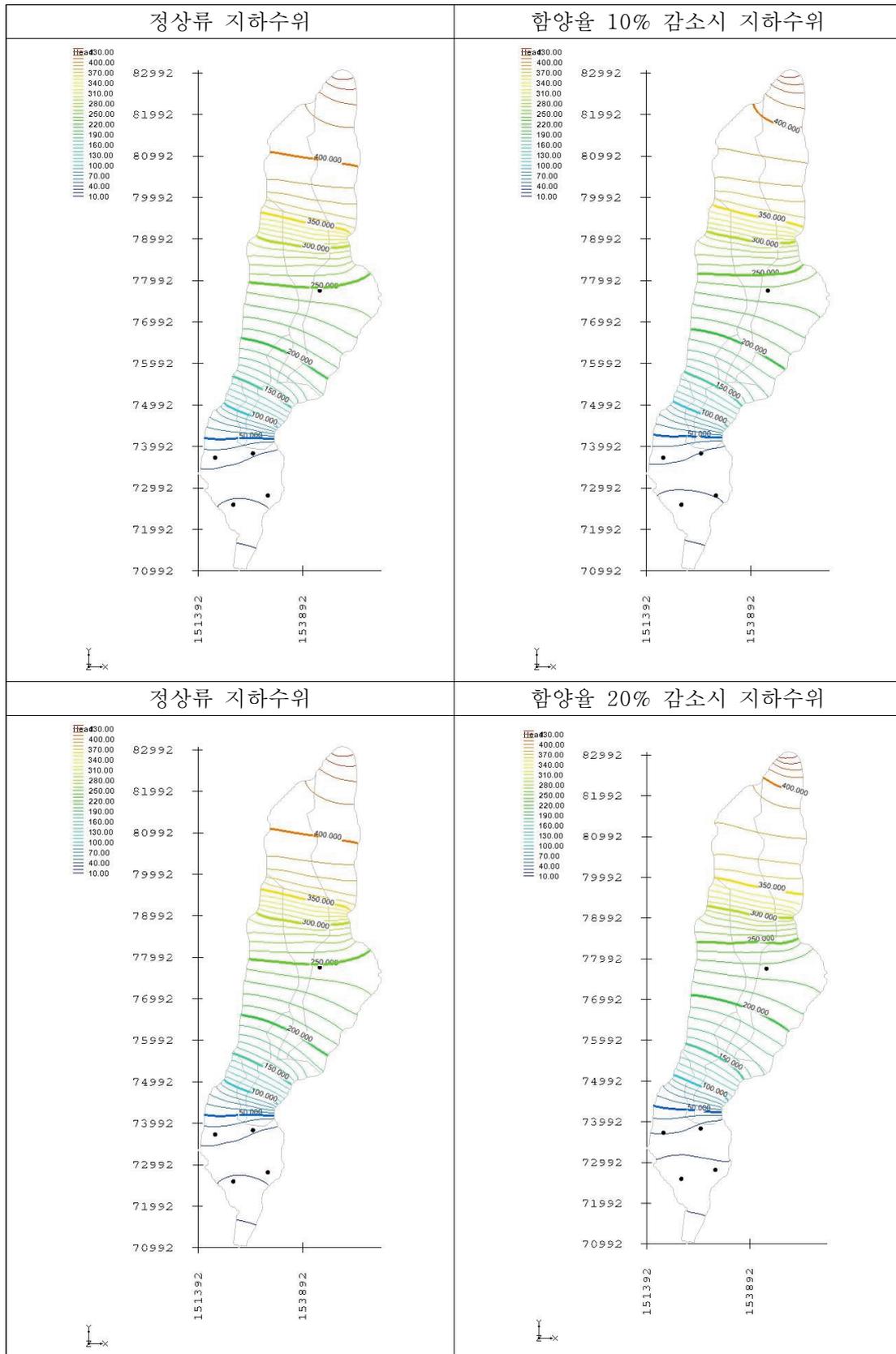


Fig V-38. On distribution diagram of an equal number of steady flow state

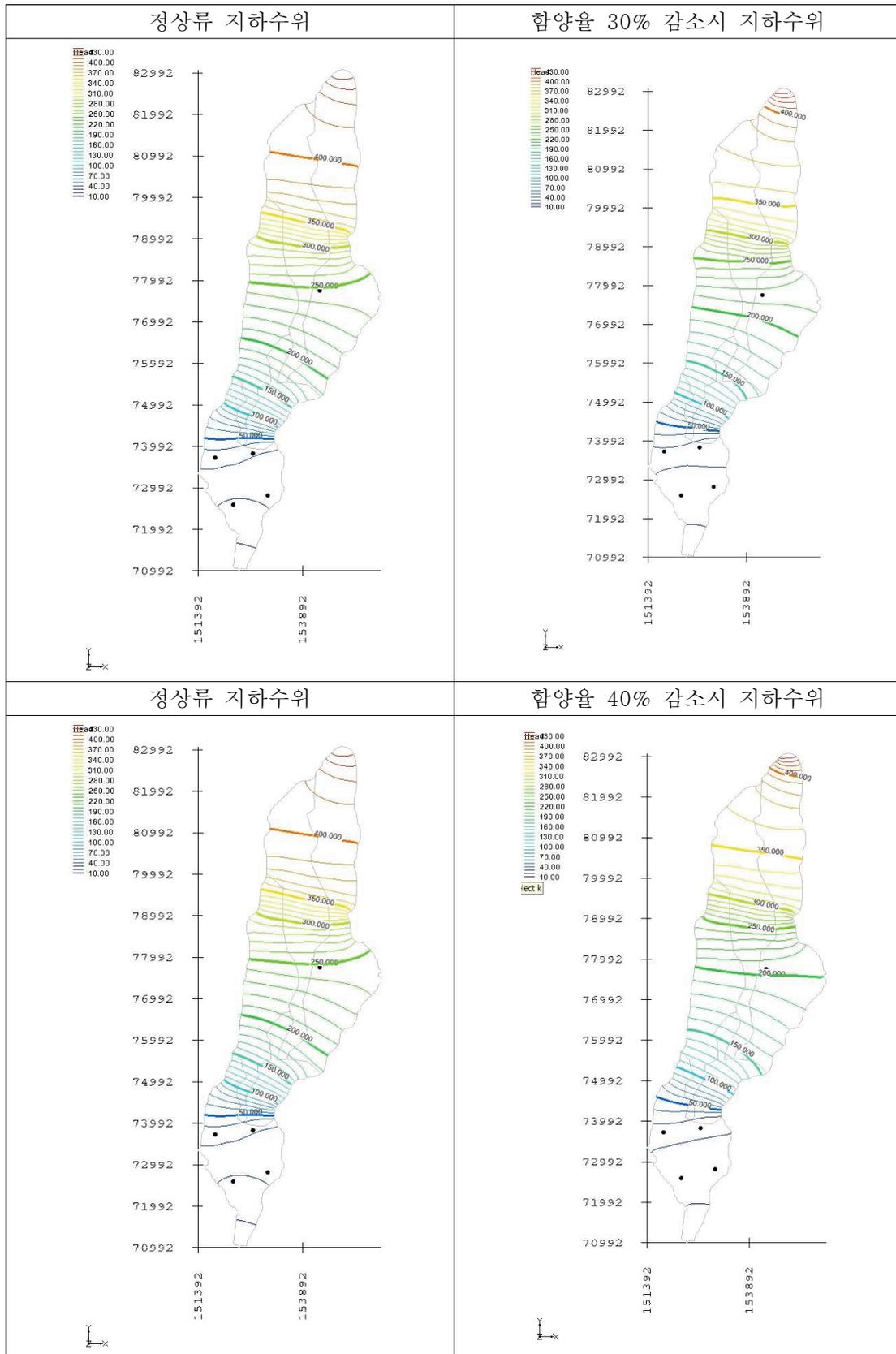


Fig. V-39. On distribution diagram of an equal number of steady flow state

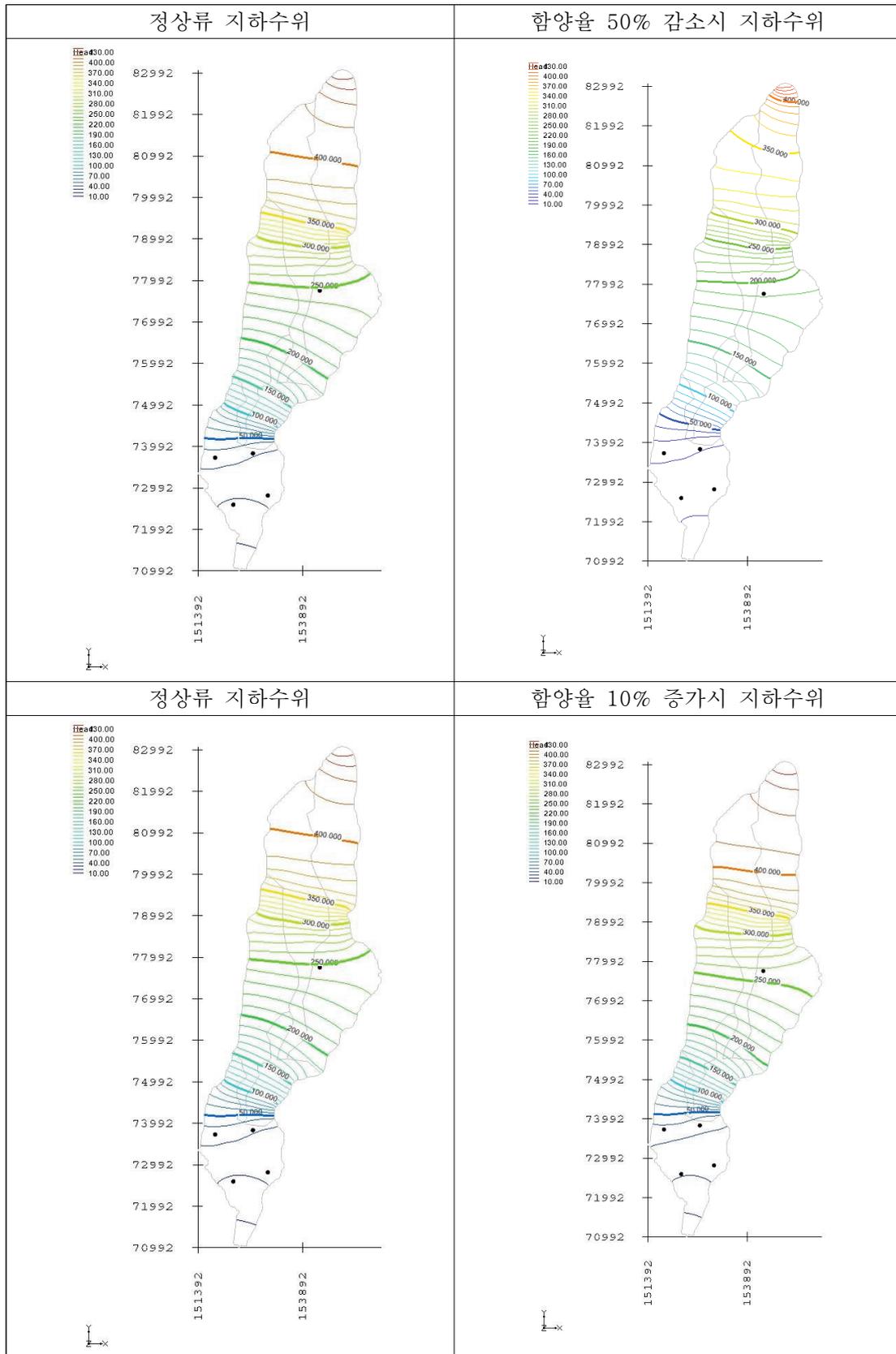


Fig. V-40. On distribution diagram of an equal number of steady flow state

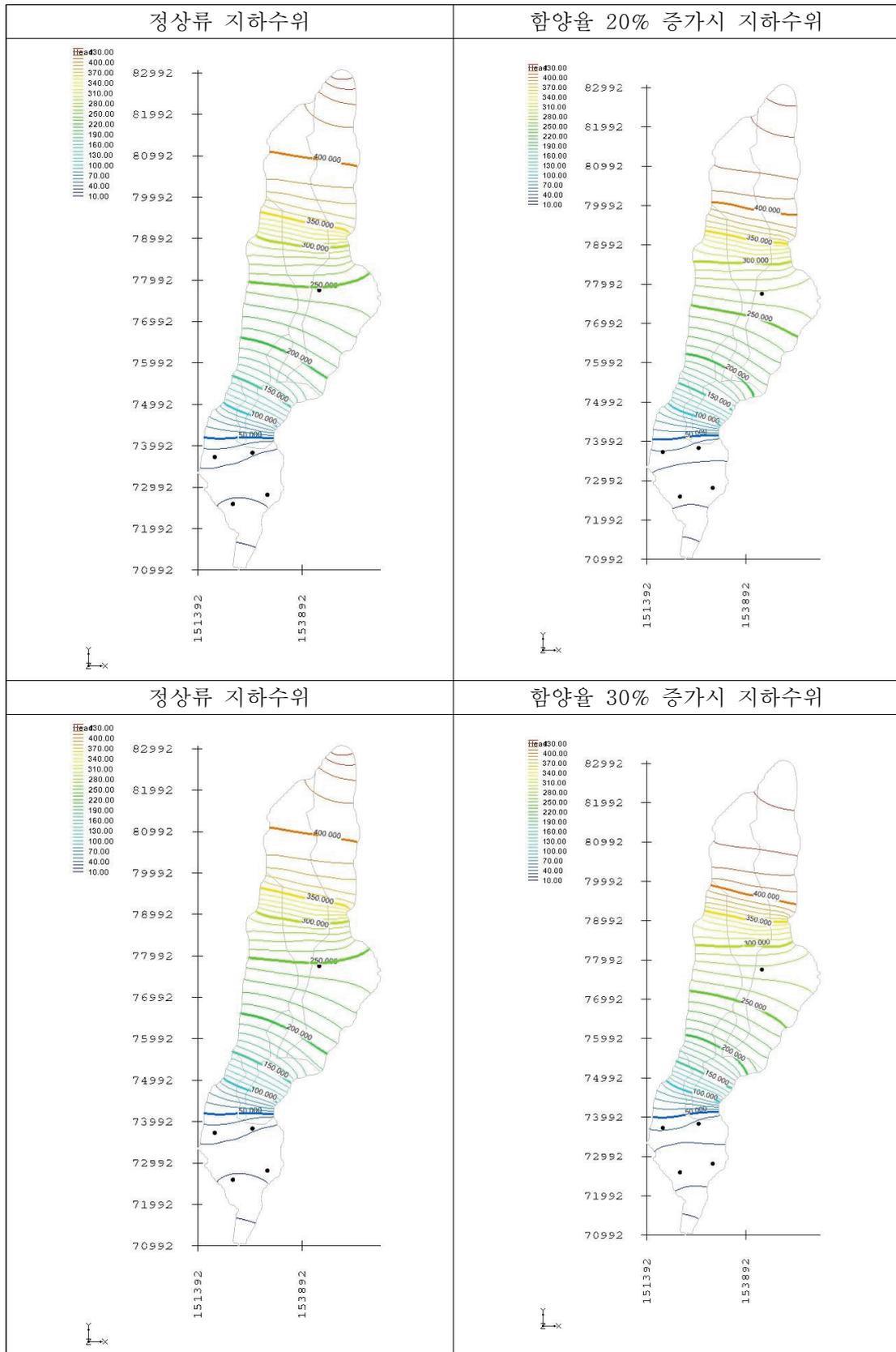


Fig. V-41. On distribution diagram of an equal number of steady flow state

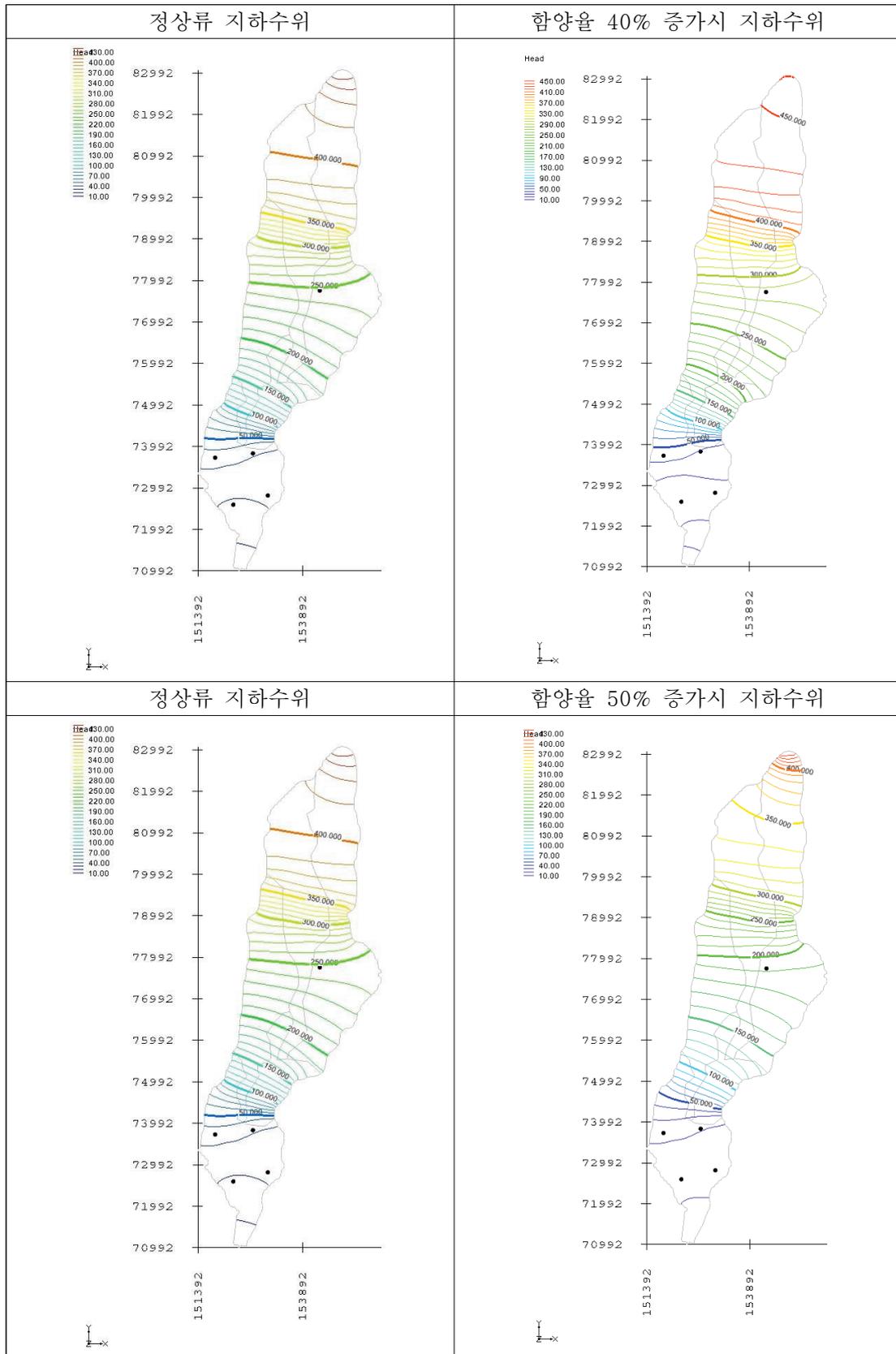


Fig. V-42. On distribution diagram of an equal number of steady flow state

2.3.2 단계별 기준수위 설정

제주특별자치도에서는 지하수의 보존·관리를 위하여 지하수 관정의 단계별 조치 기준을 조례로 지정하고 있다.

제1단계에서는 해당 구역 기준수위 관측정의 2분의 1 이상에서 일평균 지하수위가 7일 이상 연속하여 1단계 기준수위 이하로 내려가는 경우 해당 구역 지하수 이용자에 대한 절수를 안내하며, 해안변 인근 지하수의 수질 모니터링을 강화 한다.

제2단계에서는 해당구역 기준수위 관측정의 2분의 1 이상에서 일평균 지하수위가 7일 이상 연속하여 2단계 기준수위 이하로 내려가는 경우, 취수 허가량이 10,000 ($m^3/month$) 이상인 해당구역 지하수시설 관리자에게 취수 허가량의 100분의 80 이내에서 지하수를 취수하도록 조치하며 해안변 인근 지하수의 염소 이온 농도가 먹는물 수질기준의 90%를 초과하는 경우 인근 지역 지하수 이용자에게 염분 농도 증가에 따른 사용 주의를 안내한다.

마지막으로 3단계에서는 해당 구역 기준수위 관측정의 2분의 1 이상에서 일평균 지하수위가 7일 이상 연속하여 3단계 기준수위 이하로 내려가는 경우, 해당구역 지하수 시설 관리자에게 취수허가량의 70%이내에서 지하수를 취수하도록 조치하며 해안변 인근 지하수의 염소 이온 농도가 먹는물 수질기준을 초과하는 경우 인근 지역 지하수 이용자에게 염분 농도 증가에 따른 사용 자제의 내용을 안내한다.

약근천 구역의 위치하는 JYH 관측정의 기준수위는 1단계 25.13m, 2단계 22.98m, 3단계 20.89m 로 지하수 유동 모의를 적용한 결과 정상류 상태의 수위는 31.52m 로 분석되었다. 정상류 상태에서 지하수 함양율의 변동 적용시 -30% 일 때 지하수위는 25.13m 로 1단계 기준수위에 도달하였으며, -40%일 때 지하수위는 23.07m 로 2단계 기준수위에 근접, -50%일 때 지하수위는 20.83m이며 3단계 기준수위를 초과할 것으로 분석되었다(Fig. V-43.).

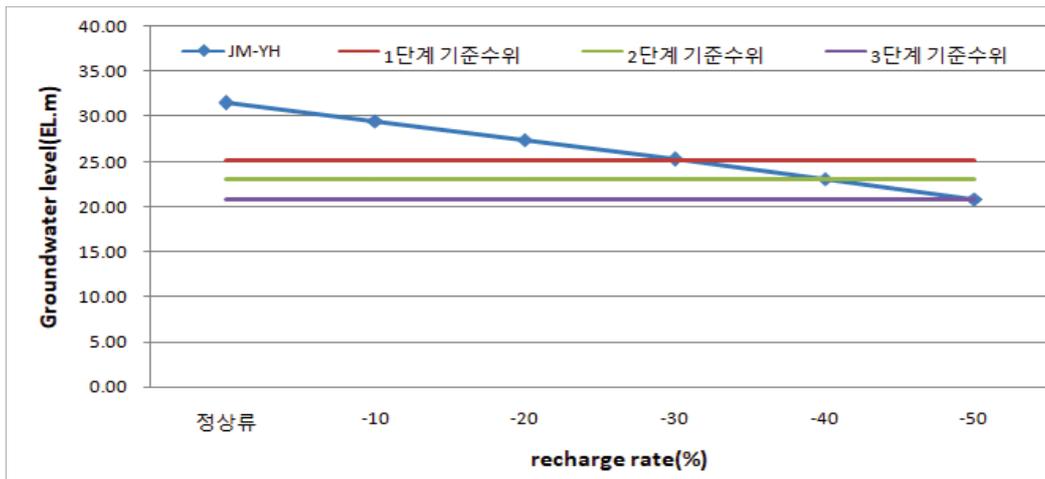


Fig. V-43. Recharge rate of groundwater level variation

VI. 하천 유지유량 및 농업용수 활용 가능량 산정

1. 하천 유지유량 산정

1.1 하천유지유량 산정의 기본방향

하천유지유량을 산정하는 방법으로 과거(건설교통부, 2000)에는 먼저 하천유황 및 이수량, 하천환경을 고려한 하천상황 파악 후 조사지구, 조사구간, 조사지점 등 하 도구분을 통한 지점을 선정하고, 선정된 지점에 대하여 항목별 필요유량을 산정하였다. 이때 판단 기준은 갈수량을 기본으로 하천의 수질보전, 생태계 보호, 경관, 염수침입 방지, 하구막힘 방지, 시설물 보호, 지하수위 등이 고려되었다. 하지만, 대부분 갈수량을 기준으로 산정되었으며, 나머지 항목들이 검토시 차지하는 비중은 미미하였다. 하지만, 최근에는 갈수량만이 아닌 생태계 및 하천 수질 항목을 주요 기본 항목으로 구분하고 있으며, 나머지 기타 항목은 필요 여부에 따라 추가적인 항목에 대한 검토를 감안하도록 하고 있다. 따라서, 하천유지유량 산정 시 갈수량 등의 기본 항목과 기타항목을 종합적으로 평가하여 산정된 유량 중 가장 큰 유량을 하천유지유량으로 결정한다.

기본 항목별 비교를 통하여 산정된 하천유지유량은 중·장기적으로 하천 관리 주체가 적극적으로 확보·보존하도록 해야 하는 필수유량으로, 물수지 분석을 통해 실질적인 확보가능성을 토대로 고시하는 하천유지유량은 최대한 보장될 수 있도록 관리 주체를 포함하여 국가적 차원에서의 관리가 지속적으로 이루어 져야 한다.

1.2 갈수량 산정의 기본방향

하천에 부여된 갈수량의 영역은 개인 및 기관이 독점 사용할 수 없으며, 하천을 이용하는 모든 사람들이 보존해야 하는 최소 유량으로 자연적 하천의 상태에서는 하천 내에서 오염물질 등이 여과 되는 등 자정작용을 거쳐 자연 상태를 유지 시키며, 주변 생태계를 보호 할 수 있는 유량이다.

따라서 수자원 개발 등에 의하여 하천에서의 하천수 이용의 필요성 발생 시 필수

적으로 확보되어야 하는 일정량 이상의 갈수량을 고려하여, 하천의 흐름이 단절되지 않도록 하여야 한다.

현재 우리나라에서는 하천유지유량 산정 시 자연 상태의 하천에서 이수량을 고려하지 않은 하천 본래의 기능을 유지하기 위한 최소한의 유량인 갈수량을 평가지표의 일부분으로 활용되고 있다.

1.3 약근천 유역의 하천유지유량 산정

하천유지유량은 생활·공업·농업·환경개선·발전·주운 등의 하천수 사용을 고려하여 하천의 정상적인 기능 및 상태를 유지하기 위하여 필요한 최소한의 유량이다(하천법 제51조).

하천법 제51조에서의 ‘하천의 정상적인 기능 및 상태’는 하천 고유의 수리·수문학 적 하도가 유지되어 생태환경 보호 및 수질 보전 등이 가능한 상태를 말하며, 현재 국내에서 산정되고 있는 하천유지유량은 갈수량, 하천수질, 생태계, 경관, 염해, 하구 막힘방지, 하천시설물 및 취수원보호, 지하수위 유지로 총 8가지 항목의 필요유량을 감안하여 산정한다(고 등, 2008).

내륙지역의 경우, 하천유지유량에 대한 개념을 1966년에 최초로 언급하면서 하천유지유량에 대한 조사가 실시되었고, 현재(2018년 기준) 114개 지점에 대해서 하천유지유량이 고시되었으나 제주지역의 하천은 포함되지 않은 실정이다.

본 연구에서는 향후 농업용수의 대체수자원으로 이용하기 위한 사용 가능수량 파악을 위하여 약근천 유역을 대상으로 하천유지유량을 산정하였다.

약근천 유역의 적절한 하천유지유량을 산정하기 위해서는 지점설정, 세부조사 항목별 하천유지유량 산정 등 체계적이고, 단계적인 연구가 필요하나 현 제주도내 하천의 경우 장기적인 하천 유량관측의 부재와 더불어 하천수질, 생태조사 등 세부항목에 대한 상세조사가 이루어지지 않아 세부 항목을 모두 반영하기에 무리가 있다. 또한 하천유지유량 산정에는 자연 상태의 갈수량 값 적용이 필수적이지만 제주도의 경우 내륙지역과는 상이한 수문특성으로 대부분의 하천에서 평상시에는 지표유출이 발생하지 않으며, 태풍이나 집중호우 시에만 단기간에 걸쳐 유출이 발생하기 때문에 현 시점에서 제주도 하천의 갈수량 산정하는 것은 무리가 있다.

따라서, 본 연구에서는 기저유출 성분의 유출수를 형성하여 상시적으로 하천 흐

를 유지하는 약근천 유역을 대상으로 실측치를 통한 장기유출량 산정 결과를 적용하여 갈수량 기준의 하천유지유량을 산정하였다.

하천유지용수 산정의 기준이 되는 평균 갈수량 및 기준 갈수량 산정을 위하여 2004년부터 2018년까지의 장기 유출 분석 결과를 분석에 적용하였다. 평균 유출량은 연도별 355일에 해당하는 값으로 이 값은 1년 중 355일 동안에 하천유량이 이보다 감소하지 않고 1년 중 흐르는 최소 유량으로 제주도의 특성상 총유출, 지표유출, 기저유출에 대한 유황분석을 통하여 산정하였으며, 기준 갈수량은 2016년 제정된 이수계획(국토교통부)에서 10년간의 갈수량에서 최소값으로 하거나, 각 해의 갈수량으로부터 확률처리의 방법을 제시한 바 있다(Fig. VI-1.). 따라서, 본 연구 유역의 경우 수문 지질학적 특성상 10년간의 갈수량에서 최소값을 적용하여 결과를 산출하였다.

산정결과 약근천 유역의 평균 갈수량은 총 유출 기준 $0.076 (m^3/s)$, 기저유출 $0.051 (m^3/s)$ 로 분석되었으며, 기준갈수량은 총 유출 기준 $0.017 (m^3/s)$, 기저유출 $0.006 (m^3/s)$ 로 산정되었다(Table VI-1.).

Table VI-1. Mean droughty flow vs. Basic low flow (unit : m^3/s)

Year	Water Yield	GWQ
Mean droughty flow	0.076	0.051
Basic low flow	0.017	0.006

일반적으로 국내에서는 갈수량을 기준으로 하천유지용수 산정 시 평균갈수량과 기준갈수량 중 큰 값을 적용한다. 하지만, 제주도 하천의 유출성분은 내륙지역과 달리 기저유출성분의 특성을 갖는 유출 흐름을 보이며, 평상시 대부분의 하천이 건천의 형태를 보이는 특성을 감안 하였을 때 평균갈수량을 기준으로 하천유지용수를 산정하는 것은 과다 산정 될 우려가 있다. 따라서, 본 유역의 하천유지용수량 산정 시 기준갈수량 $0.006 (m^3/s)$ 을 적용하고, 평균갈수량은 보조지표로 사용하는 것이 부합할 것으로 판단된다.

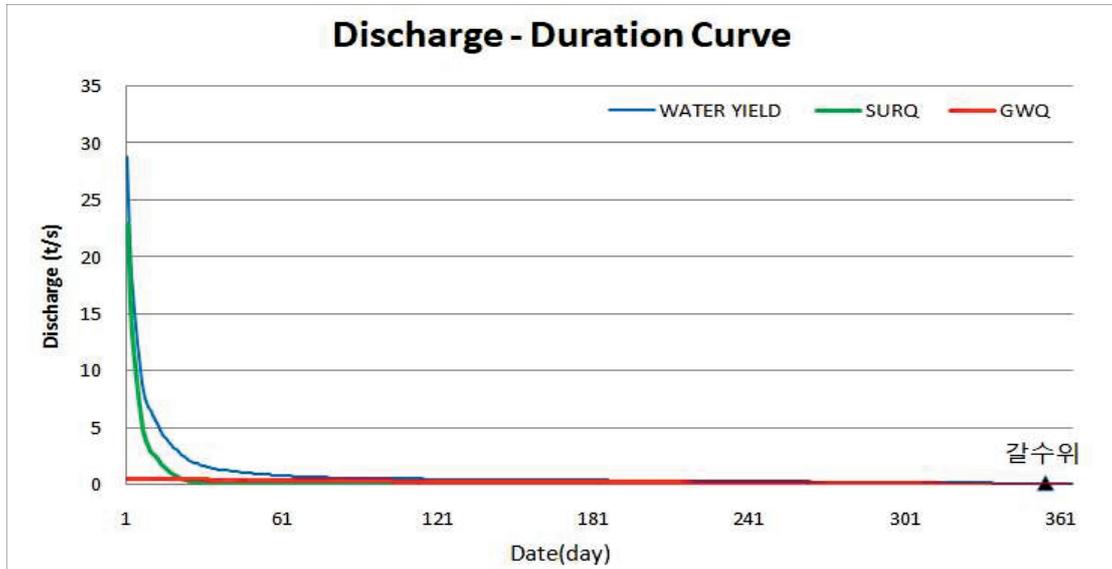


Fig. VI-1. Discharge-Duration curve

1.4 기저유출수의 농업용수 이용 가능량 산정

일반적으로 하천수 이용 시 이용 가능량은 하천유지유량을 제외한 유량으로 세부 조사 항목별 하천유지유량 산정 등 체계적이고, 단계적인 연구를 통한 분석이 필요하다. 하지만, 본 연구의 경우 장기 관측 자료의 부재 및 내륙지역과 상이한 수문특성 등으로 인하여 장기 유출모의를 이용한 갈수량 산정 방법으로 하천유지 유량을 산정하였으며, 약근천 하천유지용수 $0.006 (m^3/s)$ 을 일유출모의 결과에 적용 시 1년 중 상시적으로 하천수 이용이 가능한 것으로 나타났다.

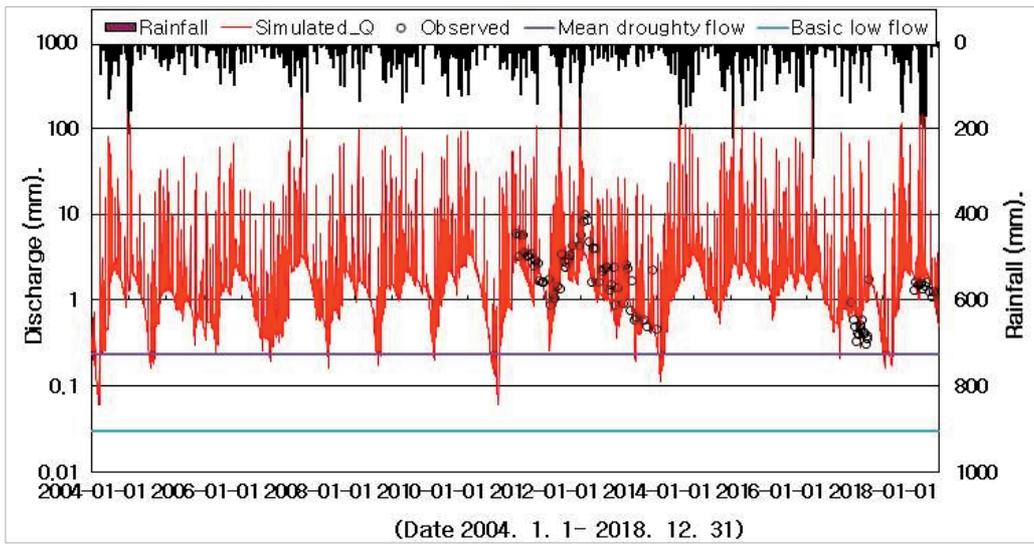


Fig. VI-2. Amount available for agricultural water

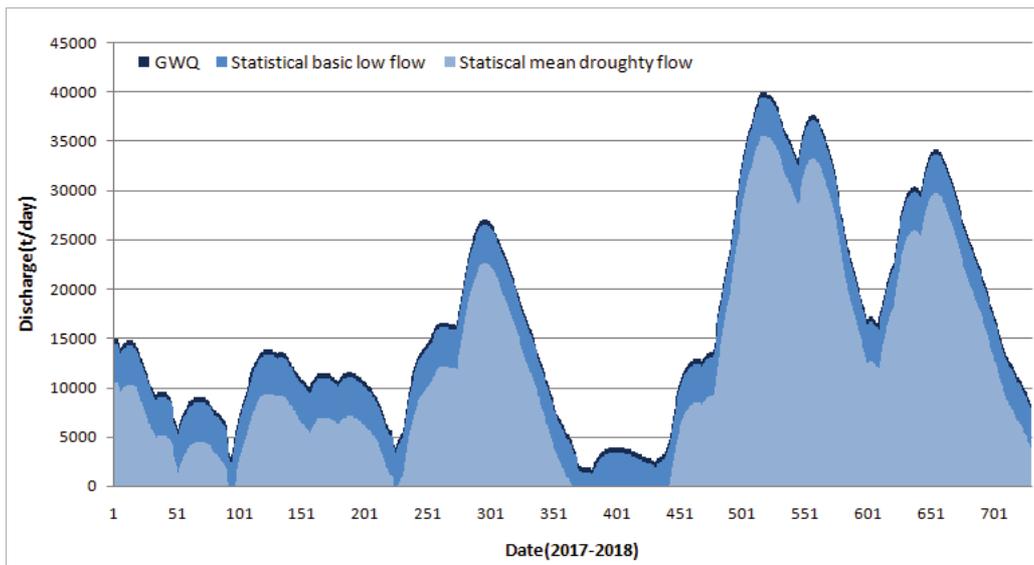


Fig. VI-3. Amount available for agricultural water

VII. 결론

제주도 남부에 위치한 상시하천 및 용천수에 대하여 2012년부터 2019년까지 현장관측을 실시하여 유출량을 측정하고 농업용 지하수의 대체수자원으로 확보가 가능한 상시하천 및 용천수 용출 지점을 선정하였다. 지표수를 이용한 농업용수를 안정적으로 확보하기 위하여 시범 하천인 악근천 유역을 대해 SWAT 모델에 의한 장기유출 모의, 지하수 함양량 산정하고 미래 기후변화 시나리오를 적용하여 미래 하천유출량을 분석하였다. 또한, 산정된 지하수 함양량을 GMS-MODFLOW 모형에 적용하여 해당 유역의 지하수 유동특성을 규명하고, 강우-유출-지하수위 간의 상관관계 분석을 통하여 농업용 지하수의 대체 수자원으로 활용 가능한 유출량 및 하천 유지용수량을 산정한 결과는 다음과 같다.

1) 농업용수로 활용 가능한 상시하천 및 용천수의 선정 및 유출량을 산정하기 위하여 2017년 6월부터 2017년 10월 까지 하천유량 및 수질을 관측한 결과에 의해 유출량(2000~3000 m^3/day 기준) 및 농업용수 14개 항목의 수질 기준을 충족하는 유출량 및 지점은 기저유출이 발생하고 있는 지방하천인 악근천과 소하천인 속골물, 조이통물, 평망물, 선곶내물, 대왕수로서 총 6개 지점이었다.

2) 제주도 중서귀 유역에 위치한 악근천을 대상으로 2004년부터 2018년까지 현장관측 결과와 SWAT모형을 활용한 장기 유출에 대한 모의를 실시한 결과 연평균 총 지표 유출량은 6.9~31.4%(평균 21.2%), 기저유출량은 17.3~23.2%(평균 20.0%)로 분석되었다. 특히 여름 가뭄이 심했던 2013년과 2017년 여름(6월~8월)의 지표 유출율은 15년 평균 유출율에 비해 85.9 (%), 48.7(%) 감소한 것으로 나타났으며, 기저 유출율은 56.4 (%), 64.9 (%) 감소한 것으로 분석되었다.

3) 악근천 유역의 유출수를 농업용 지하수의 대체수자원으로 활용하기 위하여 기후변화 시나리오 RCP8.5를 이용하여 SWAT 모형에 적용·모의하여 미래 중·장기적 유출량을 산정·분석한 결과 악근천 유역의 지표 유출량은 지속적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 여름철과 가을철의 지표유출량의 빈도는 지속적으로 증가하고 있다.

4) 악근천 유역에 위치하는 JD-YH 관측정을 대상으로 지하수위 변동특성을 분석한 결과 정상류 상태의 수위는 31.52m 로 분석되었다. 정상류 상태에서 지하수 함양율의 변동 적용시 -30% 일 때 지하수위는 25.13m 로 1단계 기준수위에 도달하였으며, -40%일 때 지하수위는 23.07m 로 2단계 기준수위에 근접, -50%일 때 지하수위는 20.83m이며 3단계 기준수위를 초과할 것으로 분석되었다.

5) 농업용 지하수의 대체 수자원으로 활용한 가능한 하천수의 안정적인 공급량을 검토하기 위하여 하천유지용수를 산정하였다. 최근 10년간 평균 갈수량 및 기준 갈수량 산정을 위하여 장기 유출모의를 실시한 결과 연도별 갈수량은 악근천 유역의 기저 유출 성분의 평균 갈수량은 $0.051 (m^3/s)$, 기준갈수량은 $0.006 (m^3/s)$ 로 산정되었으며, 제주도의 수문특성을 고려하여 기준갈수량 $0.006 (m^3/s)$ 을 하천유지용수로 결정하고 평균 갈수량은 보조지표로 활용하는 것이 부합할 것으로 판단되었다.

6) 기저유출 성분으로 대부분의 하천 흐름을 형성하는 악근천 유역의 하천유지용수는 $0.0006 (m^3/s)$ 으로 SWAT 모의에 의한 장기유출량 산정 결과에 적용 시 모의 기간 내 년 중 하천수 이용이 가능한 것으로 확인되었다.

제주도의 농업형태는 지하수에 전적으로 의존하는 밭작물에 의해 이루어지고 있어 농업용수의 대체수자원으로서 지표수의 적극적인 이용과 사회적인 관심이 어느 때 보다 고조되고 있어 이에 대한 해결방안과 검토가 매우 필요한 시점이다. 따라서 농업용수로 활용 가능한 하천수를 선정하고, 대표유역의 물수지 분석 및 하천유지용수 등을 산정하는 조사·연구는 매우 시의성이 있는 지역적인 현안이다.

이러한 연구는 농업용수의 지하수 의존도가 약 96%로서 미래 기후변화 및 농업형태의 변화에 따라 증가하는 농업용수 수요량의 일부를 대체 할 수 있음은 물론 지하수의 과도한 개발·이용으로 인한 지하수 함양량 감소 등 용수문제에 대한 사전 대비책으로 활용될 것이다. 그러나 한정된 기간과 일부 관측기간의 결측 및 제한된 모의 분석에는 많은 과제가 있을 수밖에 없다. 향후 상시하천에 대한 정기적·지속적인 현장관측과 실측자료의 확보 등의 연구·조사는 반드시 수행되어야만 제주도의 현안과제이다.

참고문헌

- 강형식, 현운정, 전상묵, 2015, 지하수 의존도에 따른 수생태계 관리를 위한 기저유출지표 개발 및 활용방안 연구, 한국환경정책평가연구원, Vol. 2015 No.-[2015]
- 최광준, 송성호, 김진성, 임찬우, 2013, 제주도 권역별 농업용수 수요량 산정에 대한 고찰, 한국환경과학회지, Vol. 22 No.5 [2013], P.639-649
- 안소라, 박근애, 김성준, 2013, SWAT과 MODSIM-DSS 모형을 연계한 금강유역의 농업용수 공급능력 평가, Vol.33 No.2 [2013] P.507-519
- 이문환, 배덕효, 2016, 기후변화에 따른 저유량 전망 및 불확실성 분석, 한국기후변화학회지, Vol. 7. No. 4 [2016], p.407-419
- 김철겸, 김남원, 2017, 순물소모량 개념에 의한 제주도 농업용수 수요량 산정 및 평가, 한국수자원학회지, Vol. 50, No. 7(2017), pp.503-511
- 정석제, 2018, SWMM 모형을 활용한 최적의 저수지 농업용수 공급 방법 분석, 한국산업기술대학교, 산업기술경영대학원, 석사학위논문, P.36-44
- 강명수, 양성기, 정우열, 김동수, 2013, 제주도 남부지역의 유출 특성, 한국환경과학회지, Vol. 22 No. 5[2013], p.591-597
- 최정현, 2008, 지하수 양수량 변화에 따른 자유지하수위 거동에 대한 연구, 수원대학교 대학원 석사학위 논문
- 최진혁, 2015, MODFLOW를 이용한 지하수 유출량 및 오염확산 비교 평가, 서울시립대학교 도시학과대학원, 석사학위논문
- 안중기, 정차연, 박현주, 김태호, 2007, 제주도 서귀포지역 용천수의 기원 대수층 및 용출 유형, 한국지형학회지, 제 14권 제3호, P.27-35
- 박상운, 1996, 제주도 용천수의 수량변화와 수리화학적 연구, 제주대학교, 대학원, 석사학위논문, P. 1-115
- 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, 제주대학교, 대학원, 석사학위논문, P. 7~42, 52
- 김남원, 정일문, 유상연, 이정우, 양성기, 2009, 제주 지역 지표수-지하수 연계 해석, 한국환경과학회지 18(9), 1017-1026.

- 김남원, 정일문, 나한나, 2013, 제주 천미천 유역의 간헐하천 유출특성 모의 방안, 한국환경과학회지, 22(5), pp. 523-531.
- 정수일, 2003, MODFLOW 모형을 이용한 지표수와 지하수사이의 유동에 관한 연구, 경일대학교, 대학원, 석사학위 논문
- 문덕철, 양성기, 고기원, 박원배, 2005, 제주도 주요하천의 기저유출량 산정에 관한 연구, 한국환경과학회지, 14(4). 405-412.
- 이영준, 류시완, 2010, 남강댐유역 일유출량 자료를 이용한 SWAT모형의 민감도 분석, 2010 대한토목학회 학술대회 학술저널, Vol.2010 No.10 [2010], P.1845~1848
- 허 준, 이도훈, 이희철, 2003, 준 분포형 장기 강우-유출 모형의 민감도 분석, 대한토목학회 학술대회 학술저널, Vol.2003 No. 10 [2003], P. 2236~2241
- 윤문상, 2011, SWAT 모형의 섬강시험유역에 적용을 통한 매개변수 민감도 분석, 석사학위 논문(상지대학교 대학원, 토목공학과), P. 45~51
- 김제형, 2008, 장기유출해석을 위한 SWAT 모형 적용에 관한 연구 : 관교신도시유역을 중심으로, 한양대학교, 공학대학원, 석사학위논문, P. 83~89
- 박원배, 2010, 제주 물 용천수의 효율적인 관리·보전 방안모색, 2010 Jeju development forum, P. 83-90
- 박윤식 외 9명, 2007, 임하댐 유역의 유사 거동 모의를 위한 SWAT 모델의 적용성 평가, 수질보전 한국물환경학회지, Vol.23 No.4 [2007], P. 467~473
- 한국농촌경제연구원, 2017, 농업용수 수요 특성과 물부족 대응 방안
- 제주특별자치도, 2018, 수자원관리 종합계획
- 제주도개발특별자치도 설치 및 국제자유도시 조성을 위한 특별법, 1993,
- 제주특별자치도, 2013. 수자원관리 종합계획
- 국토해양부, 2009, 하천유지유량 산정요령
- 한국농촌경제연구원, 2010, 농촌용수의 효율적 이용 및 관리방안
- 국토해양부, 2011, 확률강우량도 개선 및 보안 연구 연구조사보고서
- 한국건설연구원, 1996, 항구적 가뭄대책을 위한 수자원 확보 및 이용방안 연구
- 국토해양부, 2009, 자연 사회환경개선을 고려한 권역별 하천유지유량 평가, 산정 및 확보방안(금강권역)
- 제주발전연구원, 2009. 제주지역 용수수요 전망과 수자원 보전·관리계획에 관한 연구, P. 95-141
- 제주발전연구원, 2006, 제주도의 지역별 농업용수 개발·이용방안
- 제주발전연구원, 2010, 하천유출수 활용방안 마련을 위한 수문 및 수질특성 기초연구, P. 13-42

- 양성기, 2007, 지구의 수권과학, 구미서관
- 윤용남, 1998, 농업수문학, 청문각
- 정종호, 윤용남, 2008, 수자원설계실무, 구미서관
- 양성기, 정우열, 2011, 수자원모델링, 제주물산업인재양성센터
- 제주도·한국수자원공사(2003), 「제주도수문지질및지하수자원종합조사3」
- 제주특별자치도, 2007, 「제주특별자치도설치및국제자유도시조성을위한특별법령집」
- 제주도, 1999, 제주의 물, 용천수
- Arnold, J.G., 1992, Spatial scale variability in model development and parameterization, Ph.D. thesis, Purdue University.
- Abbott, M., J. C. Bathurst, et al., 1986, “An Introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE"; 1. History and philosophy of a physically based distributed modelling system”, Journal of Hydrology Vol. 87, pp. 45-59.
- Brown, R. M., 1986, Hydrology of tritium in the Ottawa vally, Geochimica et Cosmochimica Acta, 21, 199-216
- Bedient, P. B. and W. C. Huber, 2002, Hydrology and Flood plain Analysis. New York, Addison Wesley.
- Benavides, J. A., 2005, Advanced methods for improving the lead-time and accuracy of a flood alert system in an urban watershed, Ph.D thesis, Rice University.
- Creutin JD, Muste M and Li Z, 2002, Traceless Quantitative Alternatives for Measurements in Natural Streams, Proceedings Hydraulic Measurements & Experimental Methods, ASCE-IAHR Joint Conference, EstesPark, CO (CD-ROM).
- Cho, B., 2001, Hydrogeological characteristics of the groundwater resources in the Busan area, Korea. Ph. D. Thesis, Kyungpook National University, pp. 36
- Colosimo, C. and G. Mendicino, 1996, GIS for Distributed Rainfall-Runoff Modeling. Geographical Information Systems in Hydrology. V. P. Singh and M. Fiorentio. Dordrecht. Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- Davis, G. H., Lee, C. K., Bradley, E. and Payne, B. R., 1970, Geohydrologic interpretation of a valcanic island from environmental istopes, Water Resour. Res., 6, pp 99-109
- Dunn, S. M. and Lilly, 2001, “Investigating the Relationship Between Soils Classification and the Spatial Parameters of a Conceptual Catchment-Scale Hydrological Model”, Journal of Hydrology 252, pp. 157-173.

- Dreher, J., and Gunathilaka, A., 1996, Groundwater management in the city of Vienna. Modeling testing & monitoring for hydropower plants-II, Int. Journal of Hydropower & Dams, 2, 545-554
- Dingman, S. L., 1994 Physical Hydrology., Prentice hall, Upper saddle river, N.J., pp. 575
- Freeze, R. A., and Witherspoon, P. A., 1967, Theoretical analysis of regional groundwater flow. 2. Effect of water-table configuration and sub-surface permeability variation, Water Resour. Res. v. 3. no, 2, pp.623-634
- Grayson, R. B., I. D. Moore, et al., 1992, "Physically based Hydrologic Modeling. 2. Is the Concept Relistic?", Water Resources Reserach 26(10), pp. 2659-2666.
- Gong. H. L., Li. M. L., 2000, Management of groundwater in Zhengzhou city, China., Water Research., 34(1), 57-62
- Gupta, S. K., and Tanji K. K., 1976, A three-dimensional galerkin finite element solution of flow through multiaquifers in sutter basin, california Water Resour. Res., 12, 152-162
- Hubbert, M.K., 1940, The theory of groundwater motion, Journal of Geology., 48, 785-944
- Harvey, F. E., Sibray, S. S., 2001, Delineating groundwater recharge from leaking irrigation canals using water chemistry and isotopes., Journal of Ground Water., 39(3), 408-421
- King Hubbert M., 1940, Theory of Ground-water Motion, The journal of Geology, 48(8), pp.785-944
- Lee, L., S., Julien, P.Y., 2006, Electromagnetic Wave Surface Velocimetry, Journal of Hydraulic Engineering, 132(2), pp. 146-153.
- Muste, M., Gonzalez-Castro, J. A., Yu, K., Kim, D., 2007, Accuracy of ADCP discharge measurements for rating of flow-control structures, IIHR report, IIHR-Hydrosience & Engineering, The University of Iowa, Iowa City, IA.
- Muzik, I., 1996, Lumped Modeling and GIS in Flood Prediction. Geographical Information Systems in Hydrology. V. P. Singh and M. Fiorentio. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- Muste, M., Vermeyen, T., Hotchkiss, R. and Oberg, K. (2007). Acoustic Velocimetry for Riverine Environments," Journalof Hydraulic Engineering, 115, 925-936.
- Narasimhan, T. N. and Witherspoon, P. A., 1976, An integrated finite difference method for analyzing fluid flow in porous media, Water Resour. Res., 12, 152-162
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2001, Soil and water assessment

tool user's manual(Ver 2000)

Olivera, F. and Maidment, 1999, "Geographic Information systems (GIS)-based spatially distributed model for runoff routing", *Water Resources Research* 35(4), pp. 1155-1164.