



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 중서귀유역의 관측자료 기반
지표수-지하수 유동특성 해석

濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

高在旭

2016年 8月

제주도 중서귀유역의 관측자료 기반 지표수-지하수 유동특성 해석






指導教授 楊 城 基

高 在 旭

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함

2016年 8月

高在旭의 工學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長	김 상 진	
委 員	김 남 형	
委 員	박 원 배	
委 員	이 병 환	
委 員	양 성 기	

濟州大學校 大學院

2016年 8月

Groundwater flow analysis of Middle-Seogwi
watershed area based on monitored filed data

Jae-Wook Ko
(Supervised by professor Sung-Kee Yang)

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

2015. 8.

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, Sang-Jin Kim , Prof. of Civil engineering

Thesis director, Nam-Hyeong Kim , Prof. of Civil engineering

Thesis director, Won-Bae Park , Prof. of Civil engineering

Thesis director, Byeong-Cheol Lee , Prof. of Civil engineering

Thesis director, Sung-Kee Yang , Prof. of Civil engineering

August. 2016

DEPARTMENT OF CIVIL & OCEAN ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

目 次

目 次	i
LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	vii
Summary	x
I. 서 론	1
1. 연구 배경 및 목적	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	2
2. 국내외 연구 동향	3
2.1 국외 연구동향	3
2.2 국내 연구동향	4
3. 연구 자료 및 방법	7
II. 이론적 배경	9
1. 지하수 함양량 추정 이론	9
1.1 SWAT 모형의 개요	9
1.2 SWAT 모형의 구조	12
1.3 SWAT 모형의 수문순환 및 추정모형	15
2. 지하수 유동해석 모형	40
2.1 MODFLOW 모형의 개요	40
2.2 MODFLOW 모형의 방정식	41
III. 연구대상 유역 및 현장 관측자료 분석	43
1. 연구대상 유역	43
1.1 유역 형상 및 지형적 특성	44
1.2 유역 표고 및 경사 분석	45
2. 현장 관측자료 분석	51
2.1 하천유출량 분석	51

2.2 지하수 관측자료 분석	58
3. 중서귀 지역의 지하수 관정현황	60
IV. 지표수-지하수 유동해석 결과 및 고찰	64
1. 지하수함양량 추정	64
1.1 SWAT 모형 입력자료 구축 및 적용	64
1.2 모형의 보정 및 검증	98
1.3 지하수 함양량 추정 결과 및 고찰	121
2. 지하수 유동해석	128
2.1 모형의 구축	128
2.2 정상류 상태에 따른 지하수 유동해석	136
2.3 지하수 함양량에 따른 지하수 유동특성	141
2.4 부정류 상태에 따른 지하수 유동해석 및 고찰	145
2.5 지속양수에 따른 지하수위 변동 특성	152
V. 결 론	159
참고문헌	161

List of Figures

Fig. 1.1 Flow chart on the study	8
Fig. 2.1 Schematic representation of the hydrologic cycle (SWAT manual, 2001)	12
Fig. 2.2 HRU/Subbasin command loop (SWAT manual, 2001, Jung, 2008)	13
Fig. 2.3 Tracing process of SWAT model about the river (Arnold, 2000)	14
Fig. 2.4 Four-year averaged ambient and subsurface temperatures (5cm and 300cm in depths)	18
Fig. 2.5 In case of 50% coverage, dimension-decreasing curve according to the change of SNO_{100}	21
Fig. 2.6 Approximate path of water particle in SWAT model	22
Fig. 2.7 Difference of the actual infiltration and the infiltrating aspect of Green & Ampt formula (Arnold, 2000)	27
Fig. 2.8 Perfect inclined plane of concep (Arnold, 2000)	33
Fig. 2.9 Movement of number field in the dynamic undercurrent model (Arnold, 2000)	34
Fig. 2.10 Oppressed/not-oppressed Aquifer (Dingmam 1994)	35
Fig. 2.11 Nitrogen transition process in SWAT	38
Fig. 2.12 Phosphorus transition process in SWAT	38
Fig. 2.13 Virtual number stairs model	42
Fig. 3.1 Map of Basin for this study (Mid-Seogwi watershed of Jeju Island)	44
Fig. 3.2 The altitude and slope of Gangjung-stream watershed	46
Fig. 3.3 The altitude and slope of Akgeun-stream watershed	47
Fig. 3.4 The altitude and slope of Yeonoei-stream watershed	49
Fig. 3.5 The altitude and slope of Donghong-stream watershed	50
Fig. 3.6 ADCP operating approaches: a) fixed deployment; b) moving boat; c) cross-sectional area directly measured or unmeasured by ADCP (Kim, 2011)	52
Fig. 3.7 Site application photo of ADCP for discharge observation	53
Fig. 3.8 The configuration of velocity observation equipment ADC: a) velocity and water level etc, monitor equioment; b) ADC sensor	54
Fig. 3.9 Observation point of the Gangjung-stream: a), b) application point of the ADCP; c) photos of the field application; d) result of the ADCP	55
Fig. 3.10 Observation point of the Akgeun-stream: a), b) application point of the ADCP; c) photos of the field application; d) result of the ADCP	55
Fig. 3.11 Observation point of the Yeonoei-stream: a), b) application point of the	

ADCP; c) photos of the field application; d) result of the ADCP·····	56
Fig. 3.12 Observation point of the Donghong-stream: a), b) application point of the ADCP; c) photos of the field application; d) result of the ADCP·····	57
Fig. 3.13 Rainfall and discharge observations of stream·····	58
Fig. 3.14 The position of the groundwater level observation well(a), and The results of groundwater level observation analysis(b)·····	59
Fig. 3.15 Variation characteristics of long-term groundwater level (JD-SH)·····	60
Fig. 3.16 Variation characteristics of long-term groundwater level (JM-YH)·····	60
Fig. 3.17 The distribution of groundwater wells in Mid-Seogwi·····	61
Fig. 3.18 The daily amount of groundwater pumped by wells in Mid-Seogwi·····	62
Fig. 3.19 The usage of groundwater in Mid-Seogwi·····	63
Fig. 4.1 The Location of meteorological observatories and AWS·····	65
Fig. 4.2 Annual rainfall data at six observation points (2003-2015)·····	68
Fig. 4.3 Monthly rainfall data at six observation points (2003)·····	69
Fig. 4.4 Monthly rainfall data at six observation points (2004)·····	70
Fig. 4.5 Monthly rainfall data at six observation points (2005)·····	71
Fig. 4.6 Monthly rainfall data at six observation points (2006)·····	72
Fig. 4.7 Monthly rainfall data at six observation points (2007)·····	73
Fig. 4.8 Monthly rainfall data at six observation points (2008)·····	74
Fig. 4.9 Monthly rainfall data at six observation points (2009)·····	75
Fig. 4.10 Monthly rainfall data at six observation points (2010)·····	76
Fig. 4.11 Monthly rainfall data at six observation points (2011)·····	77
Fig. 4.12 Monthly rainfall data at six observation points (2012)·····	78
Fig. 4.13 Monthly rainfall data at six observation points (2013)·····	79
Fig. 4.14 Monthly rainfall data at six observation points (2014)·····	80
Fig. 4.15 Monthly rainfall data at six observation points (2015)·····	81
Fig. 4.16 Monthly average rainfall at observation points (2003~2015)·····	82
Fig. 4.17 Maximum, minimum and average temperature day-data (2003~2015)·····	83
Fig. 4.18 Maximum, minimum and average temperature day-data (1973~1979)·····	84
Fig. 4.19 Monthly average temperature data (2003~2015) ·····	85
Fig. 4.20 Daily solar radiation data(2003~2015)·····	86
Fig. 4.21 Annual average solar radiation data(2003~2015)·····	87
Fig. 4.22 Monthly average solar radiation data(2003~2015)·····	87

Fig. 4.23 Daily average wind speed day-data(2003~2015).....	88
Fig. 4.24 Annual average wind-speed data(2003~2015).....	89
Fig. 4.25 Monthly average wind-speed data(2003~2015).....	89
Fig. 4.26 Daily average humidity data(2003~2015).....	90
Fig. 4.27 Annual average humidity data(2003~2015).....	91
Fig. 4.28 Monthly average humidity data(2003~2015).....	91
Fig. 4.29 Digital Elevation Model (DEM) data of Jeju-Island for research.....	93
Fig. 4.30 Landuse map (land-cover map) of the studied basin.....	95
Fig. 4.31 Soil type map of the studied basin.....	96
Fig. 4.32 Sub-basin of Mid-Seogwi watershed of Jeju Island.....	100
Fig. 4.33 Outflow-rate change of Gangjung-basin by changing parameters.....	101
Fig. 4.34 Recharge-rate change of Gangjung-basin by changing parameters.....	102
Fig. 4.35 Outflow-rate change of Akgeon-basin by changing parameters.....	103
Fig. 4.36 Recharge-rate change of Akgeon-basin by changing parameters.....	104
Fig. 4.37 Outflow-rate change of Yeoneoi-basin by changing parameters.....	105
Fig. 4.38 Recharge-rate change of Yeoneoi-basin by changing parameters.....	106
Fig. 4.39 Outflow-rate change of Donghong-basin by changing parameters.....	107
Fig. 4.40 Recharge-rate change of Donghong-basin by changing parameters.....	108
Fig. 4.41 Outflow-rate change of A-basin by changing parameters.....	109
Fig. 4.42 Recharge-rate change of A-basin by changing parameters.....	110
Fig. 4.43 Outflow-rate change of B-basin by changing parameters.....	111
Fig. 4.44 Recharge-rate change of B-basin by changing parameters.....	112
Fig. 4.45 Outflow-rate change of C-basin by changing parameters.....	113
Fig. 4.46 Recharge-rate change of C-basin by changing parameters.....	114
Fig. 4.47 The range of Outflow-rate change by Parameters in SWAT model.....	116
Fig. 4.48 The range of Recharge-rate change by Parameters in SWAT model	116
Fig. 4.49 Runoff simulation result of Gangjung stream basin.....	117
Fig. 4.50 Runoff simulation result of Akgeon stream.....	118
Fig. 4.51 Runoff simulation result of Yeoneoi stream.....	119
Fig. 4.52 Runoff simulation result of Donghomg stream.....	120
Fig. 4.53 Result of calibration; a)Gangjung; b)Akgeon; c)Yoenoei; d)Donghong.....	121
Fig. 4.54 Recharge area of the studied basin.....	122
Fig. 4.55 Recharge of sub-basin(2012~2015 yaers).....	127

Fig. 4.54 The position of the groundwater level observation well	129
Fig. 4.55 Coverage of configuration	130
Fig. 4.56 Seogwipo-Formation(SGF) layer depth(제주문화 제11호, 2005)	131
Fig. 4.57 Layer cross-sections	132
Fig. 4.58 Grid network configuration	133
Fig. 4.59 Elevation analysis of layers	134
Fig. 4.60 3D GRID (Oblique View)	135
Fig. 4.61 3D GRID (Side View)	135
Fig. 4.62 Pilot point for hydraulic conductivity	137
Fig. 4.63 Groundwater table contour map under steady state	138
Fig. 4.64 Computed vs. Observed Values	139
Fig. 4.65 Hydraulic conductivity contour lines in Mid-Seogwi	140
Fig. 4.66 On distribution diagram of an equal number of steady flow state	143
Fig. 4.67 Water level change due to recharge change	144
Fig. 4.68 Groundwater level changes in unsteady state	148
Fig. 4.69 Groundwater level changes in unsteady state	151
Fig. 4.70 Comparison of the observed data and calculated water level (JD-SH)	152
Fig. 4.71 Comparison of the observed data and calculated water level (JM-YH)	152
Fig. 4.72 Wells data input groundwater model in Mid-Seogwi	153
Fig. 4.73 Water level drop amount of full-term 10 days	154
Fig. 4.74 Water level drop amount of full-term 30 days	155
Fig. 4.75 Water level drop amount of full-term 50 days	157
Fig. 4.76 Daily groundwater level variation graph (JM-YH)	158

List of Tables

Table 2.1 The main hydrological cycle simulation method of SWAT	10
Table 2.2 Method of weather generator	20
Table 2.3 Classification of soil group in SCS runoff curve method	25
Table 2.4 Runoff curve index of natural region, CN (AMC-II, $I_a = 0.2S$)	25
Table 2.5 Input data according to PET calculating method	29
Table 3.1 Geological features of the studied basin	45
Table 3.2 The altitude analysis result of Gangjung-stream watershed	46
Table 3.3 The slope analysis result of Gangjung-stream watershed	46
Table 3.4 The altitude analysis result of Akgeun-stream watershed	47
Table 3.5 The slope analysis result of Akgeun-stream watershed	48
Table 3.6 The altitude analysis result of Yeonoei-stream watershed	49
Table 3.7 The slope analysis result of Yeonoei-stream watershed	49
Table 3.8 The altitude analysis result of Donghong-stream watershed	50
Table 3.9 The slope analysis result of Donghong-stream watershed	51
Table 3.10 Coordinates of monitoring groundwater wells	59
Table 3.11 The daily amount of groundwater pumped by wells in Mid-Seogwi	62
Table 3.12 The usage of groundwater in Mid-Seogwi	63
Table 4.1 Weather and GIS data for SWAT model	64
Table 4.2 Locations of meteorological posts of the studiedbasins	65
Table 4.3 Applied date and input data form	66
Table 4.4 Annual rainfall data at six observation points (2003-2015)	68
Table 4.5 Monthly rainfall data at six observation points (2003)	69
Table 4.6 Monthly rainfall data at six observation points (2004)	70
Table 4.7 Monthly rainfall data at six observation points (2005)	71
Table 4.8 Monthly rainfall data at six observation points (2006)	72
Table 4.9 Monthly rainfall data at six observation points (2007)	73
Table 4.10 Monthly rainfall data at six observation points (2008)	74
Table 4.11 Monthly rainfall data at six observation points (2009)	75
Table 4.12 Monthly rainfall data at six observation points (2010)	76
Table 4.13 Monthly rainfall data at six observation points (2011)	77
Table 4.14 Monthly rainfall data at six observation points (2012)	78

Table 4.15 Monthly rainfall data at six observation points (2013).....	79
Table 4.16 Monthly rainfall data at six observation points (2014).....	80
Table 4.17 Monthly rainfall data at six observation points (2015).....	81
Table 4.18 Monthly average rainfall data at six observation points (2003~2015).....	82
Table 4.19 Annual average temperature data.....	84
Table 4.20 Monthly average temperature data (2003~2015).....	85
Table 4.21 Solar radiation data between 2003 and 2015(Monthly and yearly).....	87
Table 4.22 Wind-speed data (between 2003 and 2015(Monthly and yearly).....	90
Table 4.23 Codes on entries of landuse map.....	94
Table 4.24 Ground coverage state at the studied basin.....	95
Table 4.25 Hydrologic soil groups in the studied watershed.....	96
Table 4.26 Parameters in SWAT model (Jung, 2008).....	98
Table 4.27 The value of the hydrological parameters used in the analysis	99
Table 4.28 The changes of outflow and recharge-rates by changing parameters; ① Gangjung-basin•	102
Table 4.29 The changes of outflow and recharge-rates by changing parameters; ② Akgeon-basin•••	104
Table 4.30 The changes of outflow and recharge-rates by changing parameters; ③ Yeonoei-basin••	106
Table 4.31 The changes of outflow and recharge-rates by changing parameters; ④ Donghong-basin	108
Table 4.32 The changes of outflow and recharge-rates by changing parameters; ⑤ A-basin•	110
Table 4.33 The changes of outflow and recharge-rates by changing parameters; ⑥ B-basin	112
Table 4.34 The changes of outflow and recharge-rates by changing parameters; ⑦ C-basin	114
Table 4.35 Calibrated parameters of Gangjung-basin.....	117
Table 4.36 Calibrated parameters of Akgeon-basin.....	119
Table 4.37 Calibrated parameters of Yeonoei-basin.....	119
Table 4.38 Calibrated parameters of Donghong-basin.....	120
Table 4.39 Monthly recharge rates of sub-basins (2012~2015) Unit : (mm/day).....	123
Table 4.40 Groundwater monitoring wells in the observation coverage.....	129
Table 4.41 Grid network configuration.....	132
Table 4.42 Comparison of observed water levels and calculated water level.....	139
Table 4.43 The value of the modeling of the argument.....	141
Table 4.44 Changes in groundwater level due to recharge increase.....	143
Table 4.45 Changes in groundwater level due to recharge decrease.	144
Table 4.46 Groundwater level changes in unsteady state.....	148
Table 4.47 Water level drop amount of full-term 10 days.....	154

Table 4.48 Water level drop amount of full-term 30 days.....	155
Table 4.48 Water level drop amount of full-term 50 days.....	157

Summary

This study estimated the groundwater recharge rates with the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) based on stream discharge of four sub-basins located at Mid-Seogwi area. Calibrating hydrologic parameters of SWAT using the collected data, the groundwater recharge rate of each subbasin was estimated. The groundwater flow of the area was simulated using GMS-MODFLOW with the estimated groundwater recharge rates. Groundwater level fluctuation due to long-term pumping from existing groundwater wells in the area was analyzed by assuming no-groundwater recharge conditions. The sensitivity analysis of SWAT model in Mid-Seogwi watershed showed that groundwater recharge and discharge were changed sensitively by SLOPE, SLSUBBSN, SOL_AWC, and CN_2. The changes of the discharge and recharge rates ranged from -7% to 12% and from -46 to 78%, respectively. As the results of regression analysis between the measured data and the simulated data, the coefficient of determination (R^2) of Gangjung, Akgun, Yenwei, and Donghong was, 0.88, 0.93, 0.83, and 0.81, respectively. SWAT model results indicated that groundwater recharge rate increased during raining season, but decrease in dry season. During the dry season in 2013, the recharge rate reduced more than 20% compared to the annual average recharge rate. As the results of groundwater flow analysis in steady state, the hydraulic gradient of the upstream area changed corresponding to its geographic elevation change. Also, the groundwater recharge of the downstream area headed toward the ocean from the left basin area. The calibrated hydraulic conductivity ranged from 0.17 m/d to 1,951.0 m/d. Continuous pumping at 477 wells in Mid-Seogwi basin for 50 days resulted in a large groundwater level reduction in the upsteam and midstream areas. The initial level of groundwater was calculated as 48 m by the simulation. The level reached to the first warning level (29.97 m) after continuous 69 days pumping.

I. 서론

1. 연구 배경 및 목적

1.1 연구 배경

최근 이상기온 현상은 21세기 최고의 키워드로 떠오르면서 전 세계적인 문제로 인식되고 있다. 경제협력개발기구(OECD; Organization for Economic Cooperation and Development)의 『2030 환경전망 보고서』에 의하면 온실가스 배출량이 현재와 같은 상태로 유지될 경우 전 세계적으로 2030년 까지 37%, 2050년까지는 52% 온실가스 배출량이 증가될 것으로 예측하고 있다. 따라서 전 지구적으로 물 부족현상이 발생하여 인류의 생존문제에 심각한 영향을 미칠 것으로 전망하고 있다. 또한 강우의 빈도, 세기 및 분포가 달라짐에 따라 돌발 홍수량의 증가로 인한 수해피해도 세계 곳곳에서 발생할 것으로 보고 있다. 기후변화가 수자원에 미치는 영향은 지구상의 생명체 생존과 깊은 관계가 있어 수자원의 확보와 관리는 매우 중요하다.

제주도는 해양성기후의 영향으로 인해 연평균 강수량이 2,061mm로 국내 최다우 지역이지만 투수성이 우수한 지질특성의 영향으로 전체 143개 하천 중 9개소의 상시하천을 제외한 대부분의 하천은 평상시 물이 흐르지 않는 건천의 형태를 유지하고 있다(Jung과 Yang, 2009). 제주도는 화산도라는 지질특성으로 인해 지표수 개발과 이용은 매우 부족한 편이었다. 1960년대 말부터 지하수자원의 개발에 관심을 기울이기 시작하여(Byun, 1999), 1970년대에는 용천수를 활용한 상수원 개발과 지하수 개발을 시행하여 오늘에 이르고 있다. 이시기에 강정천과 외도천을 중심으로 지표수를 활용하여 상수원을 개발하게 되었다. 그러나 중산간지역에 거주하는 주민들의 생활용수 및 농업용수 확보문제가 대두되면서 용수개발을 위한 근본적인 대책으로 지하수 개발을 본격적으로 추진하였다(Ko, 2005).

현재 제주도의 지하수 이용량은 전체 수자원의 83.9% 이상을 차지하고 있어 지하수의 보존 및 관리문제는 매우 중요하다(제주 상수도 50년, 2012). 이러한 현안문제

를 해결하기 위해서는 지하수 해석모형을 이용한 지하수 수리특성 및 유동해석 등의 연구조사와 모델링기법의 개발이 필요하다. 지하수 해석모형은 실제의 지하수 유동을 재현하기 위한 수치해석 방법 중의 하나로, 이는 가능한 현장관측 자료를 기반으로 검보정 및 해석을 수행하여야 한다. 그러나 이러한 자료의 획득은 현실적으로 매우 어려운 실정이다. 특히 지하수위 관측자료는 미래의 용수수요를 보다 정확하게 예측하는데 필수적이며, 장기간의 수문관측 자료의 확보는 지하수함양과 치수적인 측면에서도 필요하다.

제주도의 생명수인 지하수를 주요 수자원으로 적절히 이용하고 보전관리하기 위해서는 지표수와 연계한 지하수 유동특성의 해석과 수리현상을 이해하는 과정은 매우 중요하다.

1.2 연구 목적

제주도 남부 중앙부에 위치한 중서귀 유역은 남부 지역에서 인구밀도가 가장 높은 지역이다. 이 유역은 도내 9개 상시하천 중 중하류부에서 용출하는 4개의 상시하천이 위치하고 있어 지표수가 가장 풍부하다. 따라서 이들 하천을 중심으로 한 이수 및 치수적인 면에서 수문학적인 연구조사와 최신 기법을 적용한 지하수 유동특성을 해명하는 연구는 매우 중요한 의미를 가진다.

본 연구에서는 2011년 7월부터 2014년 12월까지 제주도 중서귀유역의 강정천과 악근천, 연외천, 동홍천을 대상으로 최신 유량관측기기인 ADCP와 ADC의 현장 관측 자료를 구축하고, 이들 자료를 이용하여 SWAT 모델의 매개변수를 보정하여 하천 유출에 따른 소유역별 함양량을 산출하였다. 이같이 산정된 소유역별 함양량을 지하수 해석모형인 GMS-MODFLOW에 입력하여 제주도 중서귀유역의 지하수 유동특성을 규명하였다. 또한 중서귀유역의 무함양 상태를 가정하여 기존 관정들의 장기양수에 따른 수위의 변화특성을 비교·분석하였다.

연구 대상유역의 수문학적 수치해석을 위해 수행한 SWAT 모델과 GMS-MODFLOW 모델은 대상 유역을 소유역으로 분할하여 해석함으로써 기존의 단일 유역해석방법보다 지하수 유동특성을 보다 세밀하게 해석하였다. 이러한 연구는 향후 제주도의 수자원 개발 및 이용과 정책수립 등에 유용한 기초자료로 이용될 수 있으며, 기후변화에 대비한 수자원 예측과 모델링의 기초자료로 사용될 수 있다.

2. 국내외 연구 동향

2.1 국외 연구동향

지하수를 효과적으로 관리·이용하기 위해서는 지하수의 수리현상에 대한 정확한 이해가 필요하다. 국내외에서 많은 기관과 연구자에 의해 지하수유동시스템의 정확성과 적용성을 향상시키기 위한 과학적 분석과 유동특성의 예측에 대한 연구가 수행되어 왔다. 또한 물 순환과정에서 지표수와 지하수의 상호작용을 고려한 연구와 양수에 의해 발생하는 문제점과 예측 및 해결을 위한 다양한 연구들도 진행되고 있다.

Hubbert (1940)의 지하수 유동의 모델화를 위한 연구가 시초이며, 이후 Toth(1963)는 지하수 흐름의 이론적인 해석을 소규모 배수유역을 대상으로 수행하였다. 또한 Freeze & Witherspoon(1963)는 비균질적, 이방등성 유역에 수학적 모델을 이용하여 정상지하수 흐름에 대하여 연구하였다.

Freeze(1971)는 소규모 가상 유역의 지표면 상부 경계조건을 포함하여 3차원 유한차분모델을 개발하였고, Kuiper(1975)와 Gupta & Tanji(1976)등은 정상상태의 3차원모델의 유용성을 개선하였으며, Narasimhan & Witherspoon(1976)은 지하수 흐름에 대해 유한차분식 방정식으로 연구를 수행하였다. Ueshita와 Sato(1970)는 과다한 양수에 의한 유역의 침강문제에 대해 3차원 모델을 적용하였으나 복잡한 지하수면과 대수층 및 지질적 특성을 적용하기에는 한계가 있어, Gupta et al(1984)은 복잡한 지하수 시스템의 3차원 유한요소모델을 개발하기 위해 규모가 크고, 다층구조로 된 지층를 적용하는 연구를 수행하였다. 이 후 Wang & Anderson(1982)은 유한차분과 유한요소법에 관한 지하수 모델링 연구를 수행하였으며, Brown(1986)은 높은 염수를 포함하는 지역을 대상으로 지하수 유동시스템에 관한 연구를 수행하였다.

Dreher 등(1996)은 오스트리아 비엔나를 대상으로 다뉴브강에 설치된 Freudenu보의 건설 이후 지하수 수위 조절 및 관리에 대한 연구를 수행하였으며, Gong 등(2000)은 중국의 Zhengzhou 도시를 대상으로 한 지하수 수위 관리를 위한 관측공

의 최적 설치 지점과 선정에 대해 연구한 바 있다. Harvey 등(2001)은 투수성 지반으로 구성된 Nebraska 지역을 대상으로 지구화학 및 동위원소 분석 등을 통해 지하수 관측정의 지하수위를 분석하였다.

SWAT 모형에 관련된 기존 연구동향은 Arnold 등(1996)이 Illinois 유역의 3개의 소유역에 SWAT 모형을 적용하는 과정에서 지하수량, 지하수의 증발산량, 토양의 증발산량, 표면유출량, 지하수 함양량을 지하수위 높이 등의 기준에 구축된 관측자료와 모형의 결과를 비교하여 모형의 적용 가능성을 확인하였다. 그 결과 SWAT 모형이 유역단위의 다양한 토지이용에 따른 유역관리의 가능성을 제시하였다.

Fitz Hugh 등(2000)은 총 유출량과 총 유사량이 세부 분할된 유역의 크기와 개수에 따른 영향을 분석하였다. 연구 내용은 Dane 주의 Pheasant Branch 유역을 대상으로 소유역의 면적은 줄이고 개수를 늘린 결과 유역출구지점의 전체 유출량은 변화율이 미소하게 나타났으나 총 유사량의 경우는 44% 감소함을 나타내 소유역 분할개수와 유사량의 민감한 반응을 밝혀냈으나 소유역을 어떻게 분할해야하는지는 언급되지 않았다.

Lenhart 등 (2003)은 SWAT-G 모형을 이용하여 독일의 Frankfurt 북서쪽에 위치 Dill 유역을 대상으로 토지이용변화의 영향에 따른 유출량과 영양물질의 변화량을 정량적으로 제시하였다. 그 결과는 산림의 감소와 초지의 증가는 유출량과 유사량의 변화에 미치는 영향은 크지 않지만 영양물질인 질삼염의 양은 크게 증가함을 확인하였다.

2.2 국내 연구동향

지하수 유동시스템에 관한 국내의 연구로는 김영기(1976)의 반야월층의 지하수 유동에 관한 연구가 시초이며, 안종성(1983)은 동위원소를 이용한 한강 유역 내 지하수와 지표수의 연관성에 대하여 연구하였다(Kim, 2014). 또한 배상근(1992)은 대구 지역을 대상으로 지하수 개발에 의한 인근 하천수와 지하수의 연계에 대한 변화와 지하수 흐름, 수위변화를 유한차분법으로 해석하는 연구를 수행하였다.

고병련(1984)은 제주도를 대상으로 주요 수자원인 지하수 부존형태, 지하수위 변동에 대한 연구와 지하수 수질오염 예측에 관한 모델을 연구하였으며, 김재광(2001)은

갈수기 용수수급에 많은 어려움을 겪고 있는 포항시 북구 청하면 유역을 대상으로 유한 요소법을 이용한 2차원 지하수 유동해석모형인 WinFlow모형을 이용한 지하수 유동해석 시스템을 연구하였다. 또한 용재경(2003)은 부정류 상태의 1차원 피압대수층 모델을 가정하고 변동 유한요소법을 적용하여 갑작스런 수두 변화에 의한 시간열 수두 변화를 모사하였다.

정수일(2003)은 MODFLOW 모형의 초기 함양율로 연구 대상유역에 일정하다고 가정하여 GIS 공간 자료를 활용하여 대상유역의 Grid cell 크기에 따른 지표수와 지하수 사이의 유동현상을 연구하였다.

김남원 등(2006)은 3차원 분포형 지하수 모형인 MODFLOW와 준분포형 장기유출 모형인 SWAT을 통합한 SWAT-MODFLOW 모형을 개발하고 지표수와 지하수를 연계한 통합 유출을 모의하였다. 결합모형은 경안천 수위관측소가 포함된 유역을 대상으로 적용하였으며 그 결과 유출량 산정에 하천 지류와 포화대의 상호작용에 대한 관계가 중요함을 도출하였으며, 비선형 저류방정식을 이용한 하도추적법을 새롭게 제시함으로써 분석 시 하도추적과정에서 발생할 수 있는 기존의 문제점을 극복하고 지하수 함양량 및 지하수두의 시공간적인 변동성을 모델링하는 등 SWAT-MODFLOW 결합모형의 광범위한 적용성을 나타냈다.

원유승(2007)은 국내의 유역특성을 고려하여 장기적 모의가 가능한 지표수-지하수 연계모형의 개발과 일단위 이하의 짧은 시간간격에 대해 연속적인 모의가 가능하도록 개발모형의 적용성을 확장하는 연구를 진행하였다.

김남원 등(2008)은 우리나라의 수문 및 지질 특성을 고려한 장기유출 해석 모형인 SWAT-K를 개발하여 설마천 유역을 대상으로 각 수문성분의 특성을 적용하고 실측치와 주요 수문성분을 비교·검토하였다. 전적의 관측유량 자료를 이용한 검증결과는 높은 신뢰성을 나타냈으며, 증발산과 지하수 유출량의 관측치와 모의치 등을 비교하여 계산된 수문성분비의 적정성을 검토하고 모의치와 실측치의 상관성이 인정됨을 확인하였다.

정도준(2008)은 제주도 남부의 서귀포시를 대상으로 지하수 유동특성을 분석하기 위해 지표수 흐름의 수치해석에 필요한 WMS 7.0 모형을 이용하고 GMS 모형을 활용하여 화산도서 지역의 양수기간에 따른 지하수위분포를 분석하고 유동현상을 예측하는 연구를 하였다. 또한 최정현(2008)은 제주도 표선읍 천미천 유역을 대상으로 유한차분법을 이용한 지하수 양수량 변화의 영향에 의한 지하수위 거동변화에

대해 연구하였다.

이병철(2009)은 제주도 표선유역에서의 지하수 유동특성을 분석하기 위해 지하수 함양량을 SWAT 모형을 통해 산정하였으며, 양수기간에 따른 지하수위 분포를 분석하고 지하수 유동 시스템의 예측을 실시하는 연구를 하였다. 또한 이남훈(2011)은 제주도 남부 서귀포시를 대상으로 지하수 유동특성에 관한 연구를 수행하였으며 최경창(2011)은 해안 저지대의 지형특성을 고려한 지하수 유동특성에 대한 연구가 진행 되었다.

김남원(2009, 2013) 등은 독특한 수문 특성을 나타내는 제주지역을 대상으로 지표수-지하수의 연계성으로 고려한 연구가 지속적으로 수행되고 있으며 특히 제주도심지를 유과하는 대표 건천인 한천 유역을 대상으로 통합수문모형을 적용하고 지표수와 지하수의 관계를 통합적으로 해석하는 연구를 수행하였다.

김민철(2014)은 제주도 성산유역을 대상으로 지하수의 유동특성과 지하수 함양량에 따른 수리 특성을 연구하였으며, 김기수(2015)는 4대강 인근의 측정된 하천수위와 지하수위 자료를 활용하여 보 설치에 의한 하천과 지하수위 변화를 분석하고 보 설치 전후의 흐름계를 조사하여 그 영향을 확인하는 연구를 하였다.

전주영(2016)은 낙동강 하천 주변 관측정 30개소를 대상으로 주요영향인자를 판단할 수 있는 지하수 관측정 평가방법을 제시하고 관측 목적에 대한 적합성 여부를 평가하고 있다.

이 연구에서는 국내외에서 진행된 SWAT 모델과 지하수 관련 모델의 연구동향을 선행연구로 참고하였다. 그러나 기존의 연구에서는 지표수-지하수 수문해석에 대한 과정은 부족한 편이며, 수치모델에 적용되는 실측자료의 부재로 인해 모델링 보정에 한계가 있다.

기존 지표수-지하수 통합수문해석결과는 소유역 중심의 1개 하천 분석결과를 전체 유역에 적용하기도 하였다. 특히 집중호우 및 태풍의 영향에 의한 지표수 유출과 지하수 함양량의 특성을 파악하는 과정에서 제주도는 독특한 지질 특성이 가장 큰 변수로 적용되므로 현장관측 자료를 기반으로 한 지표수-지하수의 해석이 필요하다.

3. 연구 자료 및 방법

이 연구는 제주도의 16개 수역 중에서 상시하천이 가장 많이 분포하는 중서귀 유역을 연구대상 유역으로 선정하였다. 제주도 남부의 중서귀 유역을 대상으로 소유역별 함양량을 산정하기 위해 SWAT(Soil & Water Assessment Tool) 모델을 적용하였다.

SWAT 모델을 연구대상 유역에 적용하는 과정에서 모델링 구축에 필요한 토양도, 토지피복도와 같은 GIS자료를 구축하였으며, 기상학적 영향인자값은 중서귀 유역에 인접한 5개소(윗세오름, 회수, 어리목, 진달래밭, 중문)의 AWS(Auto Weather System)강우량 자료와 1개소의 서귀포 기상대의 기상자료를 사용하였다. SWAT 모델링 분석을 위한 자료 구축과 분석은 이 논문의 IV장에 자세히 기술하였다.

중서귀 유역의 유출량과 함양량을 추정하기 위해 SWAT 모델링을 구축하는 과정에서 유출량과 함양량에 영향을 미치는 13개 항목의 매개변수에 대한 민감도 분석을 실시하고 7개의 소유역별로 매개변수를 보정하였다.

매개변수 보정에 사용한 자료는 2011년 7월부터 2014년 12월까지 제주도 중서귀유역의 강정천과 약근천, 연외천, 동홍천의 ADCP, ADC 현장관측 자료를 이용하였으며 SWAT 모델의 유출량 자료와 비교·분석하였다.

실제 하천유출 관측자료를 기반으로 SWAT모형을 이용하여 산정된 중서귀 유역의 함양량은 GMS(Ground-water Modeling System)-MODFLOW 모형에 적용하여 중서귀 유역의 정상류 상태에 따른 지하수 유동해석을 실시하고, 2012년부터 2015년까지 지하수 함양량변화에 따른 유동특성을 실제 관측자료와 비교·검토하였다. 또한, 중서귀유역의 기설관정 477개소의 지하수 관정을 적용하여 지속양수에 따른 수위변동 특성을 분석하였다.

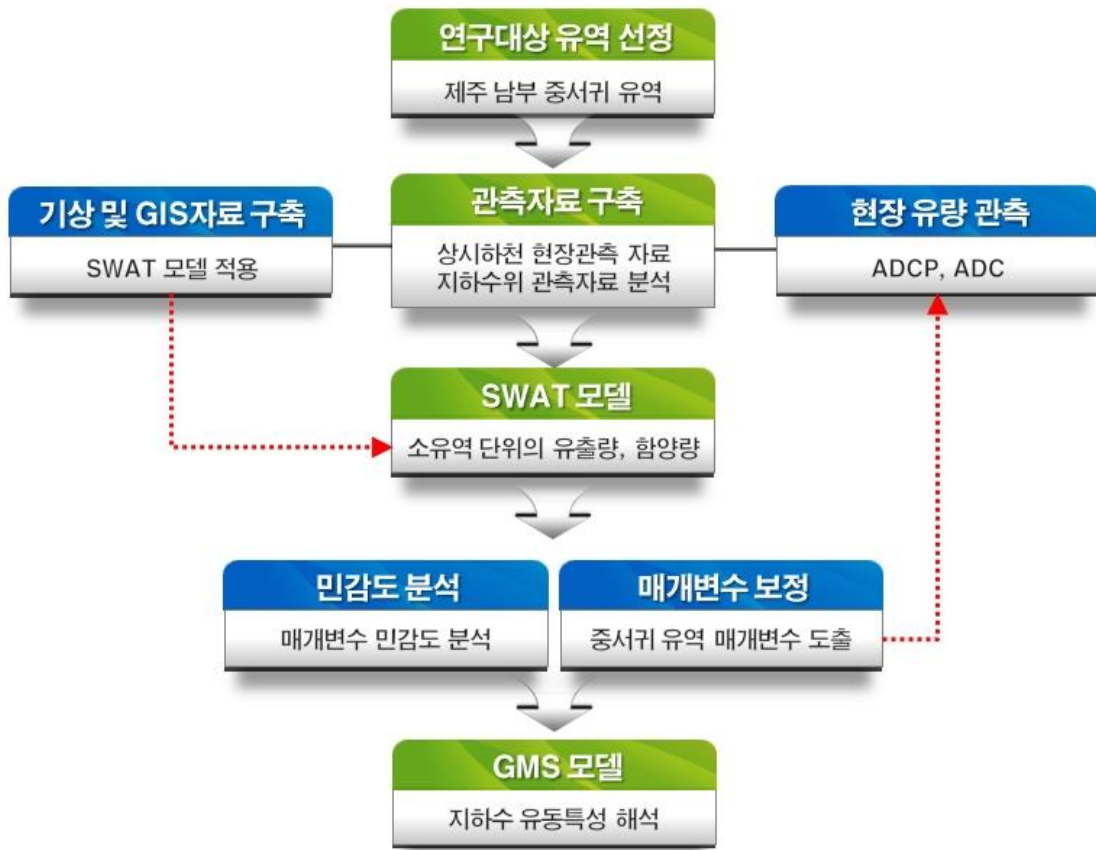


Fig. 1.1 Flow chart on the study

II. 이론적 배경

1. 지하수 함양량 추정이론

수문순환(hydrologic cycle)과정에서 해당 유역의 지하수 함양량은 수문·기상특성의 영향과 토양 및 암반층의 특성, 지표면의 식생분포 및 지형 형태와 밀접한 관련이 있으므로 통합적인 관점에서 지하수 함양량을 추정이 이루어져야 한다.

지하수 함양량 추정방법에는 해당 유역의 강수량(rainfall)과 직접유출량(runoff), 증발산량(evapotranspiration), 지하수함양량(groundwater recharge)의 수문평형을 전제로 하는 물수지 분석 방법(water budget)과 NRCS-CN방법을 이용하여 강우의 평균 침투량과 평균 강우량을 비교하여 지하수 함양율을 추정하는 방법이 있다. 또한 유출수문곡선을 직접유출과 기저유출로 분리하여 지하수 함양율을 추정하는 기저유출 감수곡선법과 강수의 영향으로 지하수위의 변화에 대수층의 비산출율을 곱하여 지하수 함양을 산정하는 지하수위 변동법이 있다.

본 논문에서는 지하수 함양량 산정을 위해 SWAT 모형을 선정하여 적용하였다. 그 이유는 SWAT 모형이 국내외에서 가장 활발한 연구가 진행되고 있으며 다양한 분야에서 적용성이 입증되고 있기 때문이다. 또한 SWAT 모형은 계산과정에서 해당유역의 토지 피복 상태와 함수량을 고려하고 강수량 자료, 최고 최저기온, 태양복사량, 평균풍속, 상대습도 등 기상자료를 활용하여 모델링을 구축하므로 본 연구에 적합한 모형이라 판단된다.

1.1 SWAT 모형의 개요

세계적으로 다양한 연구와 활용도가 높은 SWAT(Soil & Water Assessment Tool) 모형은 일 단위의 모의가 가능한 유역단위의 준 분포형 장기-강우유출모형으로써 미국 농무성의 농업연구소(USDA, Agricultural Research Service, ARS)와 Jeff Arnold 등에 의해 개발되어 최근까지 지속적인 개선과 지리정보시스템과 연계

된 모형 인터페이스가 개발되고 있다(Arnold, 1992). SWAT 모형은 토양특성과 토지이용도 및 토지관리의 영향에 의한 물, 유사 및 농업화학물질의 이동 특성에 대해 토지관리 방법의 영향을 예측하지 위한 유역(drainage basin)모형이다. 또한 토양 특성 및 토지이용을 소유역을 기준으로 분할되는 수문응답의 최소 단위(수문반응단위)로 HRU(Hydrological Response Unit)를 이용하며, SWAT에서의 주요 수문순환과정에서 적용되는 모의방법은 Table 2.1와 같다(KICT, 2008).

Table 2.1 The main hydrological cycle simulation method of SWAT

Phase	Process/Component	Model/Equation
Land Phase	Precipitation	Weather Generator : Nicks model
	Air Temperature and solar radiation	Generated from normal distribution and adjusted from continuity equation
	Wind Speed	Modified exponential equation
	Infiltration	Green & Ampt or difference between rainfall land surface runoff using SCS CN method
	Potential Evapotranspiration	Hargreaves, Priestley Taylor, Penman-Monteith equations
	Lateral Surface flow	A Kinematic storage model
	Surface runoff volume	NRCS-CN, Green & Ampt equations
	Peak runoff rate	Modified Rational formula
	Transmission losses	Lane's method
	Land cover/plant growth	Modified EPIC model
	Erosion	Modified Universal Soil Loss Equation
Stream Phase	Pesticide movement	Adapted from GLEAMS model
	Flood routing	Variable storage coefficient method or Muskingum routing method
	Sediment routing	Function of peak channel velocity
	Nutrient routing	Adapted from QUAL2

자료 : HyGIS SWAT manual, KICT(2008)

SWAT 모형의 장점은 과거부터 최근까지 활발한 연구가 진행되고 있는 GIS(Geographical Information System)로 구축된 자료를 활용하여 토지이용(land use) 및 토양(soil type)특성, 지형정보 등을 추출하고 입력자료로 이용되는 물리적 기반 모형으로써 정확한 모의가 가능하다는 장점이 있다. 또한 GIS로 구성된 토지이용자료를 사용하므로 토지이용의 공간적 변화가 유출량(runoff)의 관계에 미치는 영향을 수치화하여

분석할 수 있다는 장점과 연구 대상유역을 HRU(Hydrological Response Unit)라는 계산단위로 나누어 수문모의를 모델링하므로 소유역부터 대유역까지 모의가 가능한 장점이 있다.

HRU(Hydrologic Response Unit)란 격자(Cell)형태의 계산단위를 의미한다. 분석에 사용되는 토양, 토지이용, 지형자료를 사용자의 연구 목적에 따라 크기를 조절할 수 있으며 연구의 모의시간을 조절할 수 있으므로 HRU 별로 매개변수의 추정이 가능하다. SWAT 모형의 한계점은 현재 일(day) 단위의 최소 시간단위가 적용되므로 강우의 영향에 의한 홍수 시 유출계산 과정에서 유출량은 일(day) 시간단위 밖에 산정할 수 없는 단점있다. 이를 보완하기 위해 현재에는 임의시간을 고려한 시(hour) 단위의 해석을 진행하는 하는 연구가 되고있다.

SWAT 모형의 구성은 4가지의 부모형(sub-model; 수문 부모형, 하도추적 부모형 영양물질 부모형, 토양유실 부모형)으로 구성되어 있으며 이 연구에서는 수문 부모형과 하도추적 부모형을 사용하였다. 이 중에서 수문 부모형은 저류방정식(storage routing)에 의해 일 단위로 물수지를 산정하며, 차단(interception), 지표면 유출(surface runoff), 중간유출(interflow), 침투(infiltration), 기저유출(base flow), 증발산(evapotranspiration) 등으로 구성되어 있다.

SWAT 모형에서 지표면 유출량은 NRCS방법(SCS방법)을 이용하여 산정하며, Kinematic Storage Model(Solen et al., 1983)를 이용하여 중간유출을 계산한다. 또한 해당유역의 침투에 관해서는 선형저수량 추적기법을 사용하여 최대 10개 층의 토층을 세분화하여 모델링에 적용된다. 다음 SWAT 모형의 지하수 관련 부분은 지하수를 얇은 비피압 대수층(해당 유역의 하천에 대한 회귀수 공급)과 깊은 피압 대수층(해당 유역 밖의 하천에 대한 회귀수 공급)으로 구분하여 물수지 분석에 계산된다. 또한 물수지 과정에서 잠재 증발산은 Penman-Monteith와 Hargreaves, Priestley-Taylor 방법이 제공되며 분석자의 선택에 의해 모의되어 산정된다.

SWAT 모형의 입력자료는 GIS를 통해 작성되는 기상, 하도추적, 지하수 등의 자료와 GIS와 수동 입력을 병행하여 작성되는 소유역 자료로 구분되며, 출력자료는 토양도와 토지이용도를 중첩시켜 만든 수문반응단위(HRU)별 출력자료와 유역경계에 의해 구분된 소유역별 자료, 각 하도추적 구간별 결과치로 구분된다(Jung, 2008).

1.2 SWAT 모형의 구조

SWAT 모형은 해당 유역의 물수지 분석에서 발생하는 각각의 특성의 상호작용을 이해하는 것이 중요하다. 이는 SWAT 모형에서 모의되는 물, 유사 및 영양물질의 이동 등을 정확히 예측하는 과정에서 해당 유역의 수문순환(hydrologic cycle) 모델링 과정과 실제 발생하는 현상과 일치해야 하므로 SWAT 모형은 해당 유역의 수문순환에 대한 모의과정을 다음과 같이 토지부분과 추적부분으로 두가지로 나누고 있다.

첫 번째 토지부분으로 주 하천에서의 물, 침전물, 살충제, 영양물질 등의 각 소유역으로 부하량을 조절한다. 두 번째 부분은 추적부분으로 해당유역의 하천에서 출구지점까지의 물과 유사 등의 이동으로 정의될 수 있는 수문순환의 추적에 관한 부분으로 나누어진다(SWAT manual, 2001).

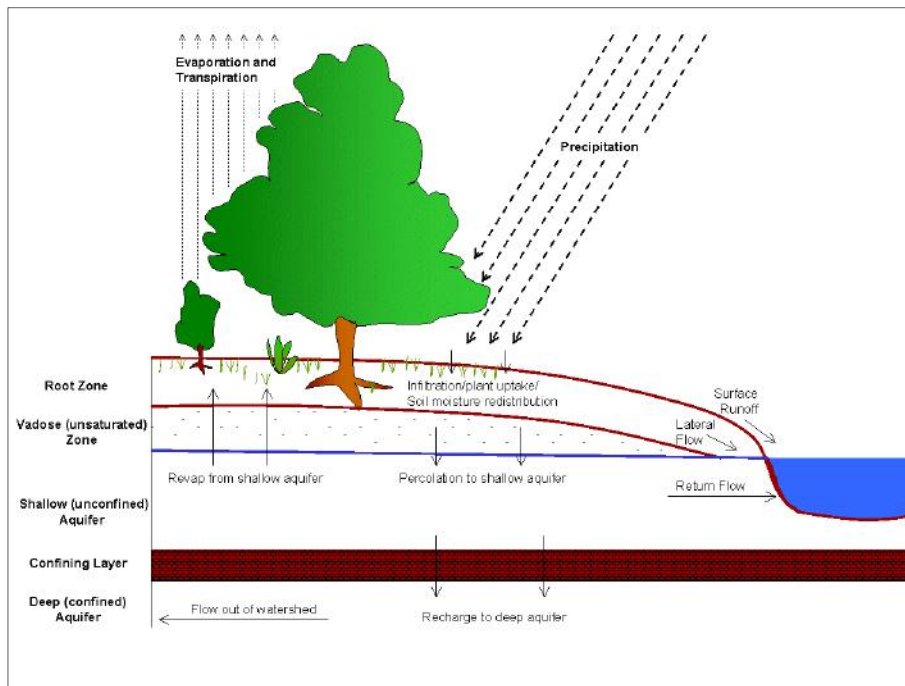


Fig. 2.1 Schematic representation of the hydrologic cycle (SWAT manual, 2001)

1.2.1 수문순환의 토지부분

SWAT 모형에서는 수문순환의 토지부분(land phase of the hydrologic cycle)을

정확히 예측하기 위하여 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산, 지표 유출, 기저 유출, 지하수 등에 대한 모의를 각 수문반응단위 별로 계산할 수 있으며 사용하는 물수지 방정식은 다음 식 (2.1)과 같다(SWAT manual, 2001).

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

여기서, SW_t : 최종일의 토양수분량(mmH_2O)

SW_o : I일의 초기토양수분량(mmH_2O) , t : 시간(일)

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

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

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

SWAT 모형의 증발산 산정 시 다양한 작물 종류와 토양특성을 구역별로 반영하여 산정된다. 해당 구역의 유출 지점 구분과 총 유출량을 계산하는 과정에서 수문반응단위로 계산되고 물리적 특성이 고려된 하도 추적이 이루어지므로 정확한 물수지 분석이 가능하다. SWAT 모형에서 사용되는 계산과정 중 수문순환의 토지부분을 모의하는 과정은 Fig. 2.2와 같다(SWAT manual, 2001).

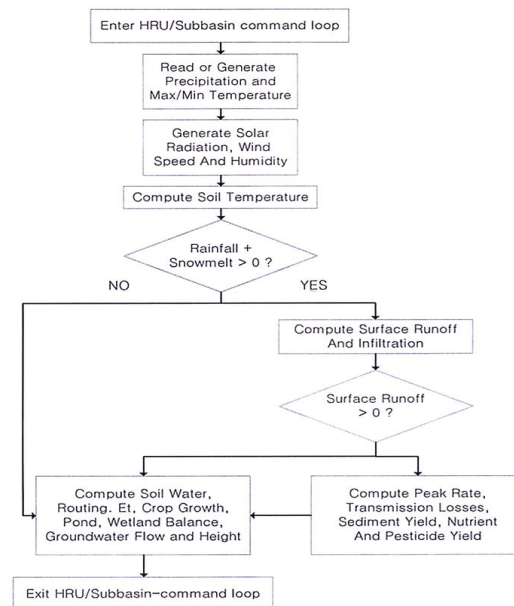


Fig. 2.2 HRU/Subbasin command loop (SWAT manual, 2001, Jung, 2008)

1.2.2 수문순환의 추적

SWAT 모형의 수문순환과정에서 토지부분의 영향은 물, 유사 및 영양물질 등이 해당 유역의 주 하천으로 부하가 결정되면 HYMO(Williams and Hann, 1972)의 명령 구조가 사용되어 해당 유역의 하천망을 통해 하천에서의 흐름이 추적된다. 또한 이 외에도, 해당유역의 하천 및 하상에서의 화학물질의 거동도 선택에 따라 모형화할 수 있다.

SWAT 모형의 수문순환과정의 추적(routing phase of The hydrologic cycle)은 다음과 같이 크게 하도추적과 저수지 추적 두 가지로 나뉘어진다.

첫 번째는 해당유역의 홍수사상 및 유사, 농업화학물질, 영양물질 등의 주 하천 및 하도 추적을 나타내며 두 번째는 해당유역의 저수지를 대상으로 유출량, 영양물질, 저수지 유입 유사 등을 추적하는 저수지 추적으로 구분된다. 하도 추적 및 저수지 추적과 같이 해당유역의 하천 내에서의 다양한 추적과정은 Fig. 2.3과 같이 도식된다.

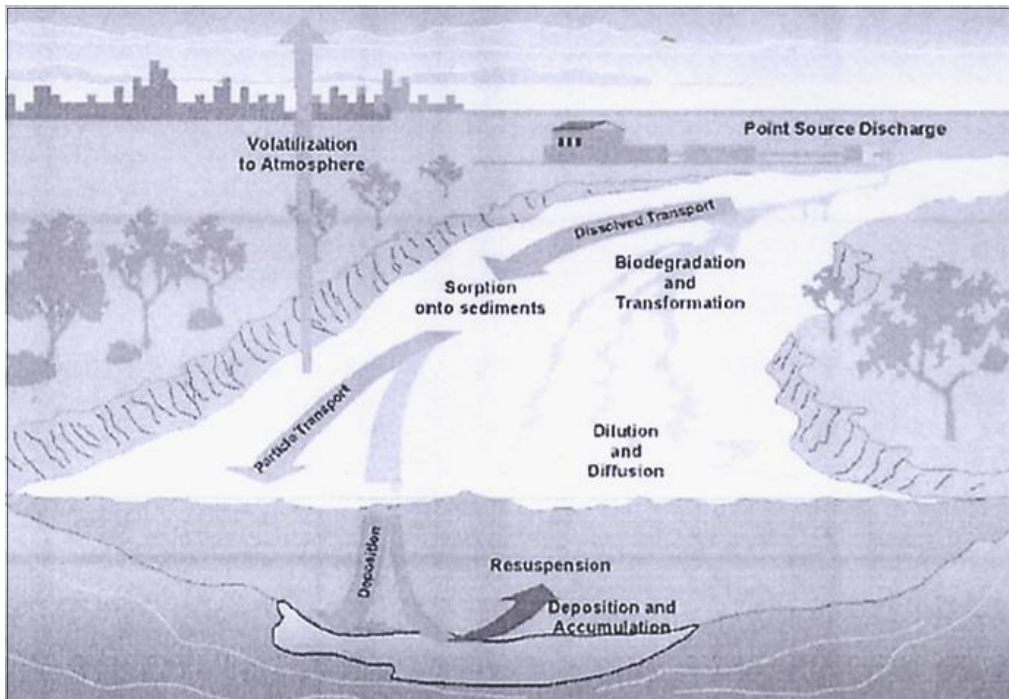


Fig. 2.3 Tracing process of SWAT model about the river (Arnold, 2000)

1.3 SWAT 모형의 수문학적 추정모형

1.3.1 기상

해당구역의 다양한 기상(climate)자료는 수문순환과정의 여러 영향성분 중에서 상대적으로 중요한 사항을 결정하는 수분 및 에너지를 제공하고 전체 물수지를 조절한다. SWAT 모형의 모델링 구축과정에서 필요한 기상 자료들은 일강수량과 최고·최저온도, 태양복사에너지, 풍속 및 상대습도 등이 이용된다. 이 같은 값은 해당구역의 관측 자료로 입력되거나 SWAT 모형의 모의 기간 중에 모의 발생된다.

(1) 에너지

수문순환과정에서 물의 이동을 조절하는 인자는 일사량(solar radiation)과 온도(temperature)와 같은 에너지(energy) 인자이다. 특히 일사량과 온도 인자는 강설량을 모의하는 등 모델링 과정에 중요한 영향을 미친다. 해당 구역의 증발량이 물의 전이에 중요한 요소이므로 물수지 과정을 정확히 모의하는 과정에서 해당구역의 에너지 유입은 매우 중요하다.

① 일사량

SWAT 모형에서 일사량(solar radiation)을 계산하기 위해서는 지구와 태양의 거리와 기울기 및 태양의 일출·한낮·일몰 등의 초기자료를 해당구역의 위·경도 자료를 중심으로 산정되며 이 중 위도 및 일조시간 자료는 증발산량 산정 과정의 입력자료로 사용된다. 해당 구역의 위도 및 일조시간 자료가 입력 자료로 구축되면 각 소유역의 일 태양 복사량이 산정된다. SWAT 모형의 순복사량은 다음과 같다.

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{SC} E_0 [\omega T_{SR} \sin\delta \sin\Phi + \cos\delta \cos\Phi \sin(\omega T_{SR})] \quad (2.2)$$

여기서, H_0 : 태양 입사 복사량 E_0 : 태양 궤도의 이심률 상관 계수

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

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

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

SWAT 모형의 모델링 과정에서 구름의 영향에 의한 차단효과는 약 20%로 가정하며, 지표면의 영향을 주는 입사복사량 최대치는 다음과 같은 계산식이 적용된다.

$$H_{MX} = 30.0E_0[\omega T_{SR} \sin\delta \sin\Phi + \cos\delta \cos\Phi \sin(\omega T_{SR})] \quad (2.3)$$

여기서, H_{MX} : 맑은 날 지표면에 도달 가능한 복사량

SWAT 모형의 순 단파 복사량($(1-\alpha) \cdot H_{day}$)은 해당구역의 토양성분과 식생분포 및 눈의 피복 상태 함수에 의한 일 알베도(albedo)값을 이용하며 다음과 같다.

- 물로 환산한 눈의 양이 5mm 보다 큰 경우

$$\alpha = 0.8$$

- 눈의 양이 0.5mm 보다 작고 HRU에 식물의 생장이 없는 경우

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

- 눈의 양이 0.5mm 보다 작고 식물의 생장이 있는 경우

$$\alpha = \alpha_{plant} \cdot (1 - cov_{sol}) + \alpha_{soil} \cdot cov_{sol} \quad (2.4)$$

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

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

다음 순 장파 복사량(H_b) (Doorenbos and Pruitt, 1977)은 다음 식이 적용된다.

$$H_b = - [0.9 \cdot \frac{H_{day}}{H_{MX}} + 0.1] \cdot [0.34 - 0.139\sqrt{e}] \cdot \sigma \cdot T_k^4 \quad (2.5)$$

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

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

다음 일 순 복사량(H_n)은 다음 식이 적용된다.

$$H_n = (1 - \alpha) \cdot H_{day} + H_b \quad (2.6)$$

여기서, H_n : 순 복사량, H_{day} : 단파 복사량

H_b : 순 유입 장파 복사량, α : 단파 반사율

② 온도

SWAT 모형 구축과정에서 온도(temperature)인자는 해당구역의 수문과정에서 물리적, 화학적, 생물학적 과정에서 많은 영향을 미치므로 증발산 및 토양 온도에 영향을 미치는 매우 중요한 요소이다.

온도 자료는 SWAT 모형의 분석 결과의 정확성에 매우 큰 영향을 주며 직접 입력되거나 또는 모형 내에서 모의 될 수 있다. SWAT 모형은 해당구역에 가까운 지점의 온도 자료를 구축하고 사용한다.

SWAT 모델링 과정에서 시 대기 온도(Hourly air temperature)는 일대기 온도로 시 대기 온도를 생성하기 위해 다음과 같은 식 (2.7)가 사용된다.

$$T_{hr} = \overline{T_{av}} + \frac{T_{mx} - T_{mn}}{2} \cdot \cos(0.2618 \cdot (hr - 15)) \quad (2.7)$$

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

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

다음 토양 온도(Soil temperature)는 지표면과 각 토양층의 중심에서 계산되며 토양내의 물의 이동 및 잔류물의 감소율에 영향을 준다. 지표면의 5cm, 300cm 깊이로 부터 토양 온도와 대기 온도를 비교한 값은 Fig. 2.4와 같다.

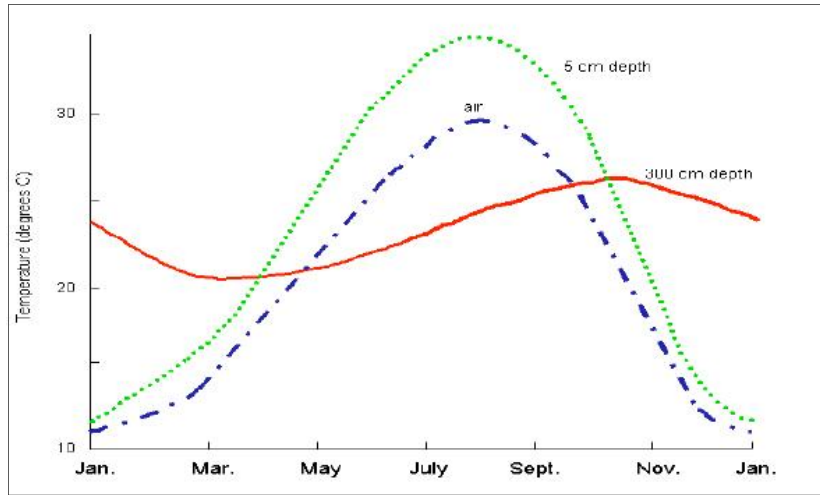


Fig. 2.4 Four-year averaged ambient and subsurface temperatures (5cm and 300cm in depths)

SWAT 모형에서 토양층 온도는 지표면의 온도와 연평균 기온 등 외부 기상조건에 의해 온도의 변화가 더 이상 일어나지 않는 토양층 깊이의 함수로 계산되며 이중지표면의 온도는 전날 지표면 온도, 눈 및 식물의 피복, 잔류물의 피복, 나지의 지표면 온도의 함수로 계산된다. 또한 토양심은 습기를 포함하는 깊이를 의미하고 요적밀도와 토양수분량에 의해 결정되어 산정된다.

지표면의 온도는 다음과 같은 식 (2.8)이 이용되어 계산한다.

$$T_{ssurf} = bcv \cdot T_{soil}(1, d_n - 1) + (1 - bcv) \cdot T_{basl} \quad (2.8)$$

여기서, T_{ssurf} : 현재일의 지표면의 온도 (°C)

bcv : 토양피복의 영향에 의한 가중치, T_{basl} : 식생분포가 없는 지표면의 온도

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

토양층에 따른 온도는 식 (2.9)가 적용되어 계산되며, 일반적으로 ℓ 은 0.80을 사용한다. 또한 지표하의 토양 온도에 영향 깊이 인자(df)는 토양층 중간에서 토양심도까지의 깊이의 비를 적용하여 계산된다.

$$T_{soil}(z, d_n) = \ell \cdot T_{soil}(z, d_n - 1) +$$

$$[1.0 - \ell] \cdot [df \cdot [\overline{T_{AAair}} - T_{ssurf}] + T_{ssurf}] \quad (2.9)$$

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

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

df : 지표 아래로의 토양 온도에 영향을 주는 깊이 인자

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

SWAT 모형의 하천 수온(Water temperature) 인자는 생물학적 과정 및 수질모의 과정에서 산정되는 입력요소이다. SWAT 모형은 하천에서의 일평균 온도 계산과정에서 다음의 식 (2.10)와 같은 Stefan and Preud' homme(1993)식을 적용한다.

$$T_{water} = 5.0 + 0.7 \overline{T_{av}} \quad (2.10)$$

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

③ 풍속(Wind speed)

SWAT 모형을 해당유역에 적용하여 증발산 및 증산작용을 산정하는 과정에서 주로 Penman-Monteith가 적용되는데 SWAT 모형에서 수집된 풍속자료는 지표면에 서 지상으로 1.7m 지점의 관측소로 얻은 값으로 가정하여 계산에 적용된다. 물수지의 주요 인자인 증산을 계산하는 과정 중 Penman-Monteith 방정식이 적용될 때 입력되는 자료에 따라 모형에서 위치에 대한 구간을 다음과 같이 구분된다. 차단 작용에 의해 상부의 측정된 자료로 이용되나 SWAT에서는 차단 높이를 1m로 규정되어 사용하며 차단 높이가 1m를 초과할 경우는 원 풍속 자료에 다음 식 (2.11)이 적용되어 새로운 입력값으로 전환된다.

$$z_w = h_c + 100 \quad (2.11)$$

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

Haltiner and Martin(1957)의 다음과 같은 식 (2.12)를 이용하여 지표면의 고도에 대한 풍속의 변동성이 계산된다.

$$u_{z_2} = u_{z_1} \cdot \left[\frac{z_2}{z_1} \right]^{0.2} \quad (2.12)$$

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

u_{z_2} : 높이 z_2 (cm)에서의 풍속(ms^{-1})

(2) 기상발생기

SWAT 모형의 기상자료 입력은 계산은 구축된 월 평균 값들을 모의 발생된 일 기상 요소들 사용되며 해당구역의 각 소유역에서 각각의 기상자료세트가 구축되어 모의된다. 이 때 Nicks(1974)에 의해 개발된 모델이 적용되어 강수량이 모의되며 이중 구축된 강수량에서 결측부분을 보정하는데도 사용되어 계산된다. 다음 Table 2.2 는 기상발생기(weather generator)에 의해 모의되는 기상요소를 나타낸다.

Table 2.2 Method of weather generator(Jung, 2008)

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

(3) 눈

SWAT 모형에서는 강수량 중 강우와 눈(snow)을 기온 자료를 이용하여 구분하며 임계온도(T_{s-r})를 사용자가 임의로 지정하여 강설과 강수의 구분이 가능하다. 모형

내에서 해당구역의 격자별로 일평균 기온과 임계온도를 기준으로 강설량이 산정된다.

SWAT 모형에서 눈의 피복(Snow cover) 깊이는 사용자가 해당구역의 임계적설심도(threshold snow depth)을 정한 후 한 각 소유역의 적설심 적용되는데 눈에 덮여 있는 비가 이상치 이하로 떨어지면 Fig. 2.5와 같이 면적감소곡선(areal depletion curve)과 같이 비선형적으로 줄어들고 식 (2.13)과 같은 식이 적용되어 산정된다.

$$sno_{cov} = \frac{SNO}{SNO_{100}} \cdot \left(\frac{SNO}{SNO_{100}} + \exp(cov_1 - cov_2 \cdot \frac{SNO}{SNO_{100}}) \right)^{-1} \quad (2.13)$$

여기서, sno_{cov} : HRU의 눈에 의해 덮여있는 비

SNO : snow pack의 등가의 물 깊이(mmH_2O)

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

cov_1, cov_2 : 면적감소곡선의 형상 매개변수(shape parameter)

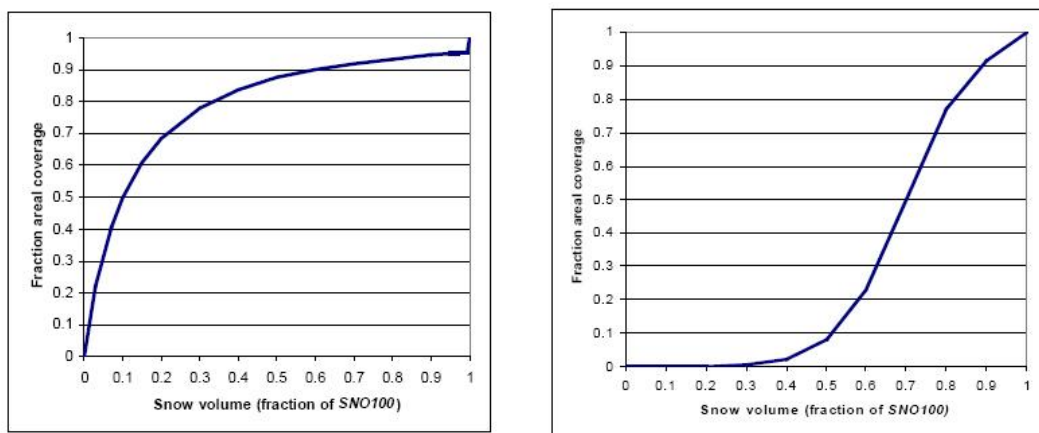


Fig. 2.5 In case of 50% coverage, dimension-decreasing curve according to the change of SNO_{100}

SWAT 모형에서 용설(Snow melt)량은 녹은 눈이 강수량과 같이 유출과 침투에 영향을 미치므로 산정되며 용설량의 산정은 눈의 녹는 속도와 피복 면적 SNOW PACK 등의 함수로 계산된다. 용설에 대한 모형의 가정은 강우 에너지가 “0”으로 되고 침투 유출량은 24시간 내에 선형적으로 녹는 것으로 가정되며 추정 식은 다음과 같다.

$$SNO_{melt} = b_{melt} \cdot sno_{cov} \cdot \left(\frac{T_{snow} + T_{mx}}{2} - T_{melt} \right) \quad (2.14)$$

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

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

1.3.2 수문

SWAT 모형에서 해당구역의 모의되는 물 입자의 잠재적 경로는 다음 Fig. 2.6과 같다.

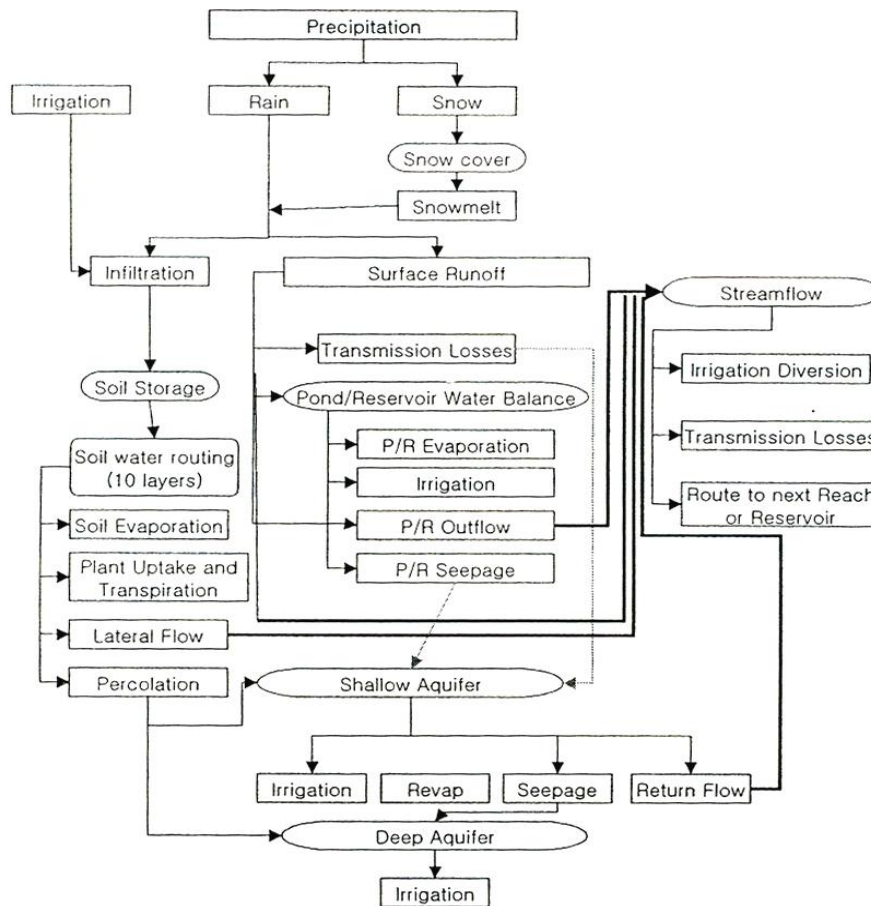


Fig. 2.6 Approximate path of water particle in SWAT model

(1) 지표 유출

SWAT 모형에서는 강우 시 지표면 유출을 산정하기 위해 SCS 유출곡선법(현재 NRCS-CN), Green & Ampt 침투법(1911)과 같이 두 가지 방법이 사용되며 일(DAY) 또는 시간(HOUR) 강우량을 이용하여 해당구역의 지표 유출량과 침투 유출량을 모의한다. 이 중 지표면 유출(surface runoff)은 강우 시 지표면에 수분공급량이 토양층의 침투율을 초과하는 경우 발생되며 초기 토양층 건조 상태이므로 공급율과 침투율이 유사한 경향에서 습윤상태로 변하면서 침투율을 점차 감소된다. 이때 토양층의 공급율이 침투율에 비해 높아지는 경우 요면이 지속적으로 채워지며 가득 채운 후 공급율이 침투율이 높은 상태일 때 지표면유출이 발생한다.

① 유출량 : SCS 유출곡선법(NRCS-CN)

SCS 유출곡선법(현재 NRCS-CN)은 1950년대에 미국 전역의 농촌 소유역에서 20년 이상의 강우와 유출 관계를 연구한 결과로 산정된 경험모형이다.

SCS 유출곡선법의 특징은 해당 구역의 식생피복상태 및 토양특성과 토양의 처리상태, 수문학적 조건, 또한 선행강우의 영향에 의한 토양 조건 등을 고려하여 직접 유출과 관계되는 유효우량을 산정하는 비교적 정확한 방법이다. 또한 유효우량을 산정하는 과정에서 국내에서도 가장 일반적으로 사용되고 있으며, 최근 국토해양부에서 나온 설계홍수량 산정지침(안)에서도 사용을 권장하고 있다.

이 방법 기존 최병수와 안중기(1998), 박재성 등(1999) 배상근과 이승현(2004)등에 의해서 토양의 분포특성과 토지이용 특성을 반영한 해당 소유역의 지하수 함양량 추정기법으로 이용되었다. 그러나 엄밀한 의미에서 침투량은 함양량과는 다른 개념의 물리량이고, 침투량이 곧 지하수 함양량이라는 가정으로 인해 함양량이 과다 추정될 우려가 있으므로 현재 이 방법은 함양을 동적인 수문순환 과정이 아닌 정적인 유역 단일값으로 보는 견해가 지배적이다(최적 지하수 함양량 산정기법 개발, 2007).

만일 해당구역의 유출량 자료가 없는 경우에는 유역의 토양특성과 식생피복상태 등에 대한 자료만으로 유효우량을 산정할 수 있으므로 미계측유역에 직접유출과 관계되는 유효우량 산정에 사용되고 있다.

총강우량 P 는 직접유출량(유효우량) Q , 초기손실(Initial Loss) I_a , 실제보유수량 F 의 관계 식으로 구성되며 이 중 실제보유수량 F 는 침투로 구성되는 총 손실이 다. 유출이 시작된 후 총강우량 P 가 증가함에 따라 Q 와 F 는 증가하며 F 는 최대잠재보유수량 S 에 도달하며 총강우량 P 는 식 (2.15), 실제보유수량 F 는 식 (2.16)으로 산정된다.

$$P = (P - I_a) \quad (2.15)$$

$$F = (P - I_a) - Q \quad (2.16)$$

직접유출량 Q 를 산정하는 경우 실제보유수량 F 와 최대잠재보유수량 S 의 비는 직접유출량 Q 와 총 강우량 P 의 비와 같다는 비례가정을 도입하면 직접유출량 Q 는 식 (2.17)로 산정된다

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad P \geq I_a \quad (2.17)$$

$$Q = 0 \quad P < I_a$$

P : 호우별 총 강우량(mm), I_a : 초기손실(mm)

S : 유역의 최대잠재보유수량(mm), Q : 직접유출량에 해당하는 유효우량(mm)

유출이 시작되기 전 발생하는 차단, 지면저류, 침투 등에 대한 초기손실 I_a 가 $0.2S$ 의 관계를 가진다고 가정하면 식 (2.17)은 NRCS 방법의 총우량-유효우량 산정하는 식 (2.18)이 된다.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad P \geq 0.2S \quad (2.18)$$

$$Q = 0 \quad P < 0.2S$$

유출곡선지수 CN 은 해당유역의 토양-피복형의 영향인자를 나타내는 값으로써

CN을 고려한 최대잠재보유수량 S 는 다음과 같은 식 (2.19)로 산정된다.

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \quad (2.19)$$

여기서, CN 값은 1에서 100범위를 갖는다. 만일 CN 이 100일 경우 $S=0$ 이며, $CN=1$ 일 경우 $S=25,146$ 이다. 즉, $CN=100$ 일 때 손실은 불가능하고 $CN=1$ 일 때 모든 강우량은 손실로 나타나므로 유출은 “0”으로 산정된다. 이 모형은 작은 농경유역에서는 비교적 만족할 만한 침투량을 제공하며, 토지이용변화의 영향을 평가하기 위하여 사용되지만 실제 토양의 성질의 양적인 표현이 어렵기 때문에 SCS는 토양의 침투능을 기준으로 수문학적 토양군(Table 2.3)과 유역의 토지이용 상태 및 식생 피복 처리상태(Table 2.4)를 다음과 같이 분류하였다(Jung, 2008).

Table 2.3 Classification of soil group in SCS runoff curve method

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

Table 2.4 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 and terraced	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						
	Straight row	Poor	65	76	84	88	
	Contoured	Good	63	75	83	87	
	Contoured	Poor	63	74	82	85	
	Contoured and terraced	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						
	Straight row	Poor	66	77	85	89	
	Contoured	Good	58	72	81	85	
	Contoured	Poor	64	75	81	85	
	Contoured and terraced	Good	55	69	78	83	
	Contoured and terraced	Poor	63	73	80	83	
Pasture or range		Poor	68	79	86	89	
		Fair	49	69	79	84	
		Good	39	61	74	80	
	Contoured	Poor	47	67	81	88	
	Contoured	Fair	25	59	75	83	
	Contoured	Good	6	35	70	79	
Meadow		good	30	58	71	78	
Woods		Poor	45	66	77	83	
		Fair	36	60	73	79	
		Good	25	55	70	77	
Forest	Very sparse	-	56	75	86	91	
Farmstead		-	59	74	82	84	
Roads	Dirt	-	72	82	87	89	
	Hard surface	-	74	84	90	92	
Commercial and Business Area	85% impervious	-	89	92	94	95	
	72% impervious	-	81	88	91	93	
	Industrial Area	65% impervious	-	77	85	90	92
	Residentia Area	30% impervious	-	59	71	86	86

② 유출 체적: Green & Ampt 침투법

SWAT 모형에서 제공되는 Green & Ampt 공식(1911)은 강우 시 지표면의 과잉수를 가정고 해당구역의 침투량을 예측하기 위해 개발되었으며 적용 시 토양층은 균질하고 토양층에서 선행함수량이 일정하게 분포하며 토양층의 접촉면은 완전히 포화된다고 가정하여 산정된다. 강우 시 해당구역의 실제 침투 양상과 관련 식에 의해 모의된 침투 양상의 차이는 Fig. 2.7과 같다.

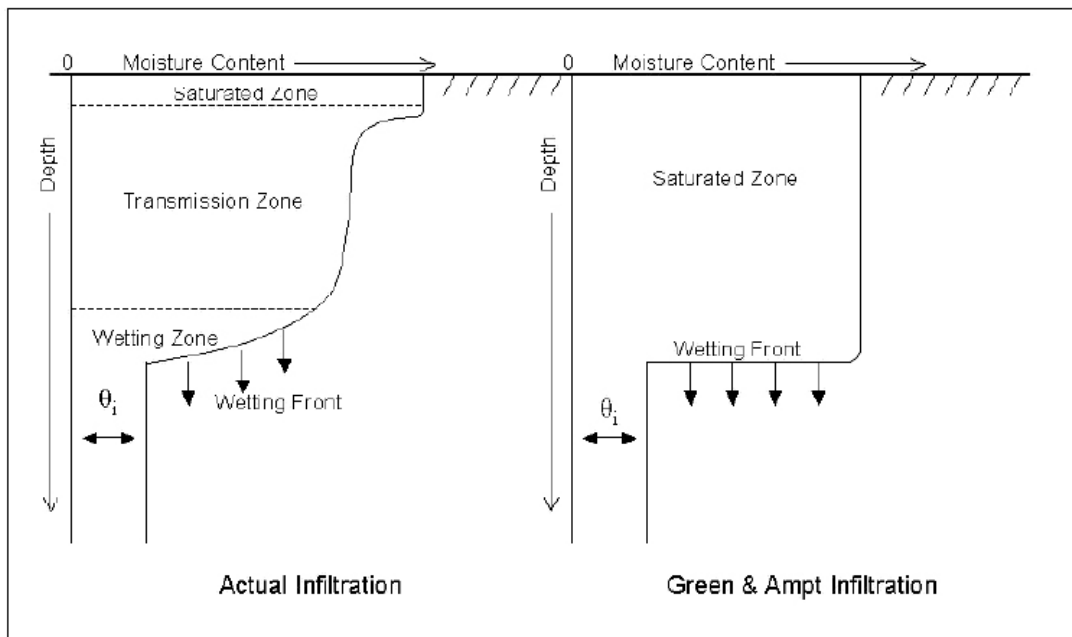


Fig. 2.7 Difference of the actual infiltration and the infiltrating aspect of Green & Ampt formula (Arnold, 2000)

SWAT 모형의 침투량은 1973년 Mein Larson에 의해 개발된 Green & Ampt 공식이 적용되며 침투량을 이용한 저류시간을 모의하는 방법으로써, 일(day) 단위 이하(sub-daily)의 강우자료를 모형구축에 입력한다.

Mein Larson에 의한 Green & Ampt 침투율 산정 공식은 다음 (2.20)과 같다.

$$f_{\infty,t} = K_e \cdot \left(1 + \frac{\psi_{wf} \cdot \Delta\theta_v}{F_{\infty,t}}\right) \quad (2.20)$$

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)

SWAT 모형에서 침투 유출량의 산정은 수정 합리식이 적용되어 산정된다. 수정 합리식은 해당구역의 침투 유출량이 도달시간 t_c 동안 발생하는 강우량을 추계학적 기법이 적용되어 전체 일강우량의 함수로 추정된다. 합리식은 강우강도의 영향이 시작되고 무기한 지속되면서 해당구역의 모든 소유역을 기준으로 유출구의 흐름에 기여하는 도달시간(t_c)까지의 유출량이 증가한다는 개념에 근거한다. 소유역의 도달 시간은 지표특성과 하천 흐름이 고려되는 Manning's 공식이 적용되어 산정된다.

(2) 증발산(evapotranspiration)

증발산이란 지표면의 모든 수분에서 증발되는 수증기량과 식물의 종류에 따른 엽면의 화학작용에 의해 대기로 나가는 수증기량인 증산을 모두 포함하는 의미를 나타내며, 해당구역의 수분이 태양에너지의 의해 대기 중의 수증기로 되는 모든 과정을 의미한다.

SWAT 모형의 증발산 산정은 1972년 Ritchie가 제안한 식이 적용되며 해당유역을 대상으로 토양과 식물로부터의 증발과 증산을 계산한다. 이 과정에서 실제 토양수분증발량, 잠재 토양수분증발량, 식물의 증산은 각 영향인의 지수에 의한 함수식으로 나타낸다. 잠재 토양수분증발량은 잠재 증발산-엽면 지수의 지수함수, 실제 토양수분증발은 토양심-수분량의 지수함수, 식물의 증산은 잠재 증발산-엽면적 지수의 관계에 의한 선형함수에 의해 모의되고 산정된다.

① 차단저류(Canopy storage)

차단저류는 해당 구역의 식물분포에 따른 표면의 차단된 물을 의미하며 모델링 산정 시 침투량과 지표유출량, 증발산 산정에 중요한 영향 인자로 작용한다. SWAT 모형을 활용한 지표면 유출 산정에는 SCS 유출곡선법(현재 NRCS-CN)을 적용할 경우 차단저류가 고려되어 침투량과 유출량이 산정되지만 Mein Larson의 Green &

Ampt를 적용할 경우 차단저류를 구분하여 고려해야한다.

SWAT 모형은 최대엽면적지수(LAI_{mx})를 고려하여 해당구역의 토지피복에 대한 차단·저장될 수 있도록 최대값을 입력한다. 관련된 계산식은 다음 식 (2.21)과 같다.

$$can_{day} = can_{mx} \cdot \frac{LAI}{LAI_{mx}} \quad (2.21)$$

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

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

LAI_{mx} : 주어진 날의 최대엽면적지수

② 잠재증발산(Potential evapotranspiration)

잠재증발산(PET; Potential EvapoTranspiration)이란 특정 지역에 무제한 토양수분 공급이 가능하고, 이류 또는 열저류 효과가 없이 성장하는 식생으로 균일하게 피복된 넓은 구역에서 증발산이 발생할 수 있는 비율을 의미한다(Thornthwaite, 1948). 구역의 증발산 비율은 다양한 식생의 분포 및 표면특성에 따라 영향을 받으므로 Penman(1956)은 잠재증발산은 지면의 균일한 높이와 완전 피복상태에서 수분 공급이 전혀 없는 상태의 녹색 작물에 의한 증산되는 수분량으로 정의한다.

SWAT 모형에서는 잠재증발산 PET를 산정하기 위한 적용식으로 Penman-Monteith method(Monteith, 1965; Allen, 1986)와 Priestley-Taylor method (Priestley와 Taylor, 1972), Hargreaves method(Hargreaves 등, 1985)와 같이 세가지의 방법을 제공하고 있으며 적용방법에 따른 입력 자료가 각각 다르게 적용된다. Table 2.5는 세 가지 적용 방법에 따른 입력자료를 나타낸다.

Table 2.5 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

세 가지 방법 중 가장 많이 사용되는 Penman-Monteith 방법은 기작의 강도, 공기역학적 저항 및 표면저항의 요소들로 구성되어 있다. 다음 식 (2.22)는 Penman-Monteith 방정식을 나타낸다.

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{*t} - G) + \rho_{air} \cdot c_p \cdot [e_z^0 - e_z] / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)} \quad (2.22)$$

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

Δ : 포화수증기압-온도 곡선의 기울기 de/dT ($kPa/^\circ C$)

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

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

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

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

r_c : 식생피복저항 (s/m)

r_a : 대기층의 확산저항 (공기역학적 저항) (s/m)

증발산 산정 방법 중 1972년 Priestley와 Taylor의 연구에 의한 Priestley-Taylor 방법의 특징은 해당구역의 습한 지표면에 적용할 수 있는 식 (2.23)을 개발하였다. 적용 과정에서 타 지역에 비해 습한 특징을 나타내는 경우에는 공기역학 인자를 제외하고, 에너지 요소 계수 (α_{pet})는 1.28를 적용하여 산정한다.

$$\lambda E_0 = \alpha_{pet} \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot (H_{*t} - G) \quad (2.23)$$

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_{*t} : 순복사량($MJm^{-2}d^{-1}$)

G : 지열 플럭스($MJm^{-2}d^{-1}$)

다음 Hargreaves Method는 1975년 Hargreaves에 의해 California Davis 지역의 cool-season Alta fescue 잔디종을 대상으로 8년 기간의 침루계 자료를 구축하여 유도되었다. 이후 1982년 Hargreaves와 1985년 Samani에 의해 개선 연구가 이루어졌으며, SWAT 모형에서 적용되는 형태는 1985년 Hargreaves의 식 (2.24)이 적용된다.

$$\lambda E_0 = 0.0023 \cdot H_0 \cdot (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} \cdot (\overline{T_{av}} + 17.8) \quad (2.24)$$

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

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

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

③ 실제증발산(Actual evapotranspiration)

SWAT 모형의 실제증발산은 잠재증발산 결정이후 산정되며 해당구역의 식생피복의 영향에 의한 차단 강우에서 증발을 계산한 다음 Richtie의 방법과 유사한 방법으로 최대 증산량과 최대 승화·토양 증발량이 산정된 후 실제증발량이 계산된다. 구축된 모델링의 HRU(Hydrological Response Unit)에 눈(snow)이 있는 경우에 승화가 적용되며, 그렇지 않은 경우에는 토양의 증발만 일어난다.

SWAT 모형의 실제증발량을 산정 과정에서 차단된 강우의 증발(Evaporation of Intercepted Rainfall)은 피복영향인자의 저류로부터 최대한 많은 수분을 제거하여 다음 식과 같이 적용된다.

실제증발량의 적용되는 식의 과정은 잠재증발산(E_0)이 피복에 고인 강우량(R_{INT})보다 작은 경우에는 식 (2.25), (2.26)이 적용되어 산정된다.

$$E_a = E_{cam} = E_0 \quad (2.25)$$

$$R_{INT}(f) = R_{INT}(i) - E_{cam} \quad (2.26)$$

여기서, E_a : 유역에서 발생하는 실제증발산량(mmH_2O)

E_{cam} : 피복에 고인 강우에 의한 증발량(mmH_2O) ,

E_0 : 잠재 증발산량(mmH_2O)

$R_{INT}(i)$: 피복에 고인 초기 강우량(mmH_2O)

$R_{INT}(f)$: 피복에 남은 최종 강우량(mmH_2O)

만일 피복영향인자에 고인 물 보다 잠재증발산량이 많다면 식 (2.27), (2.28)이 적용된다.

$$E_{cam} = R_{INT}(i) \quad (2.27)$$

$$R_{INT}(f) = 0 \quad (2.28)$$

또한 피복영향인자에 의한 고인 물이 증발현상 이후 남은 증발 수요량 ($E_a = E_0 - E_{cam}$)은 식생 또는 눈이나 토양 등으로 할당되어 계산된다.

다음 토양의 증발과 승화의 양은 차광(shading)의 정도에 의해 산정결과가 좌우된다. 최대 토양 증발량 및 승화는 식 (2.29)와 같은 관계식에 의해 식생의 수분 사용 기간 동안 감소된다.

$$E'_s = \min \left[E_s, \frac{E_s \cdot E'_0}{E_s + E_t} \right] \quad (2.29)$$

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

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

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

E_t : 주어진 날의 증산량(mmH_2O)

(3) 토양수(Soil Water)

강수 시 토양속으로 들어간 토양수(Soil water)는 지표의 여러 가지 경로에 따라 이동되는 과정에서 증발에 의한 소모와 식물의 생장을 통하게 된다. 또한 해당구역의 토양 바닥까지 침투 및 침투되어 대수층에 도달·충진되며 최종적으로 측방유동이 발생하여 구역의 하천수에 기여하게 된다.

측방 지표하 흐름(Lateral Flow)은 중간 유출이라고도 불리며 수분이 포화된 암석층의 상부의 영향에 의해 유출에 기여하는 흐름이다. 0~2m의 토양층에서 측방 지표하 흐름은 운동과 저류 모형(kinematic storage model)이 적용되어 각각의 토양층 깊이의 불투수층을 형성하는 지역에서 중요하다. 구역에 내리는 강우는 지표하의 불투수층에 도달할 때까지 수직으로 침투현상이 발생하며 침투한 물은 포화지대를 형성하여 불투수층의 위에 저장되며 이 포화지대가 측방 지표하 흐름의 수원이 된다.

SWAT 모형의 지표하 흐름의 모의는 1983년 Sloan 등에 의해 개발되고 1984년 Sloan 과 Moore에 의해 정립된 동역학적 저류모형(kinematic storage model)이 적용되어 산정된다. 동역학적 저류모형은 2차원 단면의 급경사를 따라 이동하는 토양수의 흐름을 모의하며 Fig. 28와 같이 완경사면을 이용한 후 질량 물수지를 적용하여 산정된다.

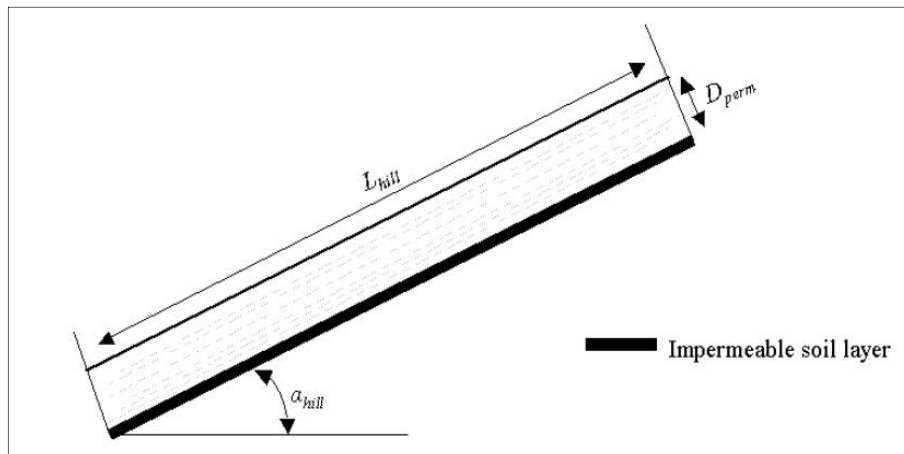


Fig. 2.8 Perfect inclined plane of concep (Arnold, 2000)

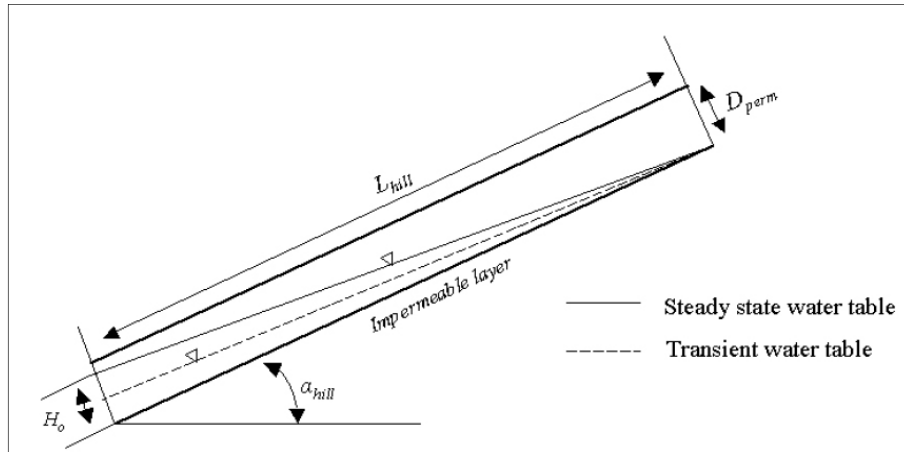


Fig. 2.9 Movement of number field in the dynamic undercurrent model (Arnold, 2000)

포화대에서의 측방 흐름의 동역학적 접근은 바닥경사와 수리경사도가 동일하고 유선이 불투수층의 경계와 평행하다고 가정하면 Fig. 2.9와 같이 단위면적당 경사면의 포화대에 저장된 물의 부피가 계산된다.

경사면 출구에서의 순유출, Q_{lat} 은 다음 식 (2.30)으로 나타난다.

$$Q_{lat} = 0.024 \cdot \left(\frac{2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\Phi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (2.30)$$

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

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

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

L_{hill} : 경사면 길이(m), slp : 단위거리

(4) 지하수(Groundwater)

지하수(Groundwater)는 양압(Positive Pressure)을 받고 있는 포화지대의 물로 정의되며 침투(infiltration)와 침투(percolation) 과정을 통하여 불투층에 도달 후 저류된다.

① 지하수 시스템(Groundwater System)

지하수의 포화대에는 낮은 수리 전도도(Low conductivity)를 가진 곳과 높은 수리 전도도(high conductivity)를 가진 곳이 형성되어 나타나게 된다. 대수층이라고 정의되는 이 층은 수문학적으로 물을 충분히 저장할수 있는 지형을 형성하고, 물을 상시 빠르게 운송할 수 있는 지질학적 단위로 정의된다(Dingman, 1994).

지하수 상부의 피압층과 하부의 수리전도도가 대수층에 비해 작은 값을 갖는 지질 구조로 형성되어 있는 대수층을 피압 대수층이라 정의한다. 또한 대수층의 상부가 지하수위인 경우 비피압 대수층이라 정의하며, 형성되는 지하수위는 대기압과 수압이 같아지는 깊이로 정의된다. 다음의 Fig. 2.10은 비압, 비피압 형태의 대수층을 나타낸다.

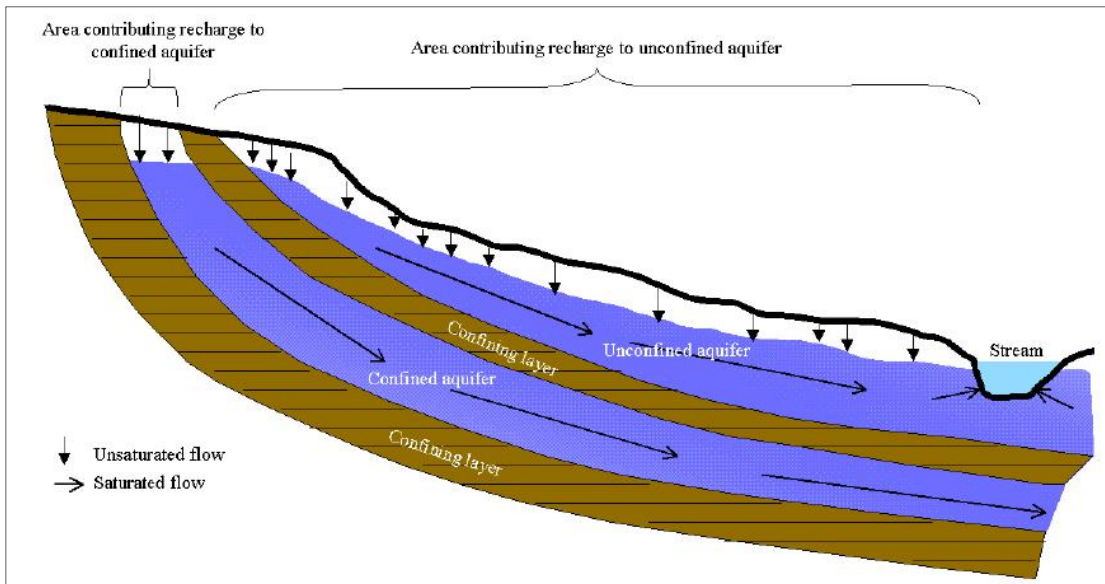


Fig. 2.10 Oppressed/not-oppressed Aquifer (Dingmam 1994)

강우 시 비피압 대수층으로의 함양 과정은 지표면에서 지하수면까지 침투를 통하여 발생하지만 지표면에서 부터 침투과정에 의한 피압 대수층으로의 함양 과정은 피압 대수층의 상류단에서만 발생되며, 상류단에서는 수위가 존재하는 비피압 흐름 특성이 발생하고 대수층을 포함하는 지질학적 구조로 형성된다.

② 얇은 대수층(Shallow Aquifer)

얇은 대수층과 관련된 물수지 식은 다음과 같이 적용되어 산정된다.

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrg} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{deep} - w_{pump.sh} \quad (2.31)$$

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

$aq_{sh,i}$: I일의 얇은 대수층 저류량(mmH_2O)

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

w_{rchrg} : I일의 대수층 함양 수량(mmH_2O)

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

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

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

③ 깊은 대수층(Deep Aquifer)

깊은 대수층과 관련된 물수지 식은 다음과 같이 적용되어 산정된다.

$$aq_{dp,i} = aq_{dp,i-1} + w_{deep} - w_{pump,dp} \quad (2.32)$$

깊은 대수층에서 만일 해당 유역 밖의 물 사용을 위한 수자원 또는 관개용수 등으로 지정되면, SWAT 모형에서는 물의 모양을 모의할 때 깊은 대수층의 총 체적이 제거되도록 모의된다. 이 때 깊은 대수층의 물의 양은 물의 순환 시스템에서 손실로 고려될 수 있으며, 미래의 물수지 계산은 고려되지 않는다.

(5) 토지 피복 및 식물 성장(Land cover & Plant growth)

SWAT 모형은 해당유역의 다양한 종류의 토지피복 상태를 고려하여 모의하기 위해 식물 성장(plant growth)모델이 적용되며 일년생 식물 또는 다년생 식물을 대상으로 각각 다르게 적용된다. 일년생 식물은 작물에 대해 잠재 열단위가 동일할 때까지 성장하며 다년생 식물은 겨울철에는 휴기기에 들어가며, 일지점에 일년 내내 뿌리 조직을 유지하므로 식생물의 성장과정은 대기 중의 온도변화에 의해 휴지기와 성장기를 반복하게 된다.

식물 바이오매스의 잠재 증가조건(Potential growth)은 이상적인 성장조건에서의 바이오매스로 정의되며, 하루를 기준으로 잠재적인 식물 바이오매스의 증가는 하루동안

식물에서 흡수한 에너지를 바이오매스로 전환하는 효율함수로 계산된다. 이 과정에서 에너지의 흡수과정은 일사량과 특정 식물의 엽면적지수(LAI)의 함수로 적용된다.

잡재 식물 성장과 생산량(성장 제약조건; Growth constraints)은 SWAT 모형에서 물과 영양물질, 온도에 의한 스트레스를 평가하며, 주변 환경의 제약조건의 영향으로 대개는 발생하지 않는다.

(6) 침식

유사량과 관련된 침식(erosion)은 1975년 Williams에 의한 MUSLE(수정범용토양침식공식; Modified Universal Soil Loss Equation)이 적용되며 해당구역의 각 HRU에 대해서 추정되어 산정된다. 기존의 USLE방법이 강우를 침식에너지의 지표로 사용하는 반면, 수정범용토양침식공식(MUSLE)은 침식과 유사량을 모의하기 위해 유출총량을 사용하는 점에서 큰 차이가 있다. 수정범용토양침식공식(MUSLE)을 SWAT 모형에 적용함으로써 단일 호우사상을 대상의 유사량 추정과 운송율(delivery ratio)이 필요가 없어졌으며 해당구역에 적용되는 모형의 예측정도를 향상시킬 수 있다. 구축 모형의 각 소유역에 대한 유출 체적, 침투 유출량을 제공하며 침식 에너지 변수를 산정하는데 이용한다.

(7) 영양물질

SWAT 모형은 해당구역의 질소와 인의 이동과 전이를 추적할 수 있다. 토양층의 질소 전이 모의는 질소순환에 의한 지배를 받으며(Fig. 2.11), 인의 전이 모의는 인순환에 의해 조절된다(Fig. 2.12). 또한 영양물질(nutrients)은 해당구역의 주 하천에 유입되고, 측방 지하유출 및 지표면 유출에 의해 하천하류로 운송된다.

SWAT 모형에서는 HRU단위로 수요와 공급의 접근 방법이 적용되어 식물이 질소(Nitrogen)를 사용하는 것으로 추정되며 구축된 토양내의 질소는 저장 공간이 Fig. 2.11 에 설명되어 있다. 또한 물의 흐름에 의하여 질산염과 유기 질소는 토양에서 제거될 수 있다. 침투 및 측방흐름과 유출수에 포함되어진 NO_3-N 총량은 해당구역의 토양층에 포함된 질산염의 평균 농도와 물의 체적의 곱으로 추정한다. 이 과정에서 수정된 부하함수에 적용되고 유사 유기 질소들의 운송이 표현되고, 부하함수는 토양의 상층에 유사량 및 농축률과 유기질소 농도에 의해 일별 유기 질소 유출 손실량이 추정된다. 이 때 농축률은 토양 내의 농도와 유사에 부착된 유기 질

소의 농도를 나누어 농축물이 산정된다.

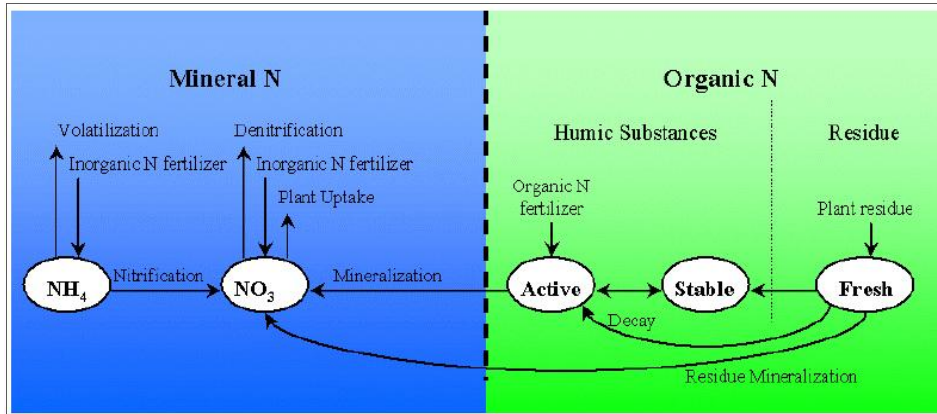


Fig. 2.11 Nitrogen transition process in SWAT

SWAT 모형에서 구축된 각 HRU에서의 여러 가정과 인(Phosphorus)의 다양한 보존 형태는 Fig.2.12와 같이 나타난다.

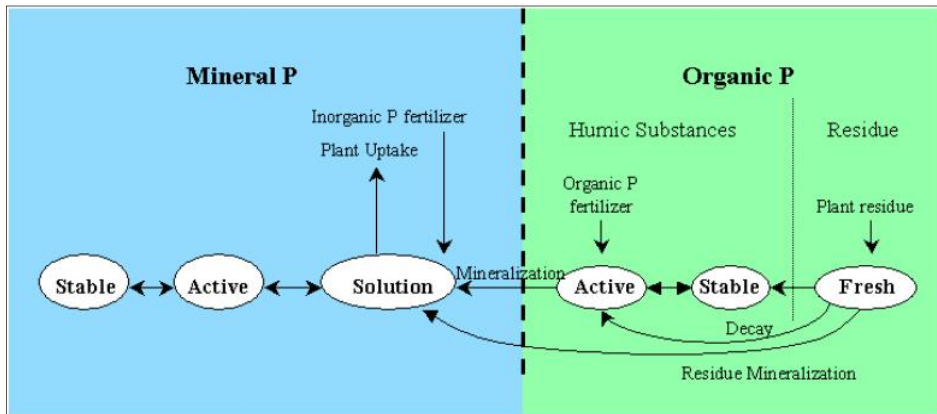


Fig. 2.12 Phosphorus transition process in SWAT

인은 질소와 마찬가지로 공급과 수요의 접근 방법이 적용되어 추정되고, 물의 흐름에 의하여 용해 인과 유기 인은 식물의 사용 외에도 토양으로부터 제거될 수 있다. 그리고 인은 이동영양물질이 아니지만 지표 유출과 토양의 상층 10mm내에 있는 용해 인은 이동될 수 있다.

1.3.3 추적

특정 유역의 주 하천을 기준으로 하천흐름의 추적(routing)은 물 및 유사, 유기 화학물질 및 영양물질 등 네 가지 부분에 대해 모의가 이뤄진다. SWAT 모형에서는 Manning식을 적용하여 유속과 유량을 정의하며, 이 때 유출량은 Muskingum 하도 추적법, 변동저류추적법이 적용되어 유역 내의 하천망을 통해 추적된다. 또한 Muskingum 하도추적법과 변동저류추적법은 운동파(konematic wave) 모형의 변형들이다.

1969년 Williams에 의해 개발된 변동저류추적법(Variable Storage Routing Method)은 특정 유역에 주어진 하도구간에 대해 다음과 같은 식 (2.33)과 같은 연속방정식에 기초를 두고 있다.

$$V_{\in} - V_{out} = \Delta V_{stored} \quad (2.33)$$

여기서, V_{\in} : 시간 간격 동안의 유입량(m^3H_2O)

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

이 식을 시점과 종점에서의 시간 간격 동안의 평균 유입율을 이용한 식으로 전개하면 식 (2.34)가 된다.

$$q_{out,2} = SC \cdot q_{\in,ave} + (1 - SC) \cdot q_{out,1} \quad (2.34)$$

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

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

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

하도 추적에 가장 많이 사용되는 Muskingum 추적법(Muskingum Routing Method)은 대형 저류량은 유출량에만 비례하나 썩기 저류량은 유입량과 유출량의 차에 비례한다고 가정하며 대형저류와 썩기저류의 합으로서 나타낸다. 이러한 가정을 적용하는 대형 저류량은 유량의 함수로 나타내면, $K \cdot q_{out}$ 관계식이 적용되어 썩

기 저류량은 $K \cdot X \cdot (q_{\in} - q_{out})$ 으로 표시 가능하다. 적용되는 X 인자는 유역의 하도 저류량을 결정하는 과정에서 유·출입량의 중요도를 조절하는 가중치를 나타낸다. 다음 총 저류량은 다음과 같은 식 (2.35)으로 나타내어 적용될 수 있고, 식 (2.35)을 연속방정식으로 정리하면 식 (2.36)와 같이 나타낸다.

$$V_{stored} = K \cdot q_{out} + K \cdot X(q_{\in} - q_{out}) \quad (2.35)$$

$$q_{out,2} = C_1 \cdot q_{\in,2} + C_2 \cdot q_{\in,1} + C_3 \cdot q_{out,1} \quad (2.36)$$

여기서, K : 하도에 대한 저류시간 상수(s) , X : 가중치

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

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

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2 \cdot K \cdot X}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t} \quad (2.37)$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2 \cdot K \cdot X}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t} \quad (2.38)$$

$$C_3 = \frac{2 \cdot K \cdot (1 - X) - \Delta t}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t} \quad (2.39)$$

여기서 $C_1 + C_2 + C_3 = 1$ 이다.

2. 지하수 유동해석 모형

2.1 MODFLOW 모형의 개요

GMS(Ground Water Modeling System) 모형은 Brigham Young University's Environmental Modeling Research Laboratory에서 개발하고 EMS-1이 공급하는 지하수 모델링에 적합한 프로그램이며 대표적인 모형에는 MODFLOW, MODPATH,

ART3D, MT3D/RT3D, FEMWATER, SEAM3D, NUFT, UTCHEM, FACT & SEEP2D 등의 모델이 있다(Lee, 2009).

지하수에 관련된 모델링은 해당 지역의 실제 지하수 환경을 근사해로 단순화시켜 표현한 것으로 실제 해당지역의 지하수 유동 및 용질의 이동과 관련된 과거 및 현재의 상황을 분석하고 미래의 예상되는 변화를 예측하는 모든 과정을 의미하며, 복잡한 지하수 유동과 지하수의 수문과정, 지하수의 지화학적 특성 및 오염물질의 거동에 대한 특성 등을 단순화시킨 일종의 수학적인 표현이다. 특정 지역의 지하수 모델링의 구축 목적은 유출량을 예측하고 인접지역에 미치는 영향을 파악하고, 지하 대수층의 시공간적인 수두의 변화량을 모의하고 예측함으로써 이를 사전에 방지하고 최종적으로 지하수의 보전 및 합리적인 관리를 구축하는데 목적이 있다.

현재 범용되는 프로그램은 MODFLOW 프로그램으로써 1987년 미국지질조사소 USGS(United State Geological Survey)의 Michael McDonald와 Arlen Harbough에 의해 개발되었다. MODFLOW의 개발과정은 과거 1987년에 처음으로 개발된 이후 현재까지 지속적으로 보완, 수정작업이 진행되면서 현재는 Waterloo Hydrogeologic 사에 의해 Visual MODFLOW까지 개선되었다. MODFLOW 프로그램의 특징은 특정 지역의 다공질 포화매체 내에서 정류 및 부정류 상태의 유동해석을 모사하고 2차원 또는 3차원의 지하수 흐름을 모사하기 위하여 개발되었다.

Visual MODFLOW는 특정 지역을 대상으로 가장 발전된 형태의 특징을 모델링화할 수 있다. 특히 지하수와 지표수의 상호작용에 대한 분석과, 지하수 추출로 인한 영향 예측, 위험 평가를 위한 잠재 노출 경로의 결정 등에 대한 해석이 가능하다.

현재는 지하수 유동특성에 대한 모델링 외에도 지하수의 유출량 분석 및 거동 예측과 오염된 지하수의 거동예측, 정화시스템설계 및 정화방안 등 환경설계분야에서 주로 이용되고 있으며, 이 외에도 물관리 및 이수분야, 지반공학분야 등에서 폭넓게 사용중이다(Lee, 2009).

2.2 MODFLOW 모형의 방정식

지하 대수층내에서 발생하는 지하수 유동시스템은 대수층내의 지하수 유동 상태를 나타내는 특성인자들은 매우 다양하고 대수층의 형성조건에 따라 시공간적으로 변

동이 매우 심하므로 지하수유동 시스템의 해석에 모두 반영한다는 것은 매우 어려운 문제이므로 이러한 수치해석적인 방법으로 유한차분법을 이용할 수 있다.

유한차분법은 지배방정식에서부터 직접 유한차분식을 유도하고, 격자점과 격자점 사이의 관계에 바탕을 둔 방법으로서 대수층 시스템을 셀 블록(cellblock)에 의해 공간적으로 도시하면 Fig. 2.14와 같다.(Choi, 2015).

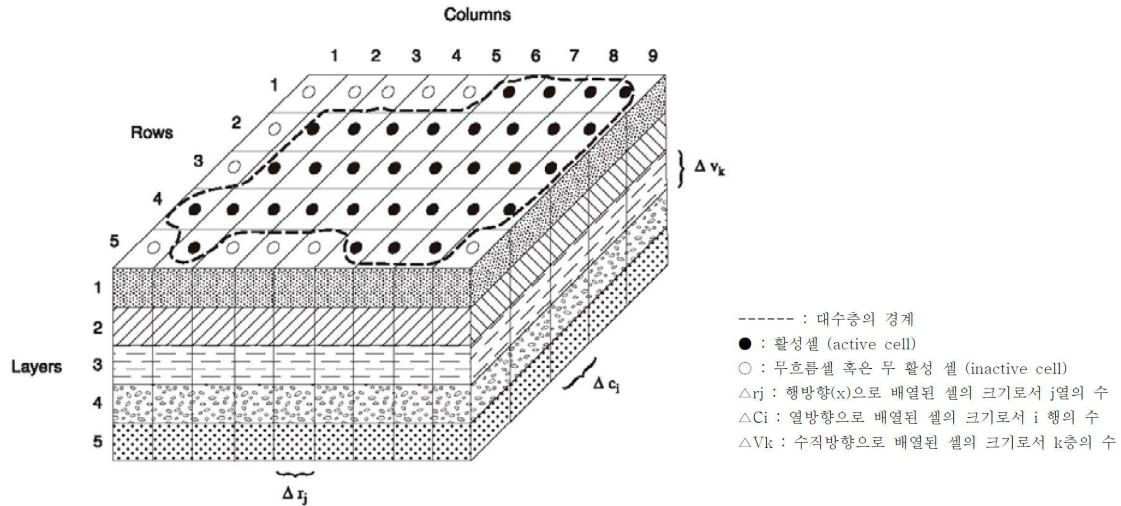


Fig. 2.13 Virtual number stairs model

또한, 등온조건에서 3차원 지하수 부정류 흐름은 다음 식 (2.80)과 같이 편미분 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial h}{\partial z}) \quad (2.80)$$

여기서, K_x, K_y, K_z : x, y, z 축 방향의 투수계수(LT^{-1})

h : 총 수두(L)

W : 대수층의 단위 체적당 sink/source 유량(T^{-1})

S_s : 대수층의 비저류 계수(L^{-1})

MODFLOW는 포화대에서의 지하수 유동을 모의할 수 있으며, 이용되는 지배방정식은 다음과 같은 가정에서 도출된다.

- 모의영역은 포화대이며 대수층은 다공성 매질로 변형되지 않는다.
- 유체는 비압축(incompressible)의 상태이다.
- 지하수 시스템은 등온 조건 아래 있다.

따라서, 식 (2.81)이 본 연구에서 사용된 기본 흐름 방정식이다(Lee, 2009).

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) \quad (2.81)$$

Ⅲ. 연구대상 유역 및 관측자료 분석

1. 연구대상 유역

제주도 하천의 분포특성은 한라산 백록담을 중심으로 방사형 형태를 나타내고 있다. 전체 143개 하천 중 대부분의 하천이 평상시 유출이 발생하지 않는 건천의 형태를 나타내고 있으며 이 중 단 9개소의 하천이 기저유출 형태의 용천수가 흐르는 상시하천의 형태로 발달되었다. 대부분의 하천은 경사가 급한 남·북부 지역에 분포하고 있으며 동·서부 지역은 비교적 경사가 평탄한 용암지대로 이루어져 있어서 상대적으로 하천 발달이 미약한 편이다.

제주도의 지형특성을 고려하여 16개의 수역(한경, 한림, 애월, 서제주, 중제주, 동제주, 조천, 구좌, 성산, 표선, 남원, 동서귀, 중서귀, 서서귀, 안덕, 대정)으로 구분하고 있으며 9개 상시하천 중 4개의 상시하천이 분포하고 있는 제주도 남부의 중서귀 유역을 연구대상유역으로 선정하였다. 특히 중서귀 유역은 제주도 남부 지역에서 인구밀도가 가장 높으며 표면수를 가장 많이 이용하는 지역이므로 제주도의 특수성을 고려한 수문학적 최신 기법의 적용과 연구의 중요성이 매우 높은 지역이다(Fig. 3.1).

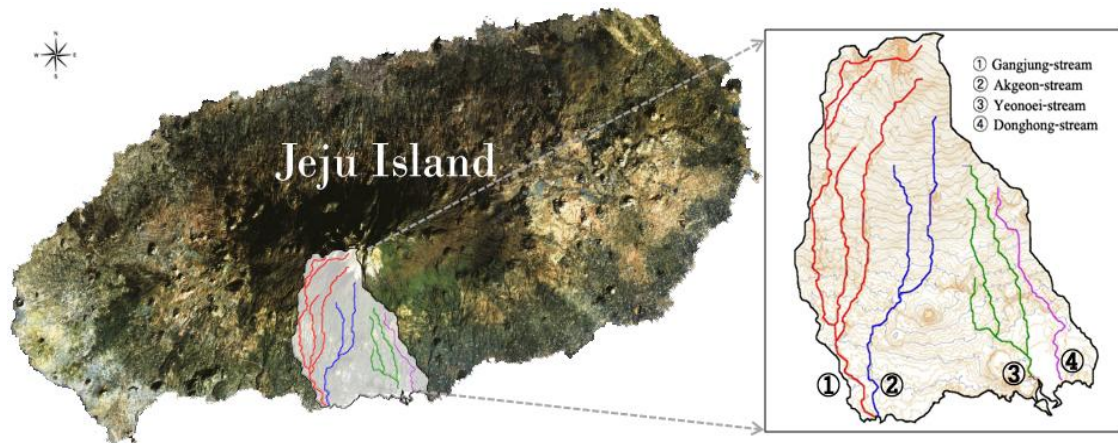


Fig. 3.1 Map of Basin for this study (Mid-Seogwi watershed of Jeju Island)

1.1 유역 형상 및 지형적 특성

연구대상 유역의 제주도 강정천은 한라산 서쪽 능선에서 발원하여 남류하다가 좌안측으로 지방하천인 고지천, 궁산천을 합류한 후 도순동 녹나무 자생지를 지나 강정동 해안으로 유입되는 지방하천으로 동경 $126^{\circ}27' \sim 126^{\circ}30'$, 북위 $33^{\circ}13' \sim 33^{\circ}21'$ 사이에 위치한다. 유로연장은 $16.63km$ 이고 유역면적은 $38.23km^2$ 이며 하상경사는 $1/12 \sim 1/37$ 로 비교적 급경사를 이루고 있으며 상류는 유로전체에 하천유량이 거의 흐르지 않는 건천이지만 하류는 지하수 용출 등으로 인하여 하천유출이 발생되고 있다(제주도, 2009, 하천정비기본계획, 2011).

악근천은 한라산 서쪽 능선에서 발원하여 남류하다가 1115도로를 지나 우안으로 지방하천인 영남천, 세초천을 합류한 후 강정동 해안으로 유입되는 하천으로 동경 $126^{\circ}29' \sim 126^{\circ}32'$, 북위 $33^{\circ}13' \sim 33^{\circ}20'$ 사이에 위치한다. 유로연장은 $12.11km$ 이고 유역면적은 $23.67km^2$ 이며, 하상경사는 $1/17 \sim 1/132$ 로 비교적 급경사를 이루고 있으며 상류는 유로 전체에 표면수가 거의 흐르지 않는 건천이지만 하류는 지하수 용출 등으로 인해 유수를 형성하고 있다(제주도, 2009, 하천기본계획 2011).

연외천은 한라산 정산 백록담(EL.1,950m)에서 동서측으로 약 $2.6km$ 에 위치한 시오름과(EL.760m)과 남동측의 미악산(EL.550m)사이 계곡에서 발원하여 남류하다가 하갯성 지점에 이르러 유로를 형성하면서 서흥교 직상류에서 호근천과 합류한 후 바다로 유입되는 하천으로 동경 $126^{\circ}31' \sim 126^{\circ}34'$, 북위 $33^{\circ}13' \sim 33^{\circ}19'$ 사이에 위치한다. 유로연장은 $12.00km$ 이며 유역면적은 $22.20km^2$ 이고 하상경사는

1/5~1/23 비교적 급경사를 이루고 있으며 상류는 유로전체에 표면수가 거의 흐르지 않는 건천이지만 하류는 지하수 용출 등으로 인하여 하천유출이 발생되고 있다(하천기본계획, 2011).

동홍천은 제주도의 남부에 위치하고 있는 지방하천으로 서귀포시 정방동 정방폭포에서 바다로 직접 유입하고 있으며 동경 126° 31' ~ 126° 34', 북위 33° 14' ~ 33° 20' 사이에 위치한다. 상류 유역은 대부분 산지로 구성되어 있고 중류 유역은 감귤농장으로 구성되어 있으며 하류 지역은 서귀포 시내를 관통한다. 동홍천의 전체 유역면적은 9.40km², 유로연장은 12.10km이며 수원은 한라산의 제3봉인 EL.1,743m 정상에서 발원하여 남쪽으로 약 1.0km 남하한 지점에서 지표면 유출을 시작하며 국립공원 지점에 이르러 하천의 형태를 조금씩 형성하면서 남동류하다 정방폭포에 이르러 바다로 합류되는 하천으로 유로연장에 비해 유역폭이 좁은 수지형 유역으로 전형적인 제주도 하천의 특성을 띠고 있다(하천기본계획, 2011).

Table 3.1 Geological features of the studied basin

구분	유역면적 A(km ²)	유로연장 L(km)	유역평균폭 A/L(km)	형상계수 (A/L ²)	하천등급
강정천 유역	39.22	16.63	2.36	0.14	지방하천
악근천 유역	22.99	17.37	1.32	0.08	지방하천
연외천 유역	19.46	9.06	2.14	0.24	지방하천
동홍천 유역	9.40	12.10	0.78	0.06	지방하천

1.2 유역 표고 및 경사 분석

1.2.1 강정천 유역

강정천 유역을 0m에서 2000m까지 200m 단위로 구분하여 표고 분석한 결과는 0m~200m까지 전체 유역의 12.18%를 차지하고 있으며, 200m~600m 지역은 25.97%, 600m~1000m 지역은 27.54%, 1000m~1400m 지역은 25.77%로 200m~1400m까지

비교적 일정한 간격으로 형성되었음을 확인할 수 있다. 또한 1400m 이상인 지역은 8.55%로 분석되었다(Fig 3.2, Table 3.2).

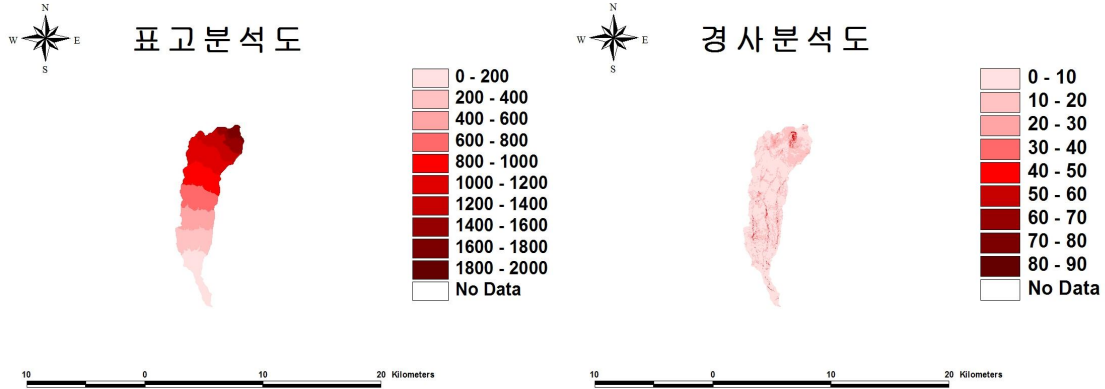


Fig. 3.2 The altitude and slope of Gangjung-stream watershed

Table 3.2 The altitude analysis result of Gangjung-stream watershed

표고범위 (m)	유역면적 (km^2)	비율 (%)	누적 유역면적 (km^2)	누적비율 (%)
0~200	4.78	12.18	4.78	12.18
200~400	5.47	13.95	10.25	26.13
400~600	4.71	12.02	14.96	38.15
600~800	5.36	13.67	20.32	51.82
800~1000	5.44	13.87	25.76	65.69
1000~1200	6.14	15.66	31.91	81.35
1200~1400	3.97	10.11	35.87	91.46
1400~1600	2.22	5.66	38.09	97.12
1600~1800	1.13	2.89	39.22	100.00

강정천 유역의 경사 분석 결과를 보면 10° 이하의 지역이 전체 면적의 61.39%로 가장 높은 비율로 형성되었으며, 10~20°는 31.17%, 20°이상인 지역은 7.44%로 분석되었다(Fig 3.2, Table 3.3).

Table 3.3 The slope analysis result of Gangjung-stream watershed

경사범위 (°)	유역면적 (km^2)	비율 (%)	누적 유역면적 (km^2)	누적비율 (%)
-------------	--------------------	-----------	-----------------------	-------------

0~10	24.08	61.39	24.08	61.39
10~20	12.22	31.17	36.30	92.56
20~30	1.97	5.03	38.27	97.59
30~40	0.65	1.65	38.92	99.24
40~50	0.22	0.56	39.14	99.80
50~60	0.08	0.20	39.22	100.00
60~70	-	-	-	-
70~80	-	-	-	-
80~90	-	-	-	-

1.2.2 약근천 유역

약근천 유역을 0m에서 2000m까지 200m 단위로 구분하여 표고분석한 결과는 0m~200m까지 전체 유역의 21.47%를 차지하고 있으며, 200m~400m 지역은 23.15%, 400m~800m 지역은 30.77%, 800m~1200m 지역은 20.59%로 형성되었음을 확인할 수 있다. 또한 1200m 이상인 지역은 3.66%로 분석되었다(Fig 3.3, Table 3.4).

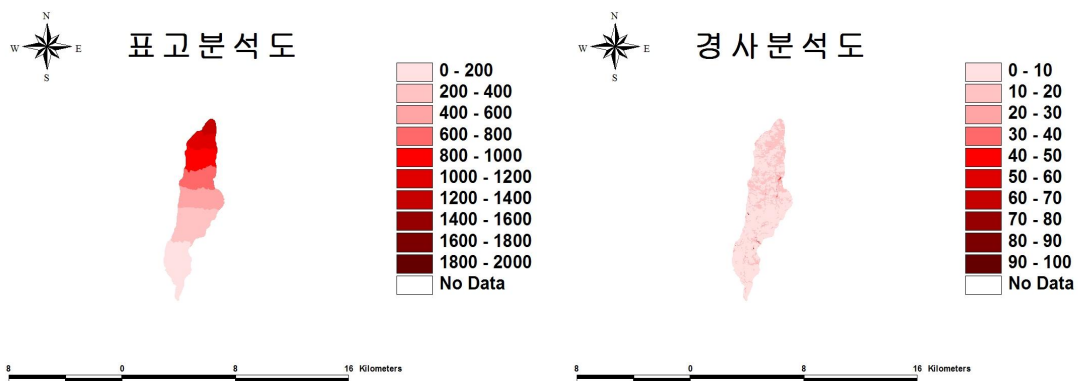


Fig. 3.3 The altitude and slope of Akgeun-stream watershed

Table 3.4 The altitude analysis result of Akgeun-stream watershed

표고범위 (m)	유역면적 (km^2)	비율 (%)	누적 유역면적 (km^2)	누적비율 (%)
0~200	4.94	21.47	4.94	21.47
200~400	5.32	23.15	10.26	44.62
400~600	4.01	17.46	14.27	62.08

600~800	3.06	13.31	17.33	75.39
800~1000	2.83	12.31	20.16	87.70
1000~1200	1.99	8.64	22.15	96.34
1200~1400	0.84	3.66	22.99	100.00
1400~1600	-	-	-	-
1600~1800	-	-	-	-

악근천 유역의 경사 분석 결과를 보면 10° 이하의 지역이 전체 면적의 68.45%로 가장 높은 비율로 형성되었으며, 10~20°는 30.17%, 20°이상인 지역은 1.38%로 분석되었다(Fig 3.3, Table 3.5).

Table 3.5 The slope analysis result of Akgeun-stream watershed

경사범위 (°)	유역면적 (km^2)	비율 (%)	누적 유역면적 (km^2)	누적비율 (%)
0~10	15.74	68.45	15.74	68.45
10~20	6.94	30.17	22.67	98.62
20~30	0.24	1.04	22.91	99.66
30~40	0.08	0.34	22.99	100.00
40~50	-	-	-	-
50~60	-	-	-	-
60~70	-	-	-	-
70~80	-	-	-	-
80~90	-	-	-	-

1.2.3 연외천 유역

연외천 유역을 0m에서 2000m까지 200m 단위로 구분하여 표고 분석한 결과는 0m~200m까지 전체 유역의 31.67%를 차지하고 있으며, 200m~600m 지역은 51.64%, 600m~1000m 지역은 16.15%, 1000m~1200m 지역은 0.54%로 200m~400m까지 비교적 일정한 간격으로 형성되었음을 확인할 수 있다(Fig 3.4, Table 3.6).

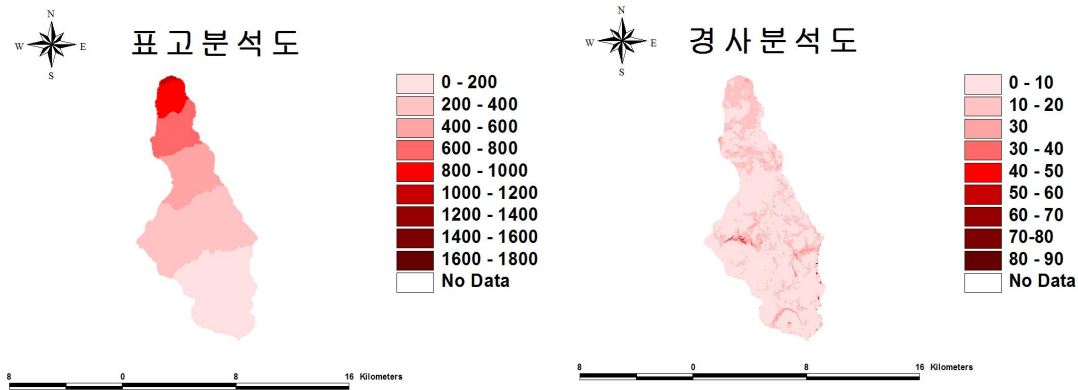


Fig. 3.4 The altitude and slope of Yeonoei-stream watershed

Table 3.6 The altitude analysis result of Yeonoei-stream watershed

표고범위 (m)	유역면적 (km^2)	비율 (%)	누적 유역면적 (km^2)	누적비율 (%)
0~200	6.16	31.67	6.16	31.67
200~400	7.25	37.24	13.41	68.91
400~600	2.80	14.40	16.21	83.31
600~800	2.05	10.54	18.26	93.85
800~1000	1.09	5.61	19.35	99.46
1000~1200	0.11	0.54	19.46	100.00
1200~1400	-	-	-	-
1400~1600	-	-	-	-
1600~1800	-	-	-	-

연외천 유역의 경사 분석 결과를 보면 10° 이하의 지역이 전체 면적의 82.25%로 가장 높은 비율로 형성되었으며, 10~20°는 16.99%, 20°이상인 지역은 0.76%로 분석되었다(Fig 3.4, Table 3.7).

Table 3.7 The slope analysis result of Yeonoei-stream watershed

경사범위 (°)	유역면적 (km^2)	비율 (%)	누적 유역면적 (km^2)	누적비율 (%)
0~10	16.01	82.25	16.01	82.25
10~20	3.31	16.99	19.31	99.24
20~30	0.13	0.65	19.44	99.89

30~40	0.02	0.11	19.46	100.00
40~50	-	-	-	-
50~60	-	-	-	-
60~70	-	-	-	-
70~80	-	-	-	-
80~90	-	-	-	-

1.2.4 동홍천 유역

동홍천 유역을 0m에서 1000m까지 200m 단위로 구분하여 표고 분석한 결과는 0m~200m까지 전체 유역의 48.70%를 차지하고 있으며, 200m~400m 지역은 21.32%, 400m~600m 지역은 23.53%, 600m~1000m 지역은 6.45%로 분석되었다(Fig 3.5, Table 3.8).

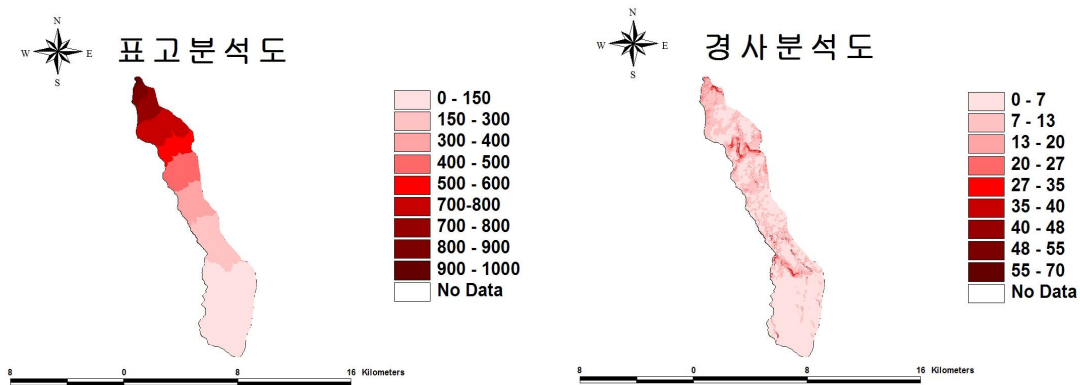


Fig. 3.5 The altitude and slope of Donghong-stream watershed

Table 3.8 The altitude analysis result of Donghong-stream watershed

표고범위 (m)	유역면적 (km ²)	비율 (%)	누적 유역면적 (km ²)	누적비율 (%)
0~200	4.58	48.70	4.58	48.70
200~400	2.00	21.32	6.58	70.02
400~600	2.21	23.53	8.79	93.55
600~800	0.58	6.22	9.38	99.77
800~1000	0.02	0.23	9.4	100.00
1000~1200	-	-	-	-
1200~1400	-	-	-	-

1400~1600	-	-	-	-
1600~1800	-	-	-	-

동홍천 유역의 경사 분석 결과를 보면 10° 이하의 지역이 전체 면적의 87.78%로 가장 높은 비율로 형성되었으며, 10~20°는 11.05%, 20°이상인 지역은 1.17%로 분석되었다(Fig 3.5, Table 3.9).

Table 3.9 The slope analysis result of Donghong-stream watershed

경사범위 (°)	유역면적 (km^2)	비율 (%)	누적 유역면적 (km^2)	누적비율 (%)
0~10	8.25	87.78	8.25	87.78
10~20	1.04	11.05	9.29	98.83
20~30	0.11	1.17	9.40	100.00
30~40	-	-	-	-
40~50	-	-	-	-
50~60	-	-	-	-
60~70	-	-	-	-
70~80	-	-	-	-
80~90	-	-	-	-

2. 현장 관측자료 분석

2.1 하천유출량 분석

2.1.1 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)

ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)는 초음파 속도측정기로써 1980년도에 개발되어 하천 및 해양분야에서 수리동역학적인 특성을 규명하는 능력을 향상시켜 왔다. 운영은 비접촉식으로 3차원 유속과 수심자료를 매우 효율적으로 측정이 가능하며 관측 자료의 공간 및 시간적 해상도는 기존의 전통적인 속도 측정방법과 비교하여 매우 세밀한 특징을 갖는다. 현재 개발·운영되는 유량 관측 기법 중 매우 정

확한 기법으로 알려져 있으며 미국의 경우 지리조사국(USGS; United States Geological Survey)에서 약 57%의 유량 관측소에 설치하여 운영되고 있다(Muste 등, 2007; Kim 등, 2011; Jung, 2013).

ADCP의 원리는 하부에 설치된 음파의 경로(beam)에서 약 200kHz - 3MHz 분포의 초음파를 발사하여 하천의 부유물질에 반사된 음파의 도플러 편차(Doppler effect)를 이용한다. 이때 빔 진행방향의 유속을 2~100cm 단위로 측정하고 각각의 빔에서 측정된 픽셀단위의 유속을 측정된 단면의 관측 셀의 크기에 따라 전체 유량을 산정한다(RDI, 1996; SonTek, 2010; Jung, 2013).

본 연구에서는 SonTek사의 River Surveyer M9이 사용되었으며 특징은 저수심과 고수심에 사용하도록 설계되었고 수심측정기를 별도로 장착한 9개의 빔으로 구성되어 있다(SonTek, 2010).

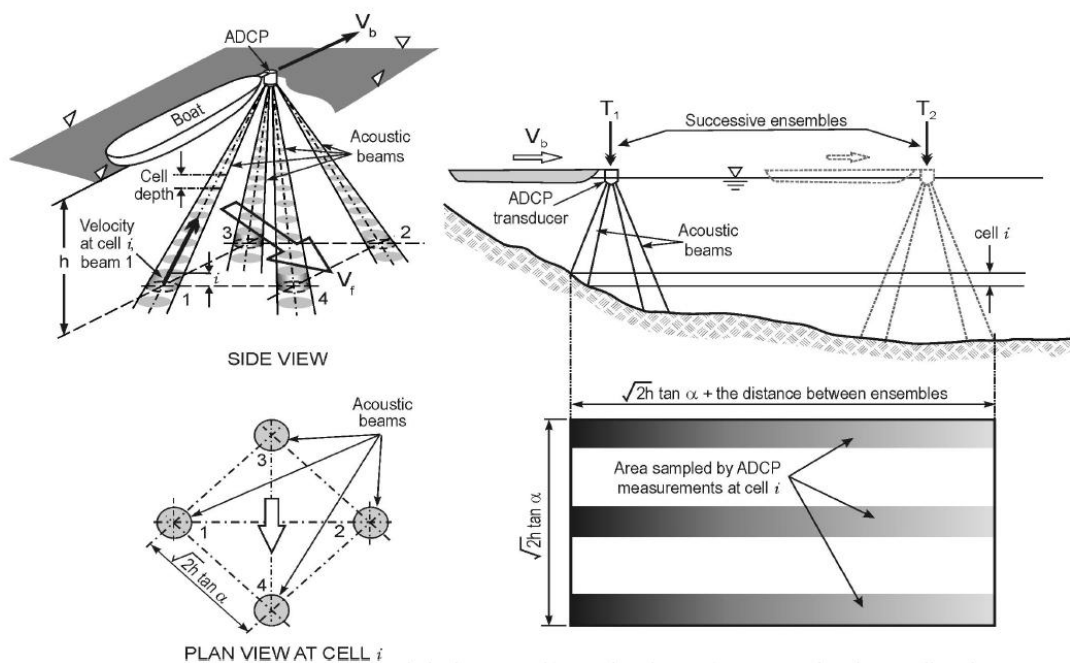


Fig. 3.6 ADCP operating approaches: a) fixed deployment; b) moving boat; c) cross-sectional area directly measured or unmeasured by ADCP (Kim, 2011)



Fig. 3.7 Site application photo of ADCP for discharge observation

2.1.2 ADC(Acoustic Digital Current Meter)

ADC(Acoustic Digital Current Meter)는 초음파식 디지털 유속계로써 유속 관측 지점의 점(point) 유속을 관측하는데 높은 정확도를 나타내는 관측 장비이다. 기존의 접촉식 유속 관측장비 중 프라이스 유속계나 자기식 유속계인 Flo-Mate에 비해 압력식 수위센서가 내장되어 있어 정확한 유속측정과 동시에 수위측정이 가능하다.

ADC의 유속측정 범위는 $-0.2 \sim +2.4m/sec$ 이며 정확도는 $\pm 1\%$ 이다. ADC는 유속을 측정하는 과정에서 동시간의 관측 수위측정과 온도측정이 가능하다. 수위 측정범위는 $0 \sim 5m$ 이며 온도측정범위는 $-5 \sim 35^{\circ}C$ 이다.

본 연구에 사용된 ADC는 점 지점의 유속을 관측하는 접촉식 유속계 장비중에서 가장 발전된 모델이라고 할 수 있으며 강정천, 약근천, 연외천, 동홍천 중 다른 하천에 비해 좁은 하폭과 낮은 수위로 인해 ADCP의 적용이 어려운 동홍천에 적용하였다. 관측된 유속 데이터는 AutoCAD를 활용하여 동시간의 수위를 고려한 적용 단면을 측량하였으며 중앙단면법을 적용하여 유량을 산정하였다.

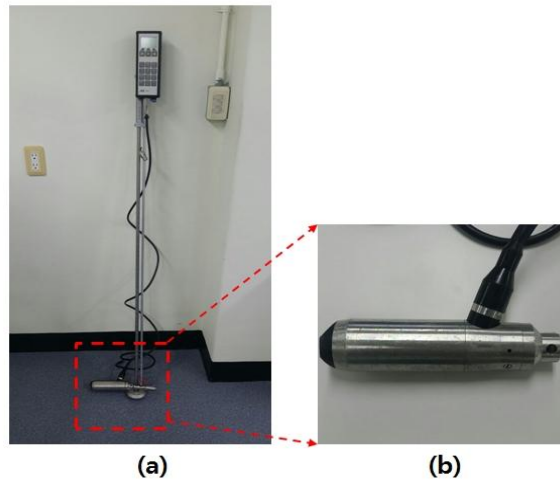


Fig. 3.8 The configuration of velocity observation equipment ADC: a) velocity and water level etc, monitor equipment; b) ADC sensor.

2.1.3 현장 관측지점 및 관측자료 분석

본 연구에서는 제주도 중서귀유역의 상시하천인 강정천과 약근천, 연외천, 동홍천의 하류부에서 2011년 7월부터 2014년 12월까지 월 2회의 ADCP, ADC 유량관측자료를 SWAT모형의 모델링 결과를 보정하는데 사용하였다.

강정천의 ADCP 관측지점은 Fig 3.9의 (a)와 같으며 수집되는 ADCP관측 결과는 Fig3.9의 (d)와 같다. 관측지점의 폭은 약 20m이며 평상시에는 약 80cm 이상의 수위를 유지하고 있다.

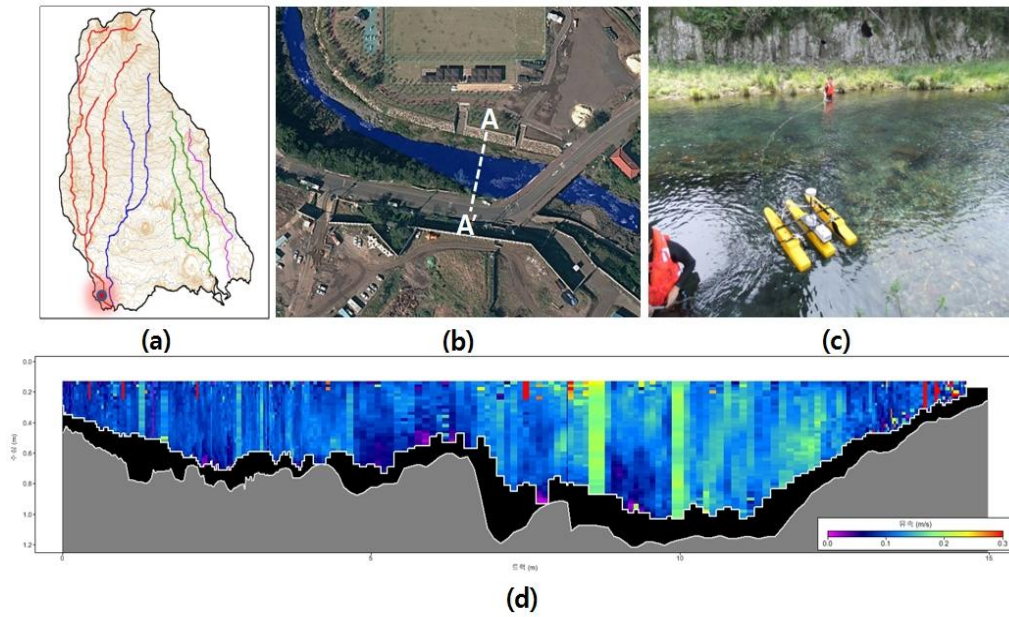


Fig. 3.9 Observation point of the Gangjung-stream: a), b) application point of the ADCP; c) photos of the field application; d) result of the ADCP

약근천 관측지점은 강정천의 ADCP관측 지점에서 북동방향으로 약 466m 지점으로 Fig 3.10의 (a)와 같으며 수집되는 ADCP관측 결과는 Fig 3.10의 (d)와 같다. 관측지점의 하폭은 약 40m이며 평상시에는 약 50cm 이상의 수위를 유지하고 있다.

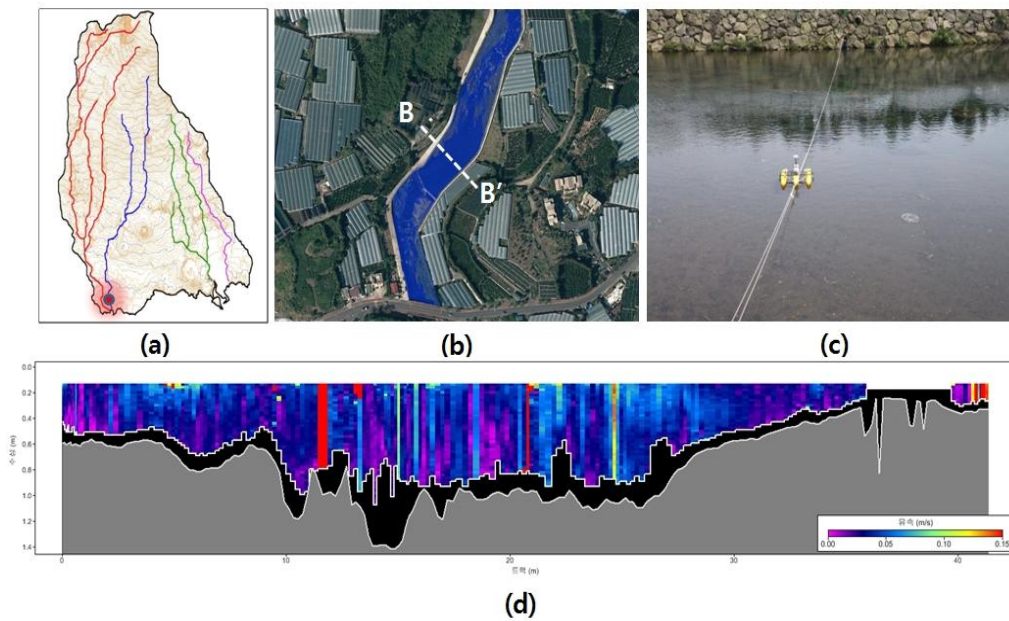


Fig. 3.10 Observation point of the Akgeun-stream: a), b) application point of the

ADCP; c) photos of the field application; d) result of the ADCP

연외천 관측지점은 강정천의 ADCP관측 지점에서 북동방향으로 약 6.45km 지점으로 Fig 3.11의 (a)와 같으며 수집되는 ADCP관측 결과는 Fig3.11의 (d)와 같다. 관측지점의 하폭은 약 21m이며 평상시에는 약 50cm 이상의 수위를 유지하고 있다.

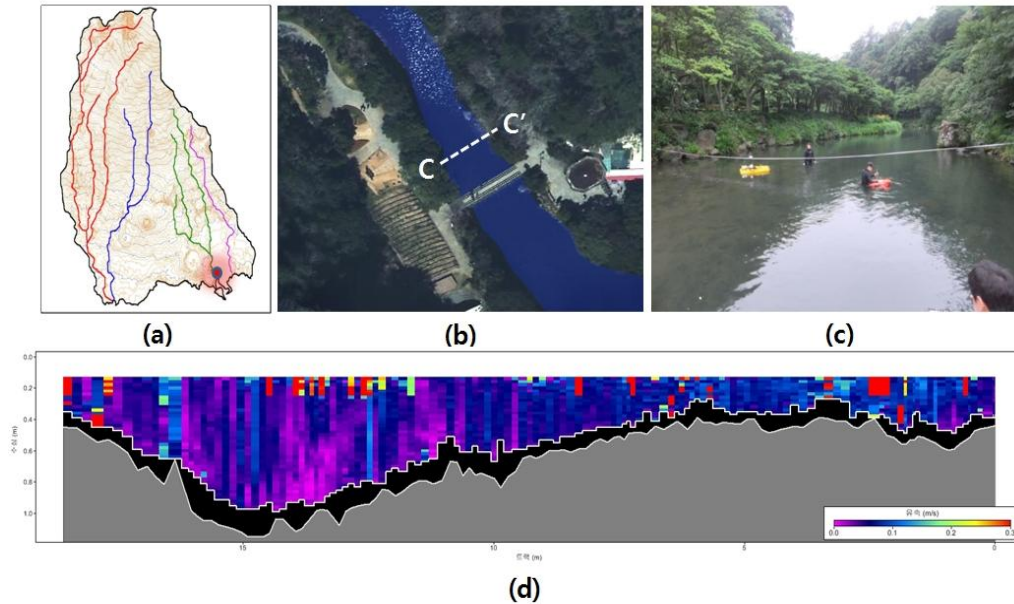


Fig. 3.11 Observation point of the Yeonoei-stream: a), b) application point of the ADCP; c) photos of the field application; d) result of the ADCP

동홍천 관측지점은 연외천의 ADCP관측 지점에서 북동방향으로 약 1.58km 지점으로 Fig 3.12의 (a)와 같다. 관측지점의 하폭은 약 8.5m이며 평상시에는 약 11cm 이상의 수위를 유지하고 있다.

동홍천의 관측지점은 중서귀 지역의 다른 하천에 비해 좁은 하폭과 낮은 수위를 형성하고 있으므로 ADCP를 활용한 현장관측이 적합하지 못하다. 따라서 현존하는 점(point) 지점의 유속을 관측하는 장비 중 가장 정밀도가 높은 ADC를 활용하여 유속과 동시간의 수위를 관측하여 Fig3.11의 (d)와 같이 단면을 구축하고 유량을 산정하였다.

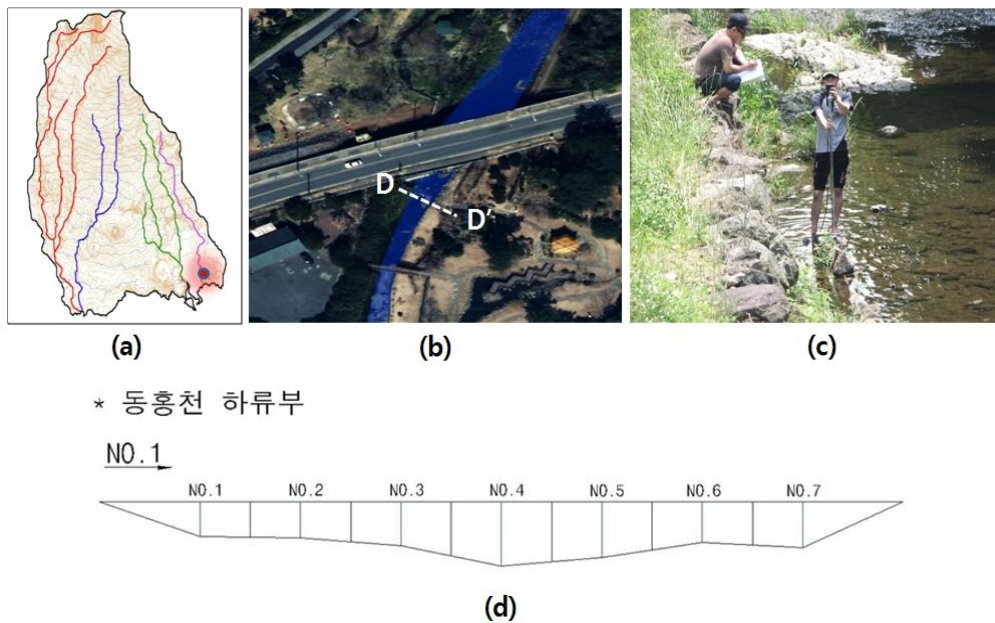


Fig. 3.12 Observation point of the Donghong-stream: a), b) application point of the ADCP; c) photos of the field application; d) result of the ADCP

2011년 7월부터 2014년 12월까지 월 2회의 제주도 중서귀유역의 강정천과 약근천, 연외천, 동홍천을 대상으로 ADCP, ADC 유량관측을 실시하였으며 관측된 유량자료는 SWAT모형의 모델링 결과를 보정하는데 사용하였다.

ADCP를 운영하는 과정에서 강정천과 약근천, 연외천의 고정된 관측지점을 각각 4회씩 왕복하며 유량 측정하였으며 관측된 유량은 관측 당시의 평균 관측값으로 사용하였다.

관측기간 동안 2011년과 2012년에는 6월에서 10월까지 약 9회의 대규모 집중호우와 태풍 내습의 영향이 많은 이유로 수위 및 유량이 전반적으로 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 상대적으로 강우빈도가 적은 11월부터 다음해 5월까지의 수위 및 유량이 감소하는 경향을 나타냈다. 반대로 2013년에는 제주도의 극심한 가뭄의 영향으로 평년에 비해 수위가 30~50% 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 2014년에는 3회의 집중호우와 3회의 태풍 내습의 영향으로 2012년도와 유사한 수위 및 유량결과를 나타내고 있으며, 전체적으로 상시하천인 강정천과 약근천은 당해연도의 강우 빈도에 따라 수위 및 유량이 직접적으로 영향을 나타내는 것으로 보인다. 이 같이 강우 빈도에 따라 상시하천의 수위 및 유량변동에 직접영향을 미치는 결과는 향후 해당 지역의 이수 및 치수에 대한 계획수립 시 이러한 지역특성을 고려할 필요성이

있다.

강정천의 ADCP 유량관측지점과 북동방향으로 약 466m 지점의 약근천의 ADCP 유량관측 결과를 비교하면 비교적 강정천 유역이 약근천 유역에 비해 많은 유량이 관측되었으며 두 관측지점의 평균 유량차이는 최소 $1.39 \times 10^{-7} m^3/sec$ 에서 최대 $2.59 m^3/sec$, 평균 $0.18 m^3/sec$ 의 유량차이를 나타낸다.

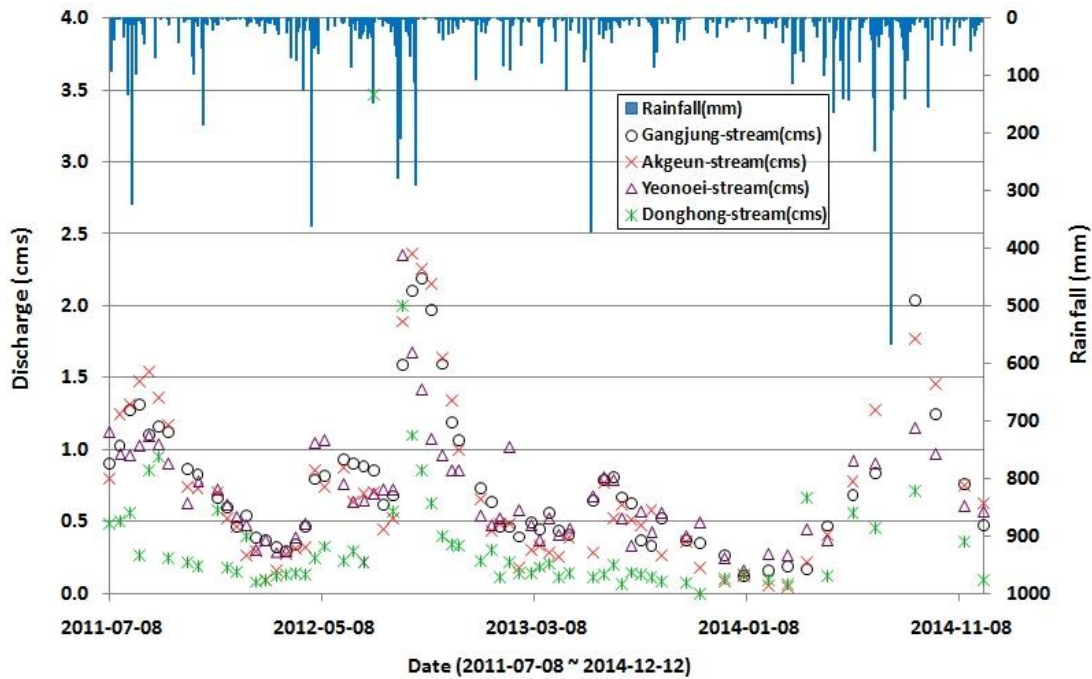


Fig. 3.13 Rainfall and discharge observations of stream

2.2 지하수위 관측자료 분석

중서귀 유역에는 현재 Fig. 3.14(a)와 같이 9개소의 지하수위 관측자료가 수집되어 있다. 이 중 장기적인 지하수위 관측을 목적으로 설치한 관측정은 JM-YH(2010년도부터 측정)와 JD-SH(2011년도부터 측정)에서 관측하고 있으며 나머지 7개소의 지하수위는 개발당시의 관측수위를 나타낸다.

2개소의 장기 관측망 위치는 Fig. 3.14(a)와 같이 중서귀 유역의 하부에 편중되었음을 확인할 수 있다. 이 2개소의 장기 관측자료를 활용하여 유역 단위의 지하수위 분포양상을 분석하기에는 어려움이 있으므로 관측정 외에 7개 관정의 개발당시 수위자료를 이용하여 Fig. 3.14(b)와 같이 Kriging분석을 실시하였다(Fig. 3.14(b)).

Fig. 3.15와 Fig. 3.16은 JM-YH와 JD-SH 관측자료의 시계열에 따른 수위변동을 나타내며 강우의 영향에 따라 증감하는 양상을 나타낸다.

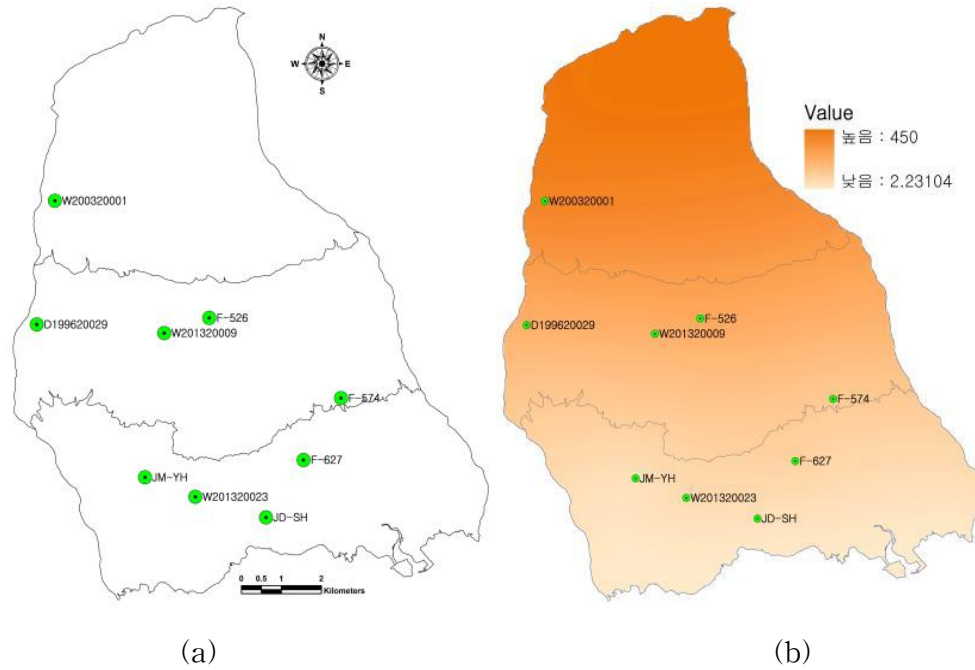


Fig. 3.14 The position of the groundwater level observation well(a), and The results of groundwater level observation analysis(b)

Table 3.10 Coordinates of monitoring groundwater wells

구분	X-좌표	Y-좌표	표고(m)	굴착심도(m)	비고
JD-SH	155676.7	72830.1	69	134.5	
JM-YH	152710.8	73825.3	122	135.0	
F-627	156678.6	74233.5	145	180.0	
W201320023	153996.2	73344.1	99	120.0	
F-574	157603.7	75775.7	236	255.0	
F-526	154305.6	77749.1	450	420.0	
W201320009	153197.9	77402.9	400	300.0	
D199620029	150000.8	77572.5	417	430.0	
W200320001	150473.4	80657.8	765	411.0	

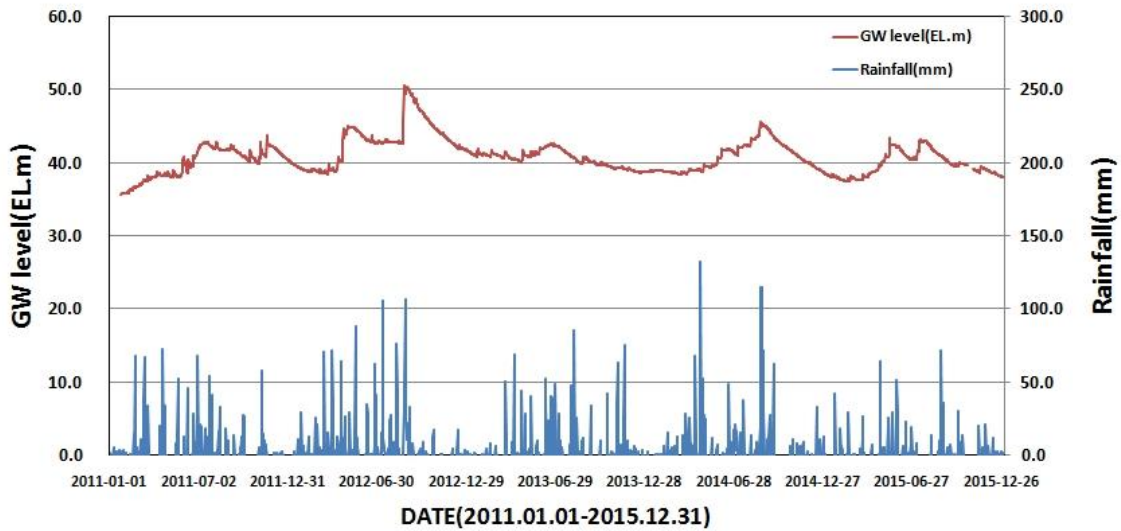


Fig. 3.15 Variation characteristics of long-term groundwater level (JD-SH)

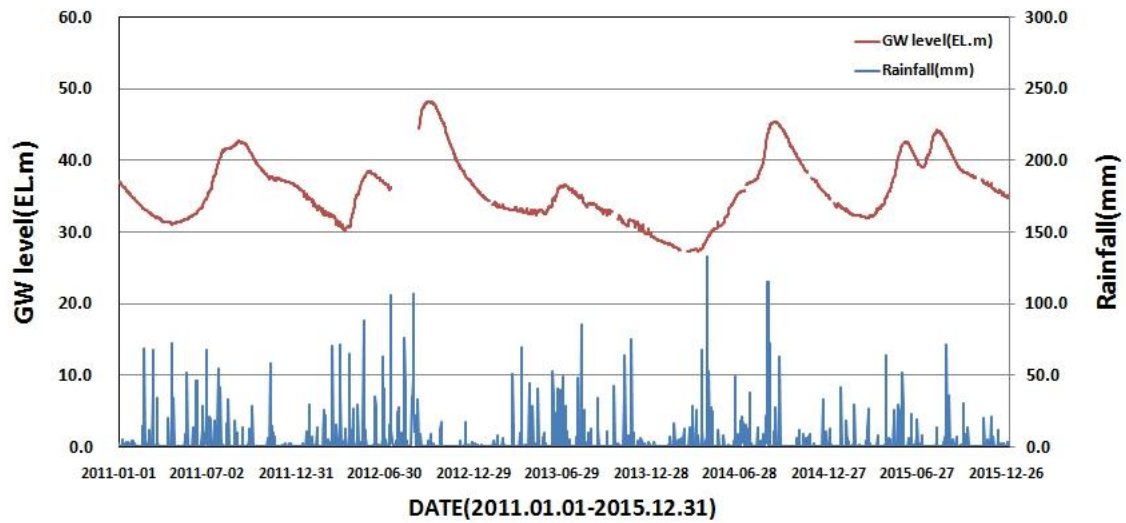


Fig. 3.16 Variation characteristics of long-term groundwater level (JM-YH)

3. 중서귀 유역의 지하수 관정현황

중서귀 유역에는 제주도 전체적으로 분포한 4,824개소의 지하수 관정 중 477개소의 지하수관정이 위치하고 있으며, 공공 지하수 관정 58개소, 사설관정 419개소로 사설관정이 대부분 차지하는 것으로 확인되었다. 사설관정의 경우 대부분 유역의 해안지역과 인접한 지역에 위치해 있으며, 공공지하수 관정은 중산간 및 유역 상부

지역에 위치하는 것으로 확인되었다(Fig. 3.17).

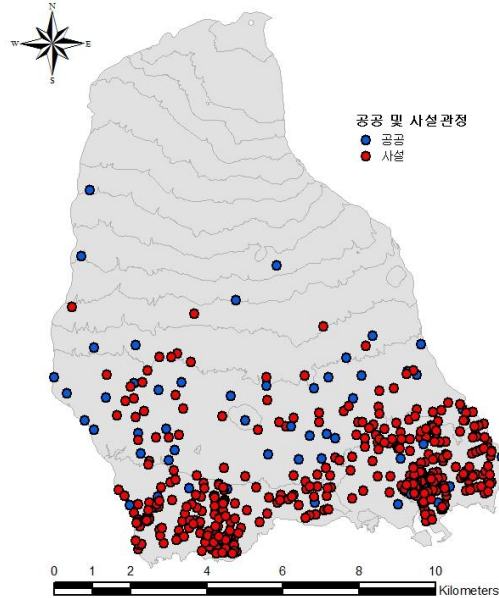


Fig. 3.17 The distribution of groundwater wells in Mid-Seogwi

유역에 위치한 지하수관정별 양수능력은 Fig. 3.18과 같으며, 양수능력 $100\text{m}^3/\text{day}$ 이하의 지하수 관정은 총 79개소로 사설관정이 대부분이다. $100 \sim 200\text{m}^3/\text{day}$ 의 지하수 관정은 294개소, $200 \sim 500\text{m}^3/\text{day}$ 의 관정은 63개소, $500 \sim 1,000\text{m}^3/\text{day}$ 의 관정은 총 32개소로 대부분 공공관정이 차지하고 있다. $1,000 \sim 2,000\text{m}^3/\text{day}$ 의 지하수 관정은 4개소, $2,000\text{m}^3/\text{day}$ 이상의 지하수관정은 공공관정 5개소가 개발된 것으로 확인되었다(Table 3.11). 중서귀유역에는 공공관정 58개소, 사설관정 419개소가 개발 이용중인 것으로 확인되었으며, 이들 관정의 1일 총 양수능력은 $112,455 \text{ m}^3/\text{day}$ 이다. 공공관정 전체의 1일 총 양수능력은 $47,436\text{m}^3$, 사설관정의 총 양수능력은 $65,019 \text{ m}^3$ 이며(Table 3.12), 1공당 평균양수능력은 공공관정이 $818\text{m}^3/\text{day}$, 사설관정이 $155\text{m}^3/\text{day}$ 로 공공관정이 비교적 큰 규모로 개발된 것으로 확인되었다.

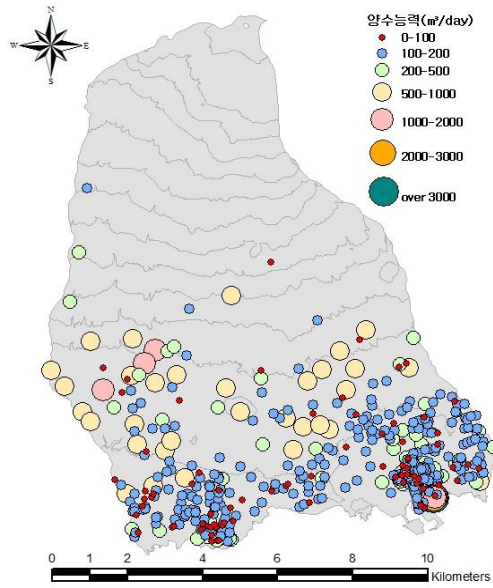


Fig. 3.18 The daily amount of groundwater pumped by wells in Mid-Seogwi

Table 3.11 The daily amount of groundwater pumped by wells in Mid-Seogwi

양수능력(m ³ /day)	공공관정	사실관정	합계
0 - 100	3	76	79
100 - 200	4	290	294
200 - 500	13	50	63
500 - 1,000	31	1	32
1,000 - 2,000	2	2	4
2,000 - 3,000	2	0	2
3,000이상	3	0	3
합계	58	419	477

지하수 사용용도에 따라 구분한 결과 생활용 186개소, 농업용 289개소, 공업용 2개소로 농업용 지하수 관정이 대부분 차지하는 것으로 확인되었다(Fig. 3.19). 생활용 지하수관정의 총 양수능력은 54,333m³/day이며, 농업용 지하수관정의 총 양수능력은 57,785m³/day, 공업용은 337m³/day이다(Table 3.12). 생활용 지하수에 비해 농업용 지하수 관정이 103개소가 더 많이 분포하지만 양수능력의 규모는 유사한 것으로 확인되었다. 생활용 지하수관정의 1공당 평균 양수능력은 818m³/day이며, 농업용

지하수관정의 1공당 평균 양수능력은 155m³/day으로 확인되었다.

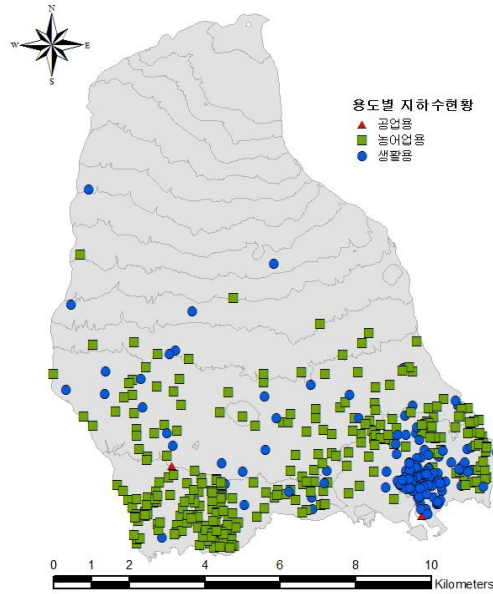


Fig. 3.19 The usage of groundwater in Mid-Seogwi

Table 3.12 The usage of groundwater in Mid-Seogwi

용도	공공관정		사설관정		계	
	공	양수능력 (m ³ /d)	공	양수능력 (m ³ /d)	공	양수능력 (m ³ /d)
생활용	24	27,068	162	27,265	186	54,333
농업용	34	20,368	255	37,417	289	57,785
공업용	0	0	2	337	2	337
합계	58	47,436	419	65,019	477	112,455

IV. 지표수-지하수 유동해석 결과 및 고찰

1. 지하수함양량 추정

1.1 SWAT 모형 입력자료 구축 및 적용

SWAT(Soil & Water Assessment Tool) 모형은 해당 지역의 지형특성 및 토지의 피복상태와 토양의 함수량을 고려하는 준 분포형 모델로써 입력자료는 Table 4.1과 같이 기상 자료와 GIS(Geographic Information System) 자료로 구분하여 구축한다. 사용되는 기상 자료는 강수량 자료, 태양복사량, 최고·최저 기온, 풍속, 습도 등이 사용되며, 분석 지역에 해당되는 기상대 및 AWS(Auto Wather System)의 위치 자료를 동시에 사용한다. 또한 분석 지역의 물리적 특성을 적용하기 위해 제주도의 DEM(Digital Elevation Model) 자료와 토지피복도, 토양도 자료와 같은 GIS 자료와 지역 경계, 제주도 하천의 형태 자료를 구축하여 모델링 분석에 이용한다.

Table 4.1 Weather and GIS data for SWAT model

Weather input data	GIS & Watershed input data
1. Precipitation(Rainfall)	1. DEM(Digital Elevation Model)
2. Max · Min temperature	2. Land use data
3. Solar radiation	3. Soil data
4. Average wind-speed	4. Watershed data
5. Humidity	5. Stream shape data

1.1.1 연구 대상지역의 기상자료 구축 및 분석

SWAT 모형을 어떠한 대상지역에 적용하기 위해서는 각각의 소유역(sub-basin)에 대한 기상자료가 매우 중요한 입력 자료로서 사용되지만, 세분화된 소유역에 해당되는 각각의 기상자료 구축은 현실적으로 불가능하다. 따라서 SWAT 모형에서는

각 소유역에 인접한 기상관측소(기상대, AWS)의 자료를 구축하여 각 유역별 기상 입력자료로 사용된다.

현재 제주도의 기상특성 및 강우량 관측 현황은 제주, 서귀포, 성산포, 고산 지역에 제주도기상청 관할의 4개 지점 기상대가 설치되어 운영되고 있으며, 자동강우량 관측 시스템인 AWS(Auto Weather System) 21개소를 운영하고 있다. 또한 제주특별자치도 재난안전대책본부에서 48개소의 강우관측소를 운영하고 있다(제주특별자치도, 2014).

본 연구에서 제주도 중서귀 유역을 대상으로 SWAT 모델을 적용하기 위해 입력 자료로 구축한 기상자료는 2003년 01년 01일부터 2015년 12월 31일까지 자료이며, 이 중 일 강우량 자료는 어리목, 진달래밭, 윗세오름, 회수, 중문, 서귀포의 5개 AWS(Auto Weather System)와 1개의 서귀포 기상대 관측자료를 사용하였다. 일 강우량 자료 이외에도 최고·최저 기온과 태양복사량, 평균풍속, 습도의 자료는 1개의 서귀포 기상대 자료를 입력자료로 구축하였다.

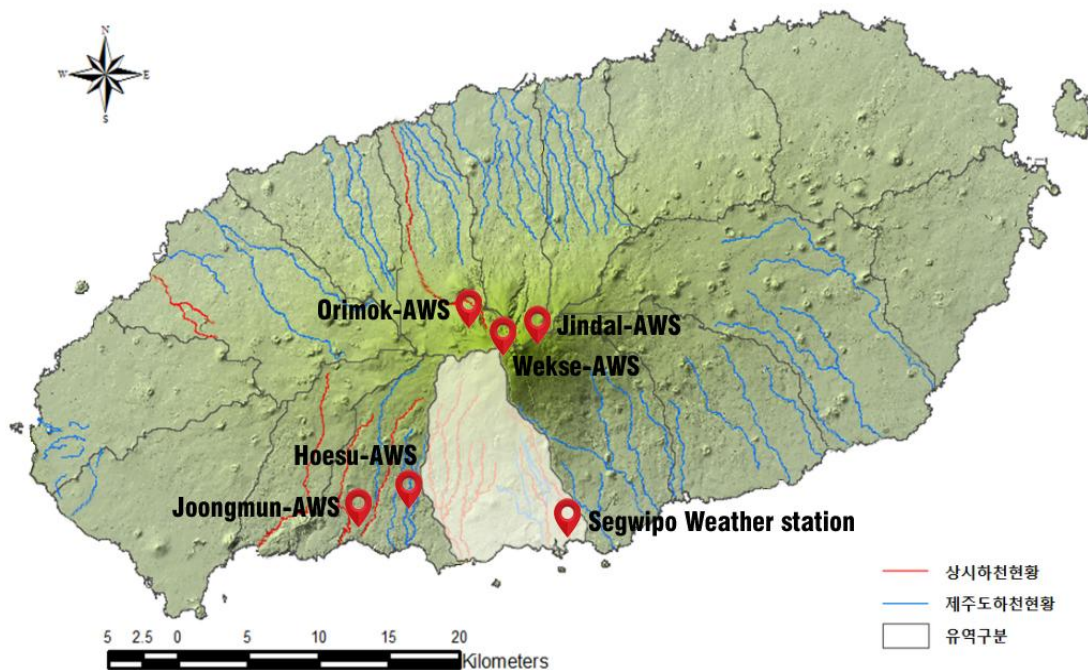


Fig. 4.1 The Location of meteorological observatories and AWS

Table 4.2 Locations of meteorological posts of the studiedbasins

Observatin post (ID)	Name	X-PR	Y-PR	Elevation (m)
Weather station (189)	Seogwipo	159404.9	-27739.3	49.0
AWS (871)	Wekse	155010.1	-14857.8	1179.0
AWS (330)	Hoesu	148593.3	-24776.9	226.0
AWS (753)	Orimok	152891.5	-11461.4	968.3
AWS (870)	Jindal	158553.4	-14020.0	1489.4
AWS (328)	Joongmun	144568.1	-27239.4	60.9

Table 4.3 Applied date and input data form

Climate Input data	Observatin post	Data form		Applied date
		Climate	Location	
Rainfall	Wekse-AWS	Wekse_P.dbf	Pa_P.dbf	2003.01.01 ~ 2015.12.31
	Hoesu-AWS	Hoesu_P.dbf		
	Orimok-AWS	Orimok_P.dbf		
	Jindal-AWS	Jindal_P.dbf		
	Joongmun-AWS	Joongmun_P.dbf		
	Seogwipo Weather station	Seogwi_P.dbf		
Max · Min temperature	Seogwipo Weather station	Seogwi_C.dbf	Pa_C.dbf	
Solar radiation	Seogwipo Weather station	Seogwi_S.dbf	Pa_S.dbf	
Average wind-speed	Seogwipo Weather station	Seogwi_W.dbf	Pa_W.dbf	
Humidity	Seogwipo Weather station	Seogwi_H.dbf	Pa_H.dbf	

본 연구에서 SWAT 모델에 적용하기 위한 데이터 형식은 1개소 기상대와 5개소의 AWS 일 강수량 자료가 이용되므로 강수량 자료는 각각 Seogwi_P.dbf,

Wekse_P.dbf, Hoesu_P.dbf, Orimok_P.dbf, Jindal_P.dbf, Joongmun_P.dbf의 데이터 베이스 형태로 구축하였으며, 강우량의 기상 자료는 서귀포 기상대 1개소의 자료를 적용하여 최고·최저 기온은 Seogwi_C.dbf, 태양복사량은 Seogwi_S.dbf, 평균풍속은 Seogwi_W.dbf, 습도는 Seogwi_H.dbf로 구축하였다.

구축된 점(point) 형태의 기상 입력자료는 SWAT 모델에서 관측위치를 기준으로 해당구역의 영향범위가 고려되어야 하므로 각 관측소(기상대, AWS)의 위치정보가 맞물려서 모델링이 이루어져야 한다. 위치정보를 나타내는 입력자료의 구축방법은 Table 4.3과 같으며 구축된 기상자료와 위치정보가 연관되어 분석될 수 있도록 파일명과 데이터 베이스 형식을 강우량은 Pa_P.dbf, 최고·최저 기온은 Pa_C.dbf, 태양복사에너지는 Pa_S.dbf, 평균풍속을 Pa_W.dbf, 습도를 Pa_H.dbf로 구축한다.

(1) 강우량자료 분석

SWAT 모델을 적용하고 함양량을 추정하기 위해 제주도 중서귀 지역에 인접한 6개소(어리목, 윗세오름, 진달래밭, 중문, 회수, 서귀포)의 일 강우량 자료는 모델링 결과에 많은 영향을 미치므로 매우 중요한 입력인자로 사용된다. 구축된 일 강우량 자료는 2003년 1월 1일부터 2015년 12월 31일까지 SWAT 모델에 지정하여 적용하였다. SWAT 모델에서는 일 강우량자료를 이용하므로 기본적인 강우량 분석방법을 적용하지 않고 연도별, 월별 강우 패턴을 분석하였다.

중서귀 지역에 인접한 6개소의 강우량 자료를 SWAT 모델 적용기간(2003년~2015년)을 기준으로 연도별 총 강우량을 비교·분석한 결과는 Fig 4.2, Table 4.4와 같다.

수집된 강우량 중 13개년 연도별 평균 강우량은 진달래밭 AWS에서 5,217.31mm로 가장 높은 관측값을 나타냈으며 중문 AWS에서 1,728.88mm로 가장 낮은 관측값을 나타냈다. 연도별 최대 강우량은 2012년 진달래밭 AWS에서 7,317.0mm로 관측되었으며, 최소 강우량은 2013년 서귀포 기상대에서 1,086.60mm로 관측되었다. 또한 고위도에 위치한 어리목, 윗세오름, 진달래밭의 13개년 평균 강우량이 4,466.10mm으로 나타났으며, 상대적으로 저위도에 위치한 중문, 회수, 서귀포는 2,014.19mm로 분석되어 2,451.92mm의 강우량 차이를 나타냈다.

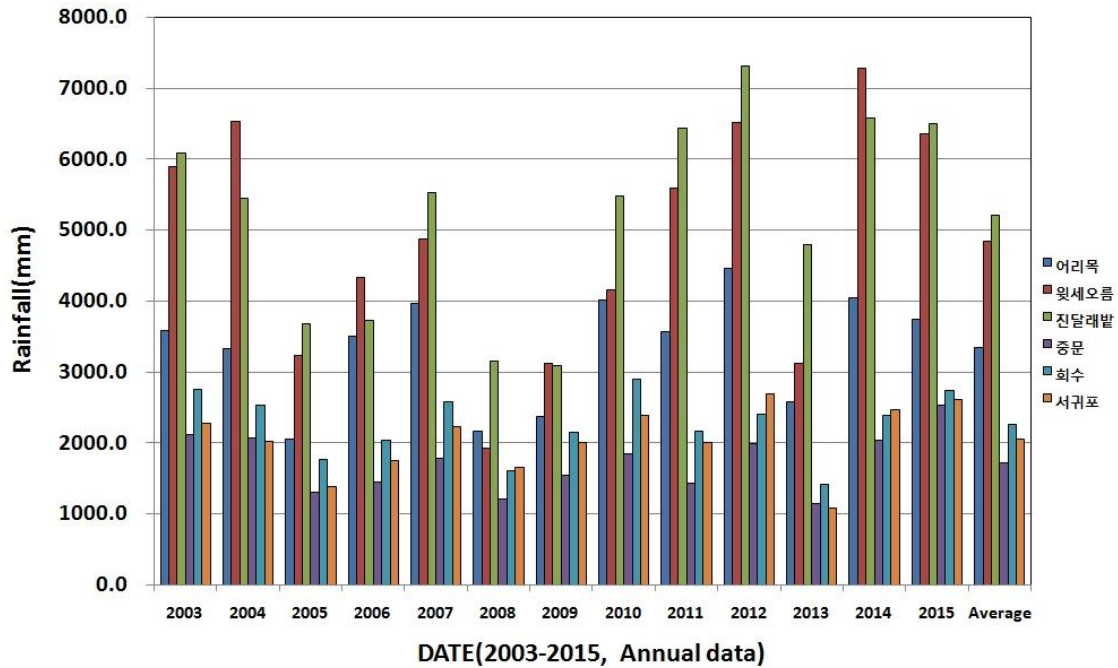


Fig. 4.2 Annual rainfall data at six observation points (2003-2015)

Table 4.4 Annual rainfall data at six observation points (2003-2015)

DATE (Years)	Annual rainfall data					
	Orimok	Wekse	Jindal	Jongmun	Hoesu	Seogwi
2003	3592.00	5894.50	6080.00	2120.50	2758.00	2280.60
2004	3332.50	6529.50	5449.00	2079.50	2535.00	2018.00
2005	2062.50	3233.50	3679.50	1309.00	1774.00	1390.60
2006	3505.50	4335.00	3734.00	1447.00	2039.50	1757.60
2007	3962.50	4869.50	5522.50	1780.50	2578.50	2238.80
2008	2163.50	1923.00	3149.50	1213.00	1605.50	1661.40
2009	2367.50	3121.50	3087.00	1548.00	2150.00	2006.80
2010	4014.50	4159.50	5483.00	1843.00	2903.50	2393.30
2011	3574.00	5598.50	6437.00	1433.50	2161.00	2010.50
2012	4459.00	6514.50	7317.00	1990.50	2400.50	2700.80
2013	2576.50	3120.50	4793.50	1142.50	1416.00	1086.60
2014	4054.50	7282.00	6585.00	2034.00	2382.50	2473.20
2015	3747.50	6359.50	6508.00	2534.50	2738.50	2617.10
Total average	3339.38	4841.62	5217.31	1728.88	2264.81	2048.87

6개소 관측소의 월 강우 패턴을 분석한 결과는 Fig 4.3~Fig 4.16와 Table 4.4~Table 4.17과 같으며 전체 적용 기간의 월 평균 강우 패턴을 분석한 결과는 Fig

4.16와 Table 4.18와 같다.

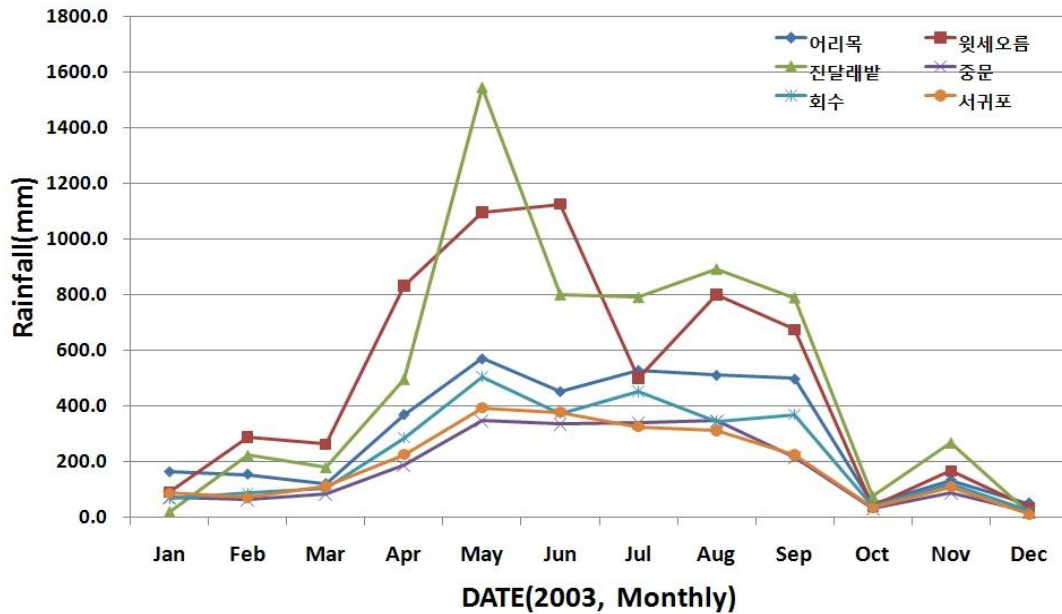


Fig. 4.3 Monthly rainfall data at six observation points (2003)

Table 4.5 Monthly rainfall data at six observation points (2003)

DATE (2003, Month)	Monthly rainfall data					
	Orimok	Wekse	Jindal	Joongmun	Hoesu	Seogwi
January	162.50	88.50	19.00	71.50	66.00	86.40
February	154.00	287.50	221.00	61.50	85.00	70.00
March	120.00	260.50	178.00	82.50	104.00	113.20
April	368.50	830.00	495.00	186.50	284.00	225.00
May	569.50	1094.50	1544.00	348.00	504.00	392.00
June	451.50	1123.50	799.50	334.50	372.50	377.00
July	527.50	499.50	789.50	340.50	450.50	325.80
August	510.00	798.00	891.50	347.50	343.50	310.60
September	496.50	673.50	788.00	214.50	368.00	223.30
October	49.00	39.00	74.00	30.50	39.50	36.00
November	132.50	166.00	266.50	85.50	118.50	109.50
December	50.50	34.00	14.00	17.50	22.50	11.80

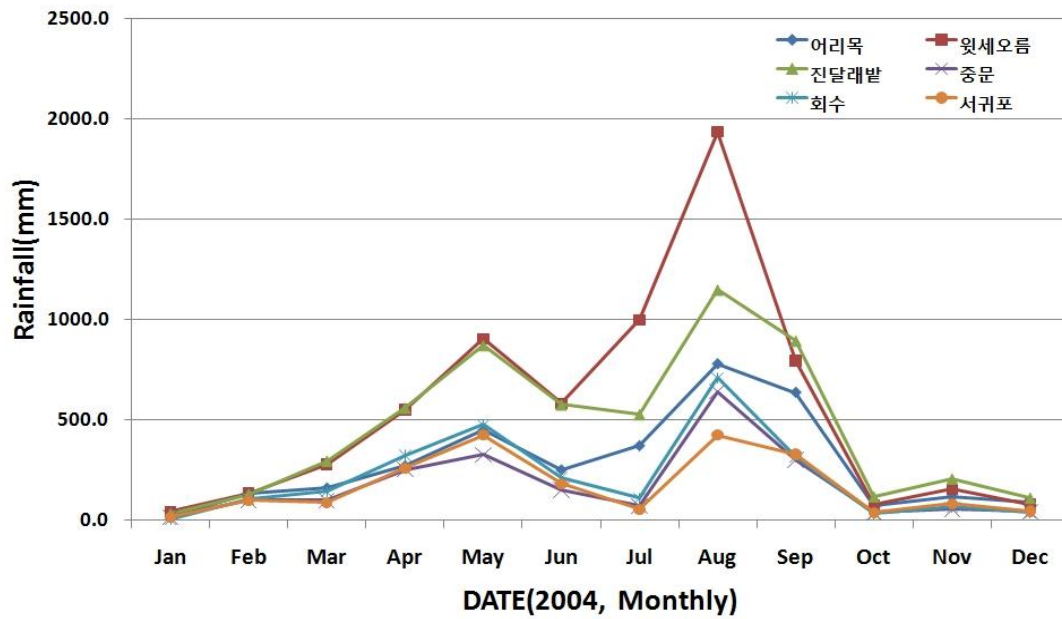


Fig. 4.4 Monthly rainfall data at six observation points (2004)

Table 4.6 Monthly rainfall data at six observation points (2004)

DATE (2004, Month)	Monthly rainfall data					
	Orimok	Wekse	Jindal	Joongmun	Hoesu	Seogwi
January	14.00	44.00	31.50	15.50	5.00	15.60
February	130.00	134.00	128.50	97.00	105.50	97.10
March	159.50	279.00	294.00	98.00	143.00	87.00
April	270.50	551.50	558.00	251.00	323.50	257.60
May	449.00	903.00	869.50	325.50	473.50	420.70
June	250.00	582.50	574.00	151.00	212.00	180.40
July	370.50	998.00	525.50	70.50	109.50	52.90
August	779.50	1932.00	1147.00	639.00	709.00	420.50
September	637.00	796.00	892.50	299.50	316.00	325.50
October	69.00	77.50	115.00	35.00	35.00	35.70
November	117.00	153.00	204.50	54.00	66.00	81.10
December	86.50	79.00	109.00	43.50	37.00	43.90

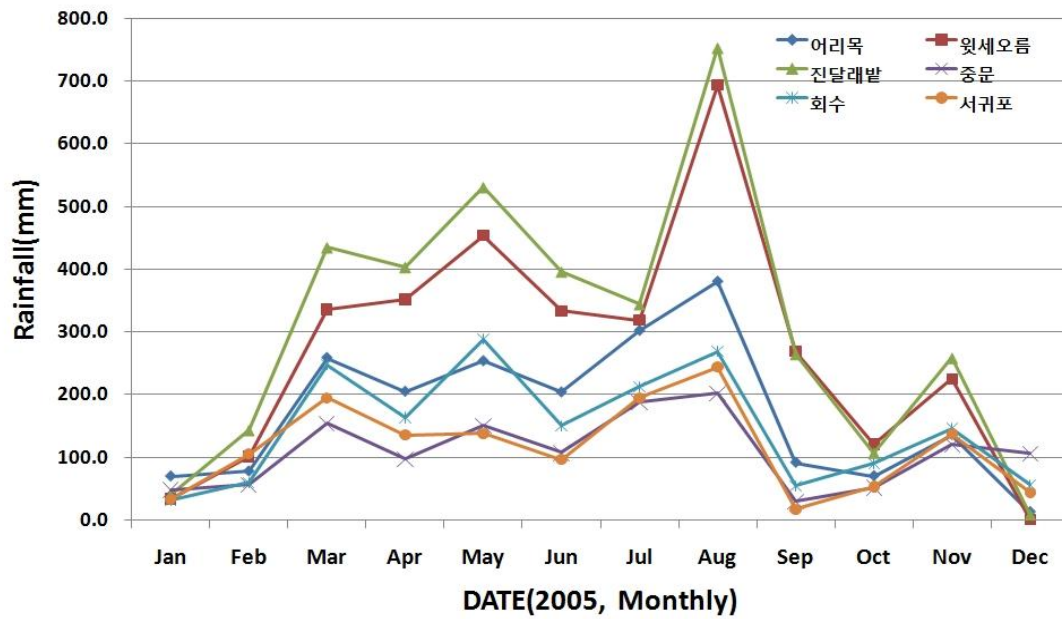


Fig. 4.5 Monthly rainfall data at six observation points (2005)

Table 4.7 Monthly rainfall data at six observation points (2005)

DATE (2005, Month)	Monthly rainfall data					
	Orimok	Wekse	Jindal	Jongmun	Hoesu	Seogwi
January	69.50	33.50	40.50	48.00	32.00	32.80
February	77.50	101.00	142.50	56.50	60.50	104.90
March	259.00	335.50	434.50	154.50	248.00	194.60
April	205.00	351.50	403.00	96.50	163.50	135.50
May	254.00	453.00	530.50	150.00	288.50	137.70
June	204.00	333.00	395.50	107.00	151.00	96.30
July	302.50	318.50	343.50	187.50	213.00	194.70
August	381.00	693.00	753.00	202.00	269.50	243.50
September	91.50	268.50	264.00	29.50	54.50	17.00
October	70.00	120.50	106.50	51.50	90.50	53.30
November	136.00	224.50	258.00	120.00	146.50	137.00
December	12.50	1.00	8.00	106.00	56.50	43.30

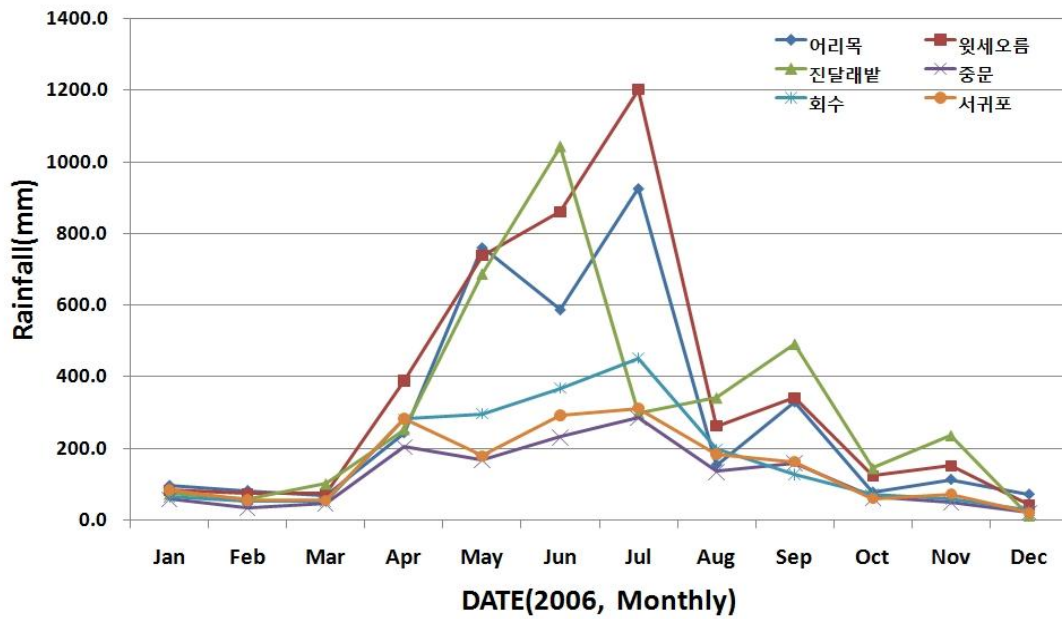


Fig. 4.6 Monthly rainfall data at six observation points (2006)

Table 4.8 Monthly rainfall data at six observation points (2006)

DATE (2006, Month)	Monthly rainfall data					
	Orimok	Wekse	Jindal	Jongmun	Hoesu	Seogwi
January	95.50	82.00	72.50	58.00	62.50	83.70
February	81.00	73.50	57.50	32.50	51.50	56.20
March	69.00	73.00	100.50	44.50	50.50	54.20
April	243.00	388.50	253.00	204.50	281.00	282.80
May	760.50	738.00	687.00	166.50	295.50	178.70
June	587.00	860.50	1043.00	231.00	367.50	292.00
July	926.00	1201.50	298.00	285.00	451.00	311.30
August	153.50	262.00	340.50	134.50	197.50	183.00
September	329.50	340.50	491.00	159.00	127.00	162.20
October	77.00	122.00	144.00	63.00	71.50	60.00
November	112.50	151.00	235.50	47.50	57.50	72.40
December	71.00	42.50	11.50	21.00	26.50	21.10

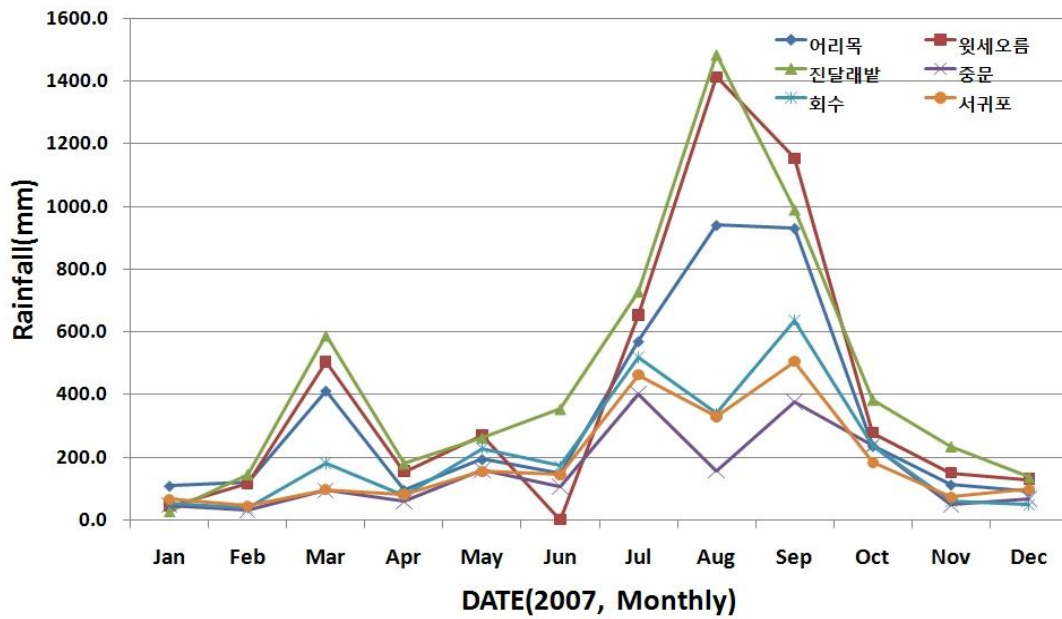


Fig. 4.7 Monthly rainfall data at six observation points (2007)

Table 4.9 Monthly rainfall data at six observation points (2007)

DATE (2007, Month)	Monthly rainfall data					
	Orimok	Wekse	Jindal	Jongmun	Hoesu	Seogwi
January	108.50	43.00	28.50	46.50	52.00	65.70
February	120.50	116.50	146.50	30.50	37.00	44.60
March	412.50	504.00	588.50	93.00	180.50	96.40
April	95.00	155.00	180.00	58.50	75.50	81.00
May	193.50	271.50	262.50	159.00	227.50	154.00
June	150.00	1.00	354.50	106.50	172.00	144.40
July	570.00	653.50	729.50	401.50	518.00	464.20
August	941.00	1413.00	1485.00	156.50	339.00	330.10
September	931.00	1154.00	991.00	375.50	636.50	506.10
October	236.00	277.00	384.00	238.00	237.00	183.00
November	112.50	151.00	235.50	47.50	57.50	72.40
December	92.00	130.00	137.00	67.50	46.00	96.90

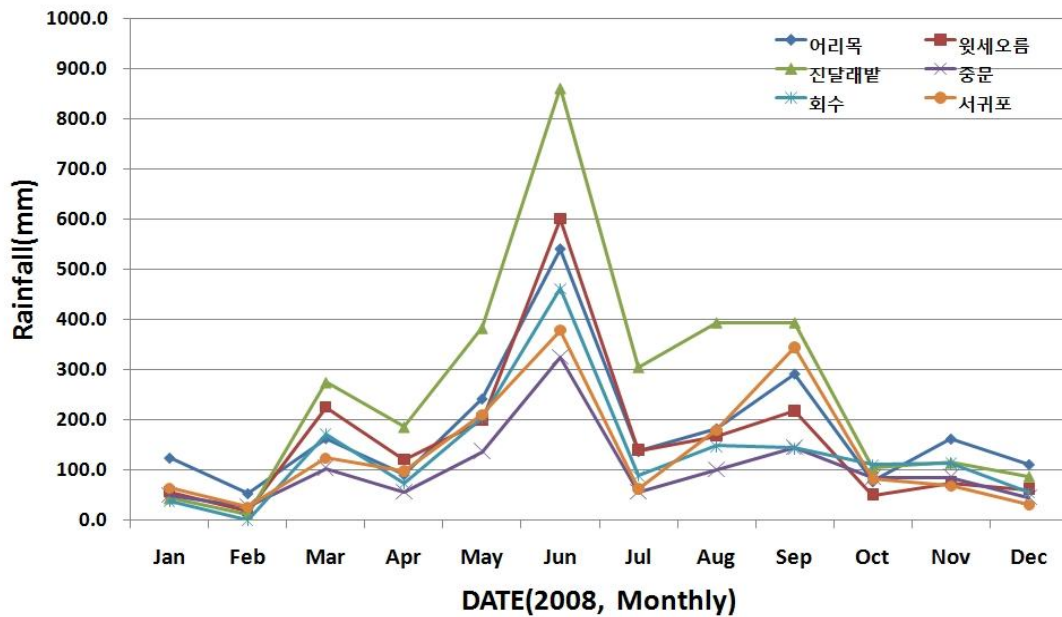


Fig. 4.8 Monthly rainfall data at six observation points (2008)

Table 4.10 Monthly rainfall data at six observation points (2008)

DATE (2008, Month)	Monthly rainfall data					
	Orimok	Wekse	Jindal	Jongmun	Hoesu	Seogwi
January	123.00	55.00	42.50	48.50	38.00	63.00
February	52.00	18.00	10.00	27.00	0.00	26.10
March	162.00	224.50	274.00	103.50	171.50	123.60
April	89.50	119.50	185.00	56.00	73.00	97.50
May	241.00	198.00	382.50	137.00	204.00	209.90
June	540.50	600.00	861.50	325.00	461.00	377.30
July	136.00	139.00	304.50	56.00	89.00	62.10
August	181.50	167.00	393.50	100.00	147.50	178.50
September	291.00	217.00	393.50	145.50	143.00	343.20
October	76.00	50.00	102.50	84.50	110.00	82.30
November	161.00	74.00	113.50	85.50	114.00	67.30
December	110.00	61.00	86.50	44.50	54.50	30.60

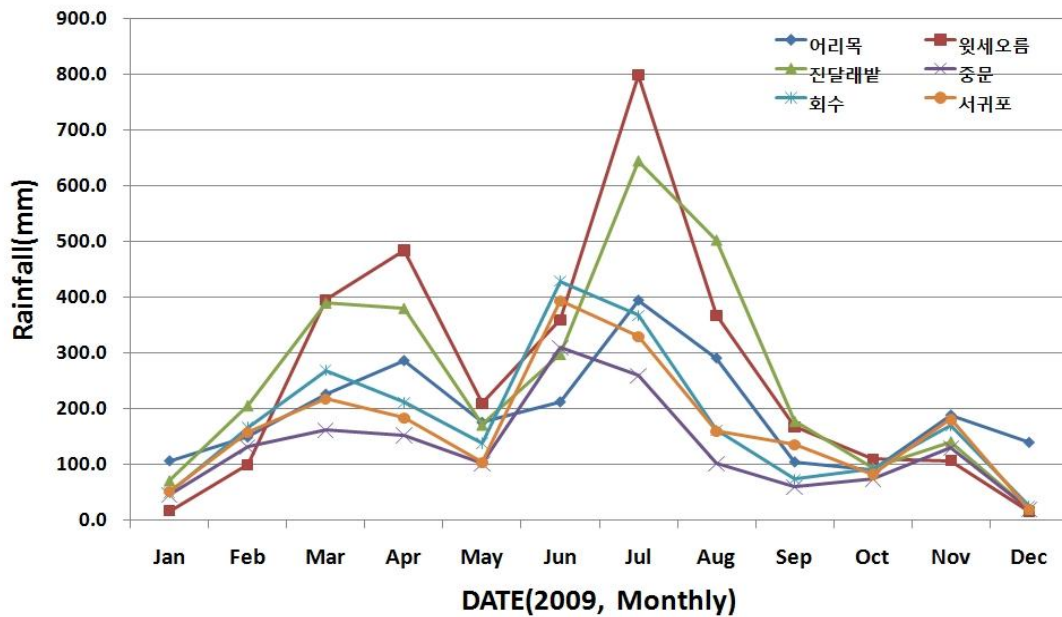


Fig. 4.9 Monthly rainfall data at six observation points (2009)

Table 4.11 Monthly rainfall data at six observation points (2009)

DATE (2009, Month)	Monthly rainfall data					
	Orimok	Wekse	Jindal	Jongmun	Hoesu	Seogwi
January	107.00	16.00	70.50	46.00	49.50	50.90
February	149.50	98.50	205.00	132.00	166.00	157.00
March	226.50	395.00	389.00	162.00	268.50	216.60
April	286.50	483.50	379.50	152.50	211.50	183.20
May	176.00	208.50	170.50	101.50	138.00	103.40
June	212.50	359.00	297.00	309.00	428.00	393.00
July	394.50	798.00	643.50	260.00	367.00	329.10
August	291.00	366.50	501.50	101.50	161.50	158.70
September	105.00	167.00	177.00	59.00	73.50	134.30
October	90.00	108.50	93.50	74.50	91.00	81.50
November	189.00	106.00	140.50	130.00	169.50	180.10
December	140.00	15.00	19.50	20.00	26.00	19.00

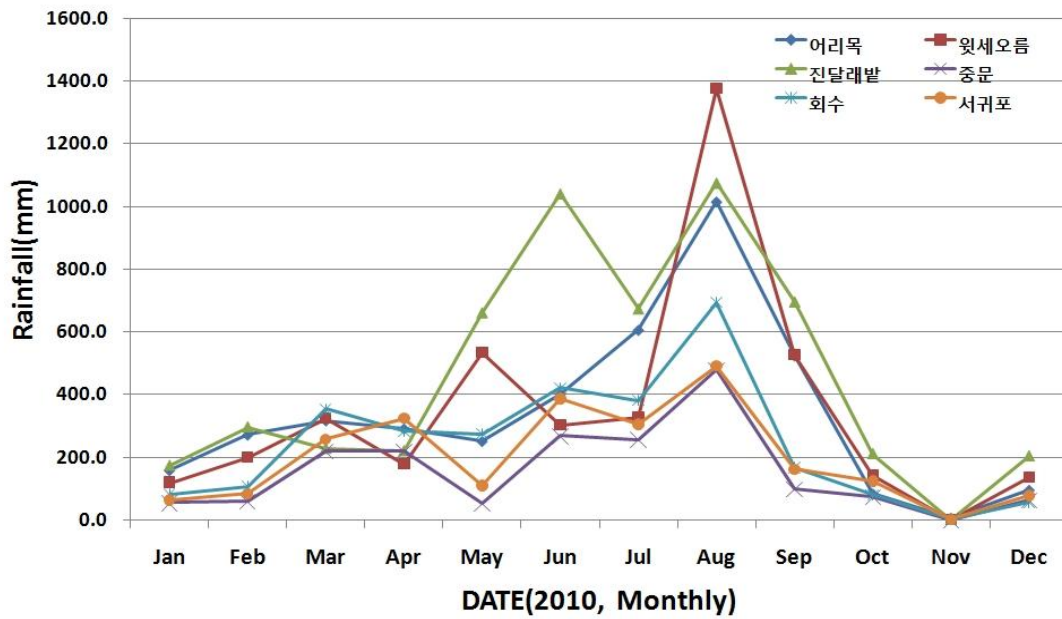


Fig. 4.10 Monthly rainfall data at six observation points (2010)

Table 4.12 Monthly rainfall data at six observation points (2010)

DATE (2010, Month)	Monthly rainfall data					
	Orimok	Wekse	Jindal	Jongmun	Hoesu	Seogwi
January	157.50	119.00	173.50	55.00	81.50	64.10
February	271.00	200.00	296.50	59.50	106.50	83.10
March	316.50	323.00	228.00	219.00	354.50	257.90
April	290.50	177.00	220.00	219.50	283.50	324.80
May	250.50	532.50	661.50	51.50	275.00	109.90
June	401.50	301.50	1041.50	267.50	421.50	387.00
July	605.50	327.50	673.50	256.50	382.00	306.00
August	1015.00	1375.50	1076.00	478.00	694.50	491.20
September	523.50	526.00	696.50	98.00	166.50	162.80
October	83.00	142.00	211.00	74.50	79.00	125.00
November	5.50	1.00	0.50	0.00	2.00	2.60
December	94.50	134.50	204.50	64.00	57.00	78.90

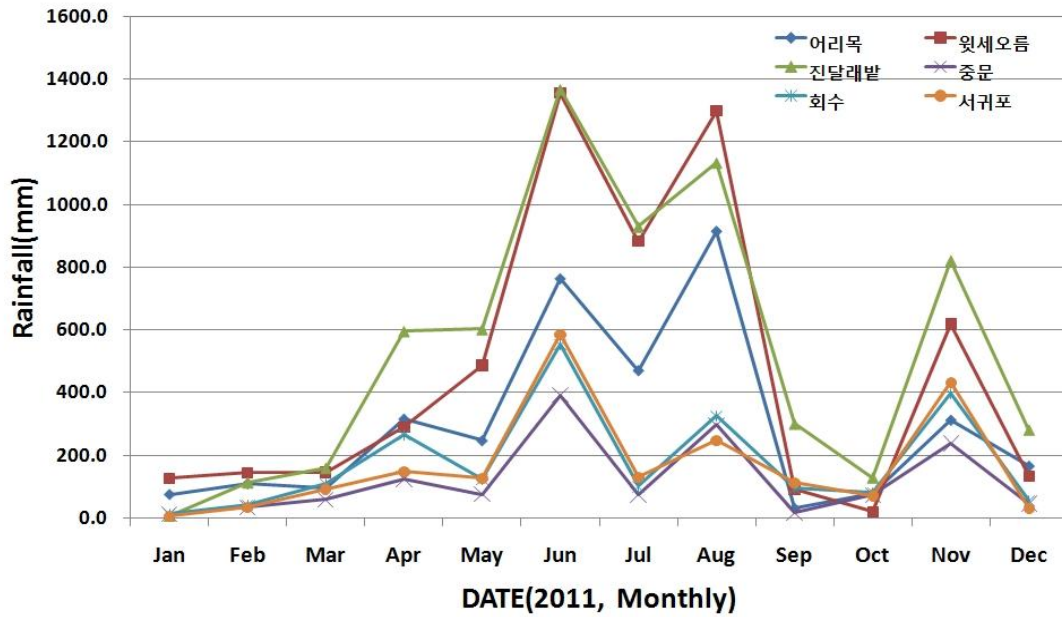


Fig. 4.11 Monthly rainfall data at six observation points (2011)

Table 4.13 Monthly rainfall data at six observation points (2011)

DATE (2011, Month)	Monthly rainfall data					
	Orimok	Wekse	Jindal	Jongmun	Hoesu	Seogwi
January	75.00	127.00	6.50	12.00	13.50	5.50
February	109.50	144.00	113.00	33.50	41.00	34.10
March	93.50	147.00	159.00	58.50	109.50	91.60
April	315.50	291.00	595.50	123.50	266.50	148.40
May	246.50	487.00	602.00	74.50	124.00	125.40
June	763.50	1355.50	1367.00	391.00	553.00	584.50
July	470.50	883.00	929.00	74.00	100.50	130.40
August	915.00	1299.00	1133.00	296.50	326.00	246.20
September	30.50	90.50	300.00	15.50	94.00	112.20
October	77.00	21.00	129.00	72.00	79.50	71.00
November	312.00	619.00	821.50	237.50	397.50	432.50
December	165.50	134.50	281.50	45.00	56.00	28.70

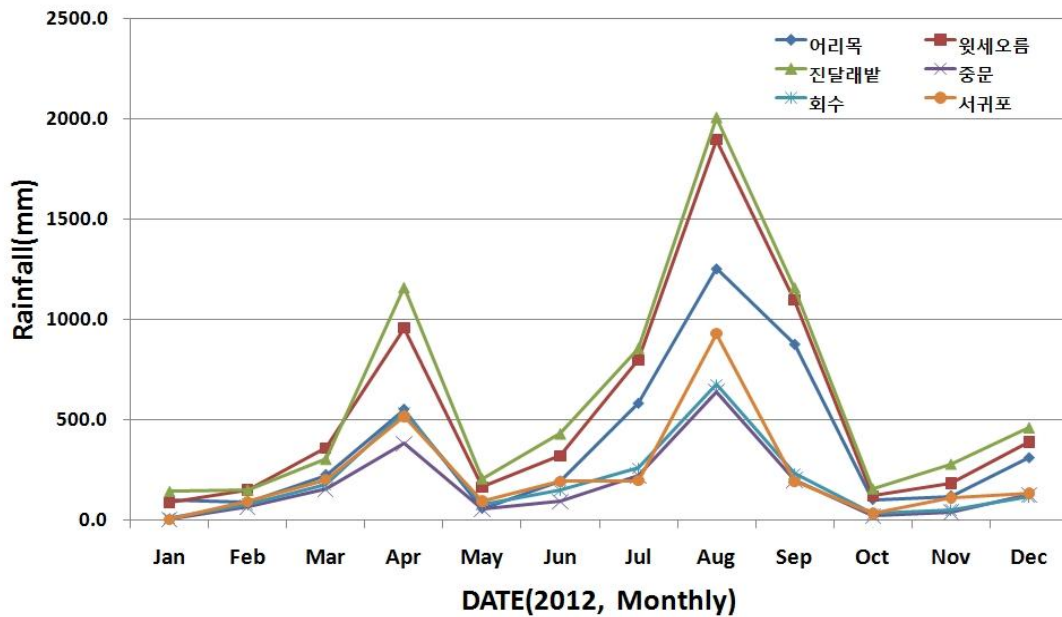


Fig. 4.12 Monthly rainfall data at six observation points (2012)

Table 4.14 Monthly rainfall data at six observation points (2012)

DATE (2012, Month)	Monthly rainfall data					
	Orimok	Wekse	Jindal	Jongmun	Hoesu	Seogwi
January	103.50	87.00	144.00	4.00	10.50	5.00
February	90.50	150.00	151.50	63.00	79.50	93.00
March	225.00	358.00	304.50	153.50	177.50	201.50
April	552.00	956.50	1159.00	380.00	538.00	516.50
May	57.00	163.00	207.50	54.50	79.50	96.10
June	193.00	319.00	431.00	93.00	148.00	193.10
July	581.00	797.50	857.00	222.00	258.00	196.50
August	1252.00	1894.50	2006.50	637.50	675.50	926.70
September	875.50	1095.50	1158.00	200.00	232.50	193.20
October	101.00	121.00	156.50	20.00	33.50	33.50
November	119.00	183.50	280.00	39.00	52.00	111.40
December	309.50	389.00	461.50	124.00	116.00	134.30

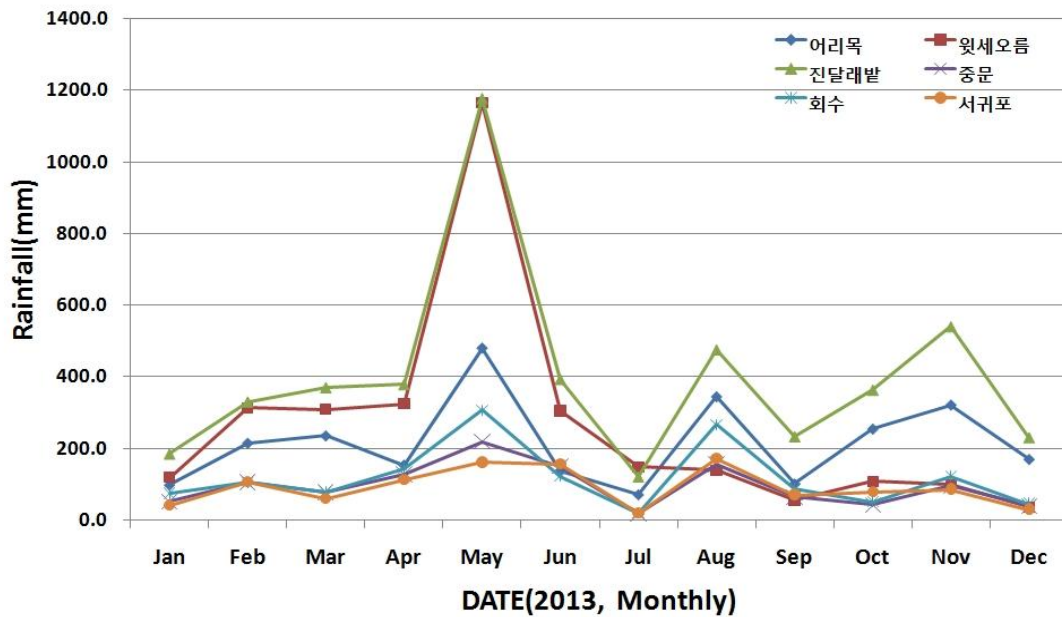


Fig. 4.13 Monthly rainfall data at six observation points (2013)

Table 4.15 Monthly rainfall data at six observation points (2013)

DATE (2013, Month)	Monthly rainfall data					
	Orimok	Wekse	Jindal	Jongmun	Hoesu	Seogwi
January	98.00	119.00	185.00	51.50	73.50	40.10
February	214.50	313.50	330.00	106.00	104.50	106.00
March	235.00	309.00	370.00	77.50	76.50	59.40
April	153.50	324.50	378.00	127.00	143.00	112.50
May	479.50	1164.50	1175.50	217.50	307.00	160.50
June	135.50	305.50	393.00	150.00	122.50	156.00
July	71.00	148.50	121.00	18.00	19.00	18.80
August	344.00	138.50	475.00	155.00	267.50	171.30
September	101.00	55.50	233.00	64.50	86.00	70.00
October	254.00	107.50	363.00	41.50	49.00	76.90
November	321.00	98.00	539.50	94.50	122.50	85.60
December	169.50	36.50	230.50	39.50	45.00	29.50

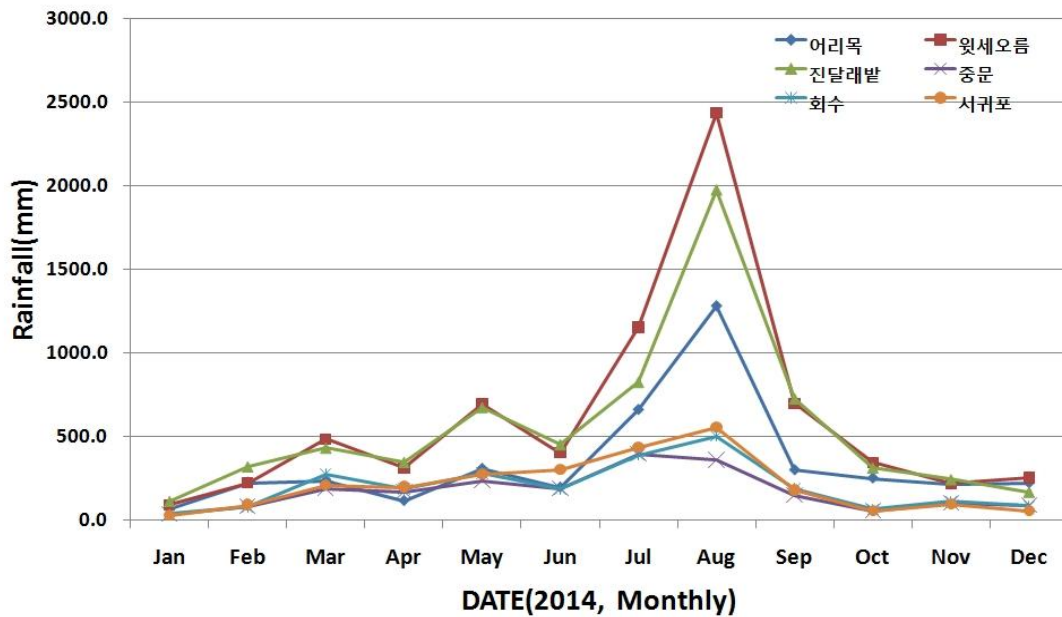


Fig. 4.14 Monthly rainfall data at six observation points (2014)

Table 4.16 Monthly rainfall data at six observation points (2014)

DATE (2014, Month)	Monthly rainfall data					
	Orimok	Wekse	Jindal	Jongmun	Hoesu	Seogwi
January	67.00	90.00	112.50	34.50	38.50	28.50
February	223.00	220.00	319.50	82.50	76.50	91.00
March	233.50	480.50	431.00	188.00	275.00	207.00
April	113.50	307.50	346.50	165.50	188.00	198.20
May	306.00	692.00	673.50	234.50	279.50	276.00
June	194.00	400.00	452.00	189.00	186.00	300.90
July	659.00	1152.00	824.00	394.00	390.00	435.00
August	1280.50	2432.50	1974.50	357.50	502.00	555.10
September	298.00	696.50	726.50	148.00	186.50	178.70
October	249.00	341.00	313.00	51.50	64.50	52.60
November	211.00	217.00	243.00	101.50	111.00	96.10
December	220.00	253.00	169.00	87.50	85.00	54.10

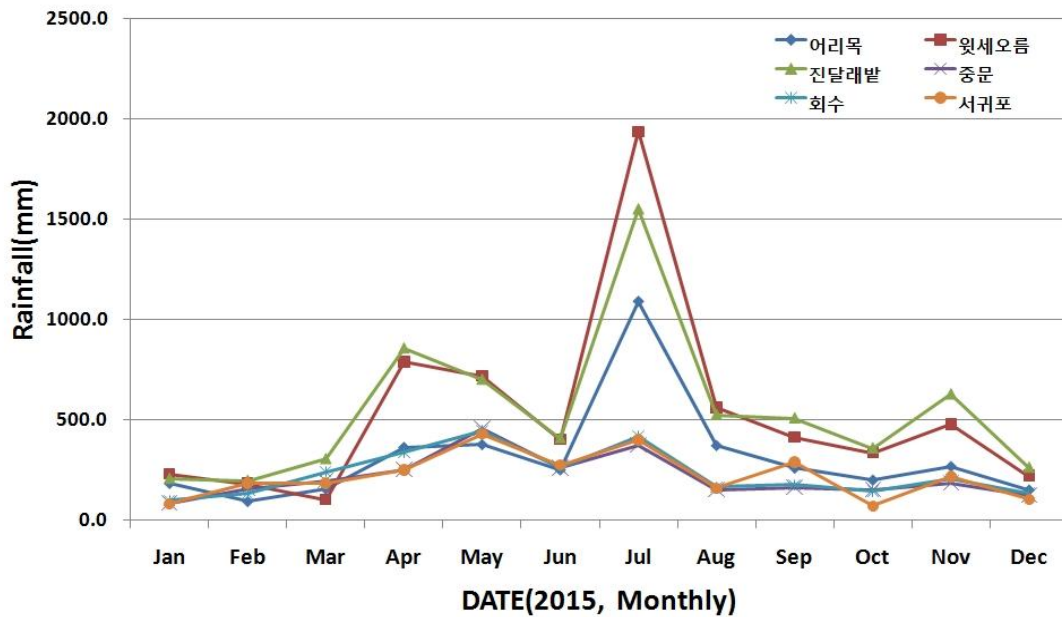


Fig. 4.15 Monthly rainfall data at six observation points (2015)

Table 4.17 Monthly rainfall data at six observation points (2015)

DATE (2015, Month)	Monthly rainfall data					
	Orimok	Wekse	Jindal	Jongmun	Hoesu	Seogwi
January	182.00	229.50	206.50	83.50	96.50	80.60
February	92.50	181.50	196.00	154.50	132.50	180.70
March	154.50	102.00	304.50	193.00	239.50	182.50
April	361.50	787.50	857.00	250.00	336.50	248.10
May	375.50	717.50	701.50	455.50	445.00	426.50
June	250.00	400.00	409.00	259.00	260.00	271.50
July	1087.50	1935.50	1551.50	373.50	416.50	396.80
August	370.50	559.50	525.50	150.50	163.50	157.30
September	258.00	413.50	508.50	162.50	173.00	286.90
October	199.00	337.00	358.50	148.00	143.50	69.20
November	266.50	476.00	628.00	184.50	200.50	215.50
December	150.00	220.00	261.50	120.00	131.50	101.50

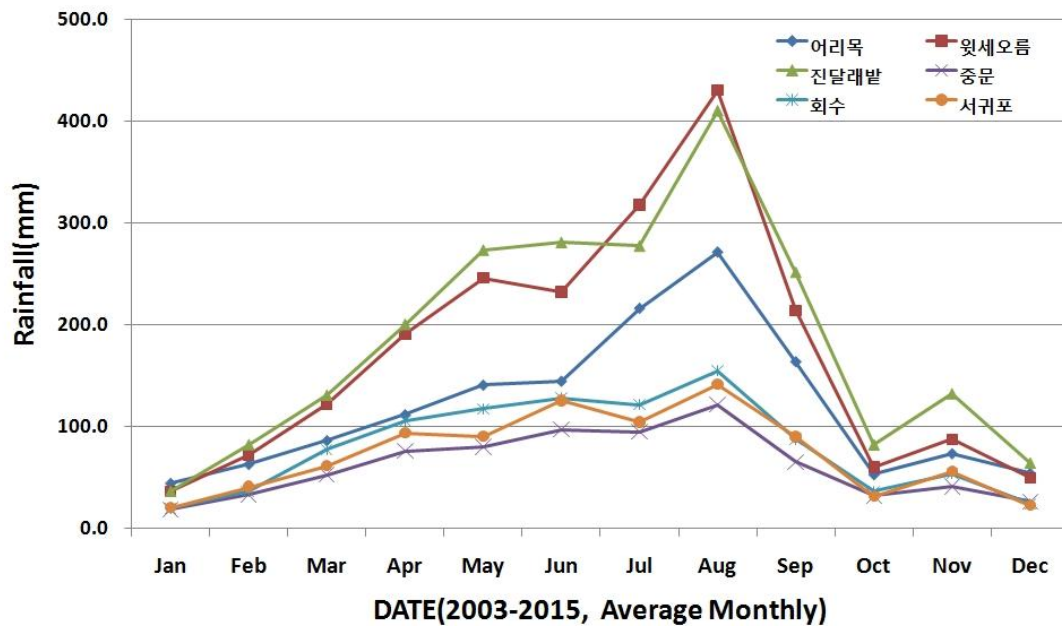


Fig. 4.16 Monthly average rainfall data at observation points (2003~2015)

Table 4.18 Monthly average rainfall data at six observation points (2003~2015)

DATE (2003~2015, Month)	Average monthly rainfall data					
	Orimok	Wekse	Jindal	Joongmun	Hoesu	Seogwi
January	43.97	36.56	36.55	18.53	19.97	20.06
February	62.72	72.41	82.41	33.20	37.13	40.58
March	86.02	122.29	130.82	52.50	77.37	60.82
April	111.48	190.78	200.32	75.70	105.58	93.70
May	140.60	245.90	273.16	79.85	117.45	90.03
June	144.43	232.33	280.62	97.12	128.50	125.11
July	216.18	317.81	277.10	94.81	121.42	103.99
August	271.44	430.03	409.76	121.16	154.73	141.05
September	163.66	214.20	251.36	65.01	87.82	89.59
October	52.58	60.13	82.27	31.76	36.24	30.97
November	73.18	87.33	132.22	40.90	53.83	55.45
December	53.92	49.35	64.32	25.81	24.50	22.37

Fig 4.16과 Table 4.18은 SWAT 모델의 적용기간을 기준으로 13개년의 월 평균 강우패턴을 분석한 결과를 나타낸다. 각 관측소별로 일관성 있는 패턴을 나타내고 있으며, 계절에 따른 기후의 영향으로 7~9월에 많은 강우량을 나타낸다. 13개년 기준의 월 최대 평균 강우량은 8월달에 254mm로 나타났으며 최소 평균 강우량은 1월달에 29.27mm로 225.42mm 차이를 나타낸다.

(2) 최고·최저 기온자료 분석

SWAT 모델 분석에 사용되는 최고·최저기온 자료는 서귀포 기상대의 관측자료를 이용하였으며 분석결과는 Fig 4.17, Table 4.19와 같이 일(day) 단위의 최고·최저기온 자료와 일 평균기온을 나타낸다. 일 단위의 최대 기온과 평균 기온은 점차 감소하는 추세를 나타내지만 최소 기온은 증가하는 추세를 나타냈다.

현재 전 세계적인 지구온난화의 영향으로 기온이 지속적으로 증가하는 경향을 나타내지만 13개년(2003년~2015년)의 자료에서는 기온의 증가 경향성을 확인할 수 없다. 하지만 과거 7개년(1973년~1979년) 자료 비교 시, 기온이 증가하는 경향을 확인할 수 있으며 과거 7개년 평균기온은 16.14°C이며 최근 13개년 평균기온 17.30°C로 1.17°C 증가를 나타냈다.

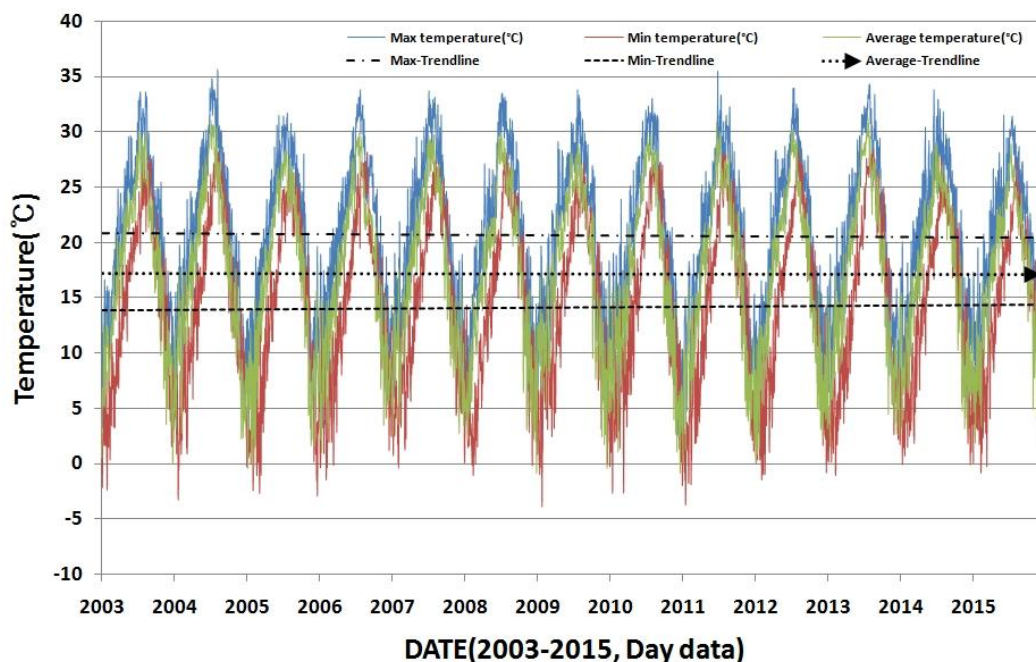


Fig. 4.17 Maximum, minimum and average temperature day-data (2003~2015)

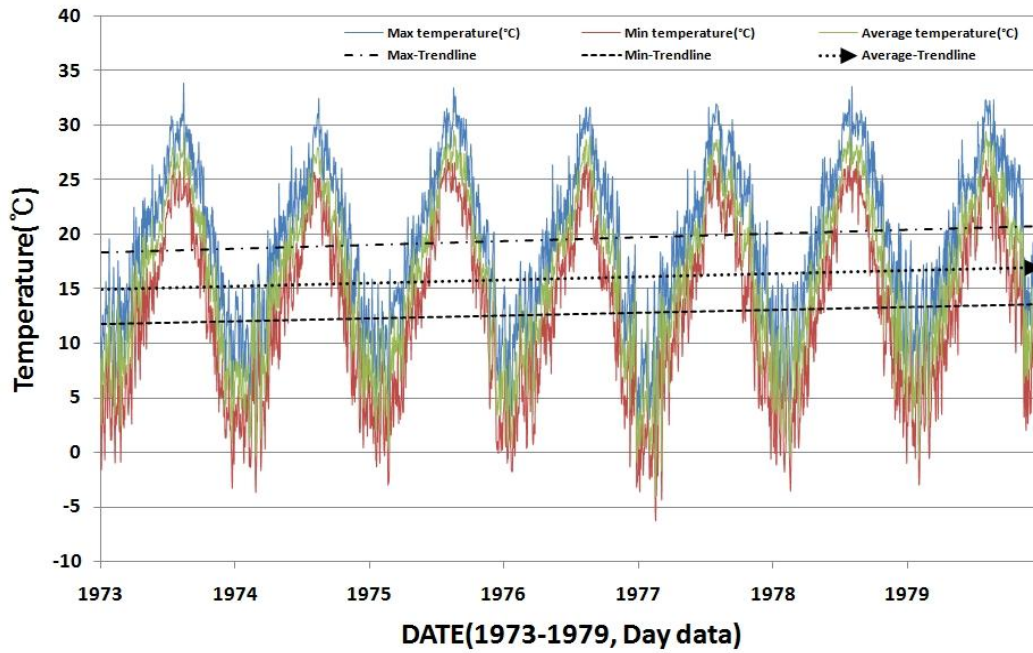


Fig. 4.18 Maximum, minimum and average temperature day-data (1973~1979)

Table 4.19 Annual average temperature data

DATE (Year)	Temperature		
	Average(°C)	Maximum(°C)	Minimum(°C)
1973	16.07	33.90	-3.30
1974	15.56	32.50	-3.70
1975	16.29	33.40	-3.00
1976	15.39	31.70	-3.20
1977	15.92	32.00	-6.30
1978	16.60	33.60	-3.60
1979	17.12	32.40	-3.00
∴ (skip)	∴ (skip)	∴ (skip)	∴ (skip)
2003	17.66	33.60	-2.40
2004	18.07	35.60	-3.30
2005	16.47	31.70	-2.90
2006	17.42	33.80	-1.50
2007	17.90	33.70	-0.30
2008	17.19	33.50	-1.10
2009	17.47	33.80	-3.90
2010	17.15	35.50	-3.70
2011	16.96	35.50	-3.70
2012	16.88	33.90	-1.50
2013	17.61	34.30	-1.10
2014	17.25	33.80	-0.10
2015	16.93	31.50	-0.80

최대·최소, 일 평균 온도의 13개년(2003~2015) 월 평균 온도로 분석한 결과는 Fig 4.19, Table 4.20 와 같다. 월 평균기온이 가장 높은 8월은 27.76℃를 나타냈으며 가장 낮은 1월은 7.30℃의 월 평균기온을 나타냈다. 계절에 따른 기후의 영향으로 월 최고기온은 8월 30.41℃, 월 최저기온은 1월에 3.91℃로 26.50℃의 기온차이를 나타냈다. 이 같이 구축된 최대·최소 기온 자료는 SWAT 모델의 분석과정에서 일 대기 온도(Daily air temperature), 시 대기 온도(Hoyrly air temperature), 토양 온도(Soil temperature)의 계산 과정에 이용되며 결과적으로 증발산 및 토양의 습윤 상태 등과 관련된다.

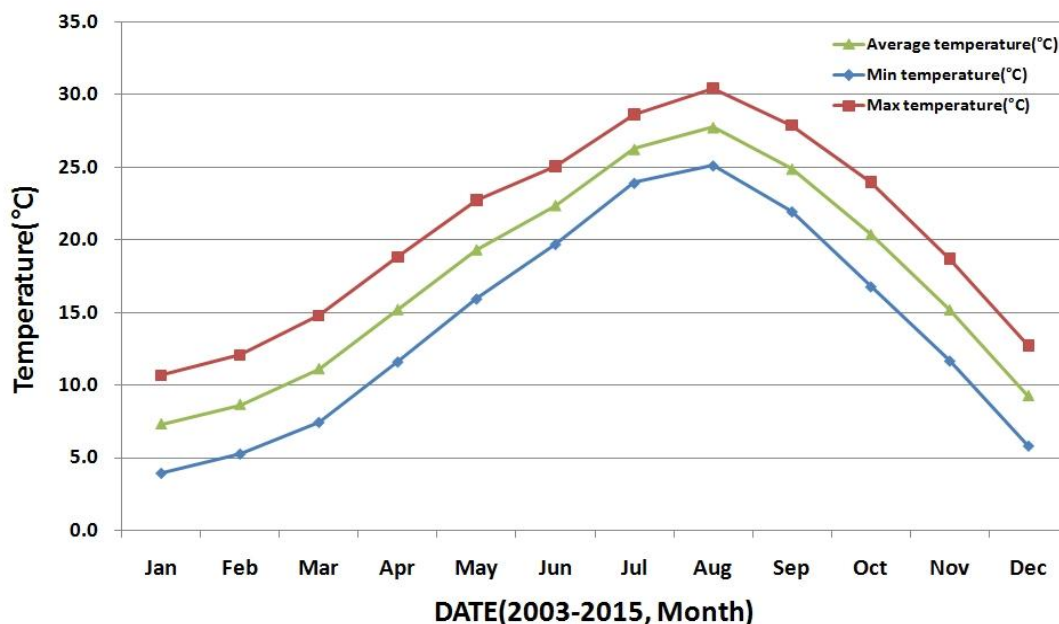


Fig. 4.19 Monthly average temperature data (2003~2015)

Table 4.20 Monthly average temperature data (2003~2015)

DATE (2003~2015, Month)	Temperature		
	Average(°C)	Maximum(°C)	Minimum(°C)
January	7.30	10.68	3.91
February	8.65	12.05	5.24
March	11.10	14.78	7.42
April	15.20	18.81	11.59
May	19.32	22.72	15.93
June	22.37	25.05	19.69

July	26.26	28.60	23.91
August	27.76	30.41	25.11
September	24.90	27.85	21.94
October	20.37	23.96	16.77
November	15.17	18.68	11.65
December	9.26	12.73	5.79

(3) 태양복사량자료 분석

SWAT 모델 분석에 사용되는 태양복사량 자료는 서귀포 기상대의 관측자료를 이용하였으며 분석결과는 Fig 4.22와 Table. 4.21과 같다.

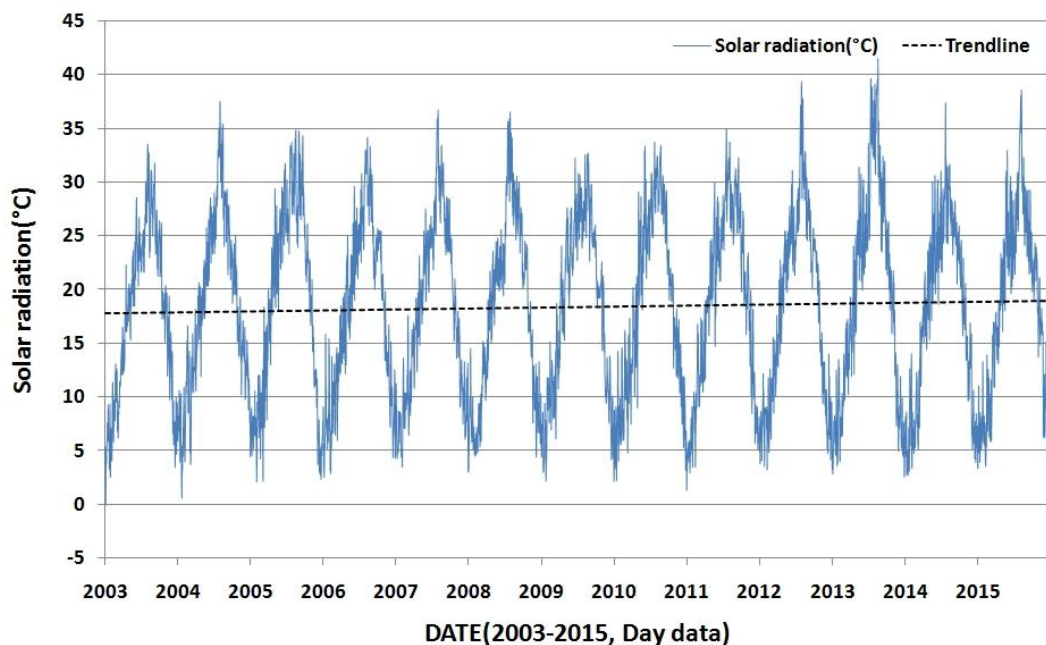


Fig. 4.20 Daily solar radiation data (2003~2015)

SWAT 모델의 분석 적용기간인 2003년 01월 01일부터 2015년 12월 31일까지 태양복사량이 점차적으로 증가하는 추세를 나타내고 있으며 최대 태양복사량은 2013년 08월 23일 41.30°C, 최소 태양복사량은 2003년 01월 04일 0.10°C로 나타났다.

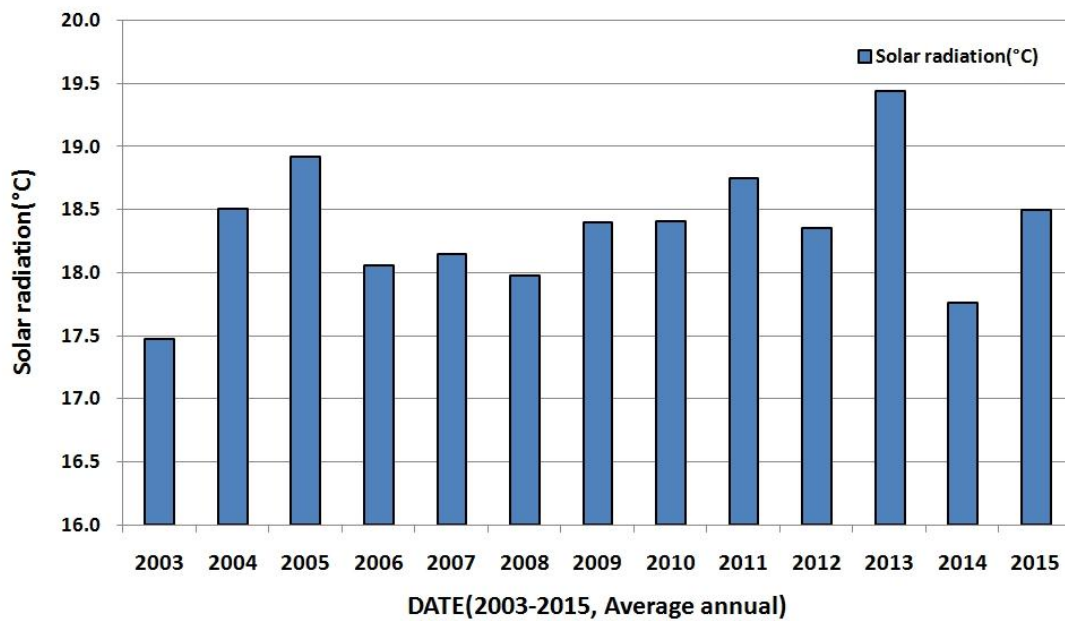


Fig. 4.21 Annual average solar radiation data (2003~2015)

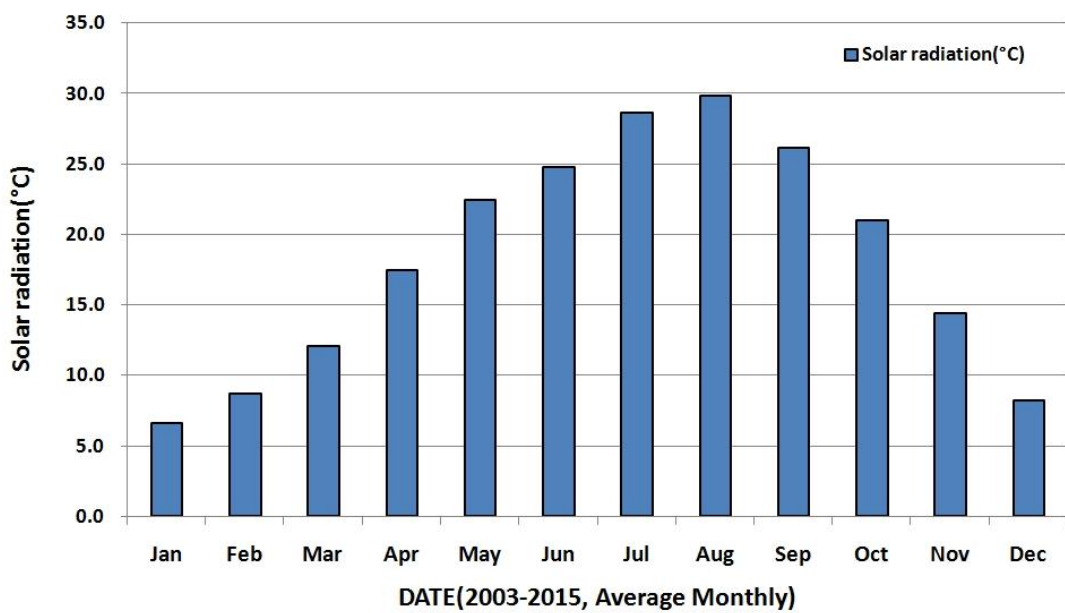


Fig. 4.22 Monthly average solar radiation data (2003~2015)

Table 4.21 Solar radiation data between 2003 and 2015 (Monthly and yearly)

DATE (Year)	Solar radiation	DATE (Month)	Solar radiation
	Annual average(℃)		Month average(℃)
2003	17.47	January	6.59
2004	18.51	February	8.70
2005	18.92	March	12.09
2006	18.06	April	17.48
2007	18.15	May	22.42
2008	17.98	June	24.79
2009	18.40	July	28.64
2010	18.41	August	29.89
2011	18.75	September	26.17
2012	18.35	October	20.96
2013	19.45	November	14.38
2014	17.77	December	8.23
2015	18.50	-	-

(4) 평균풍속

SWAT 모델 분석에 사용되는 태양복사량 자료는 서귀포 기상대의 관측자료를 이용하였으며 분석결과는 Fig 4.23과 Table. 4.22와 같다.

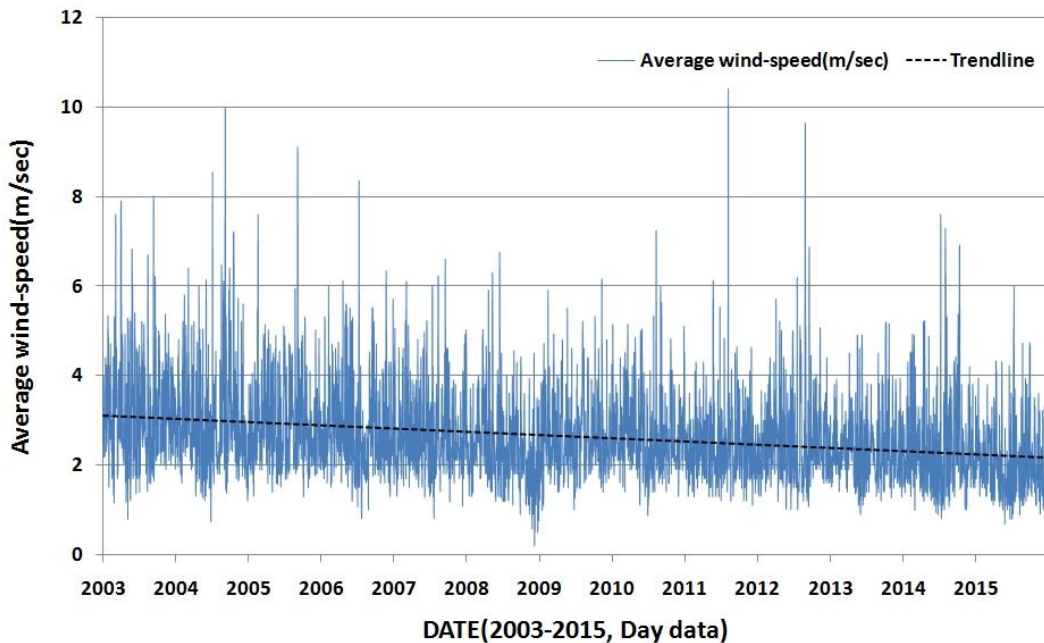


Fig. 4.23 Daily average wind speed day-data (2003~2015)

SWAT 모델의 분석 적용기간인 2003년 01월 01일부터 2015년 12월 31일까지 평균 풍속이 점차적으로 감소하는 추세를 나타내고 있으며 최대 평균풍속은 2011년

08월 7일 10.40m/sec, 최소 평균풍속은 2008년 12월 07일 0.2m/sec로 나타났다.

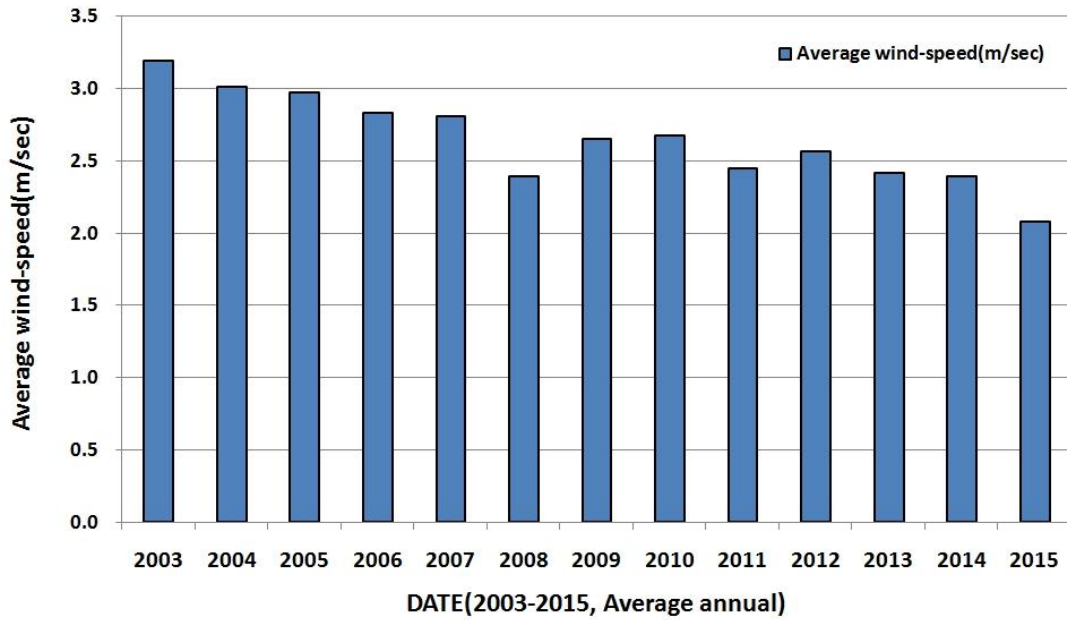


Fig. 4.24 Annual average wind-speed data (2003~2015)

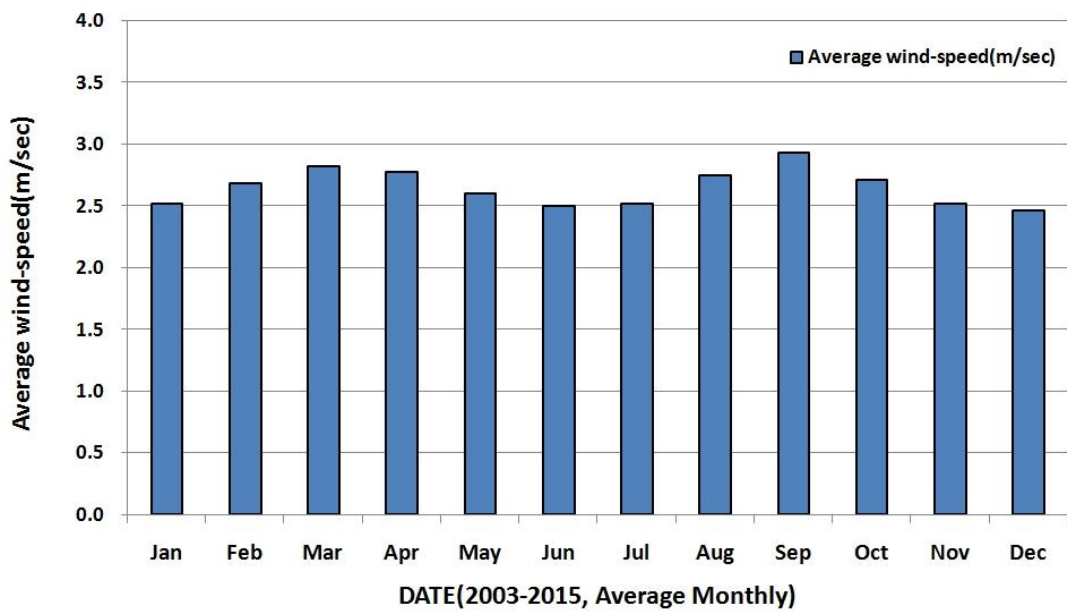


Fig. 4.25 Monthly average wind-speed data (2003~2015)

Table 4.22 Wind-speed data between 2003 and 2015 (Monthly and yearly)

DATE (Year)	Wind speed	DATE (Month)	Wind speed
	Annual average(m/sec)		Month average(m/sec)
2003	3.19	January	2.52
2004	3.02	February	2.69
2005	2.98	March	2.82
2006	2.83	April	2.78
2007	2.81	May	2.61
2008	2.39	June	2.50
2009	2.65	July	2.52
2010	2.68	August	2.75
2011	2.45	September	2.93
2012	2.57	October	2.71
2013	2.42	November	2.52
2014	2.39	December	2.47
2015	2.08	-	-

(5) 평균습도자료 분석

SWAT 모델 분석에 사용되는 태양복사량 자료는 서귀포 기상대의 관측자료를 이용하였으며 분석결과는 Fig 4.26과 같다.

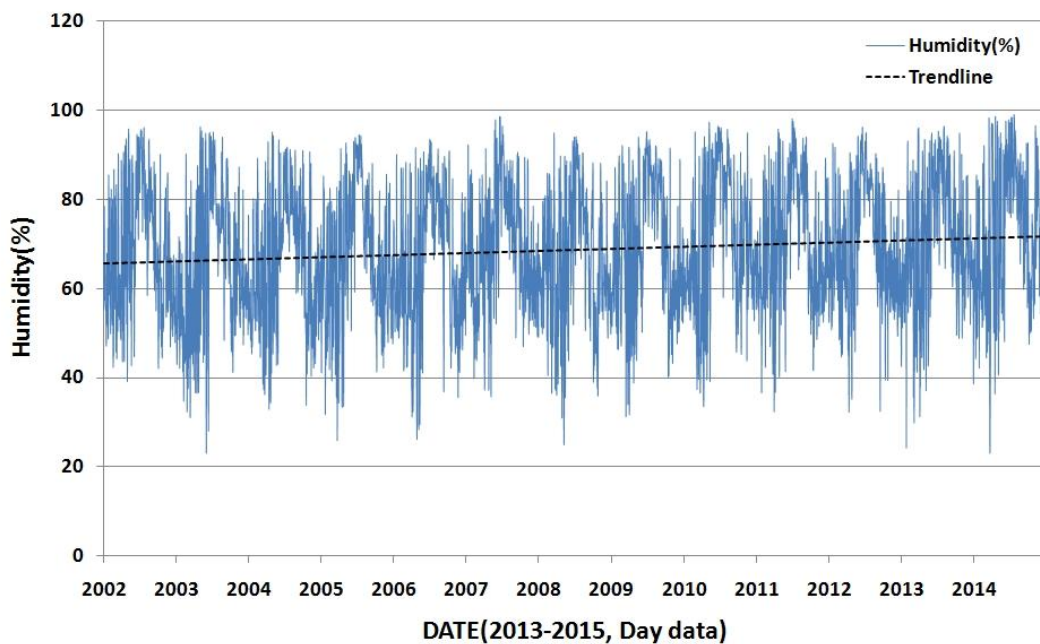


Fig. 4.26 Daily average humidity data(2003~2015)

SWAT 모델의 분석 적용기간인 2003년 01월 01일부터 2015년 12월 31일까지 습도가 점차적으로 증가하는 추세를 나타내고 있으며 최대 습도는 2015년 07월 22일 98.9%, 최소 습도는 2004년 06월 02일 23.1%로 나타났다.

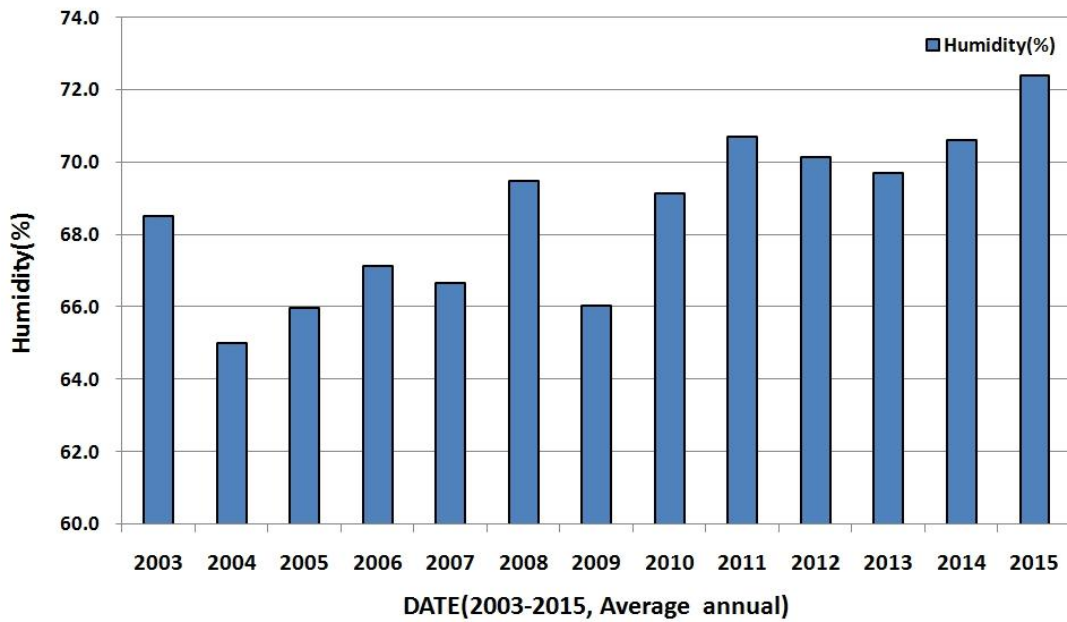


Fig. 4.27 Annual average humidity data(2003~2015)

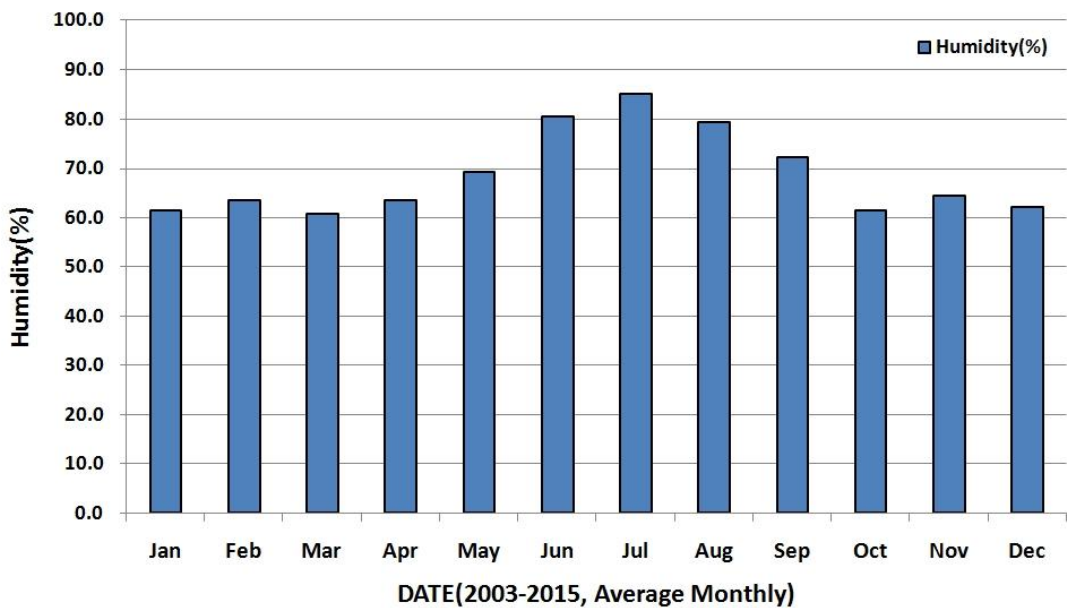


Fig. 4.28 Monthly average humidity data(2003~2015)

1.1.2 연구 대상구역의 GIS 자료 구축

SWAT 모델은 연구대상 구역에 해당하는 수치데이터 형태의 모든 지리정보를 활용할 수 있는 GIS(Geographic Information System)와 연계되어 분석이 이루어진다. 본 연구에서는 GIS와 관련된 입력 자료로 수치고도모델(Digital Elevation Model; 이하 DEM), 토지피복도, 토양도, 구역 경계 자료, 하천 형태 자료를 구축하여 제주도 중서귀 구역의 물리적 특성을 반영하였다. GIS의 구축 자료 중 구역 경계, 하천 형태 자료는 SWAT 모델 분석과정에서 모의되므로 최신의 DEM, 토지피복도, 토양도 자료를 구축하였다.

(1) DEM 자료 구축

DEM은 공간의 XYZ좌표에서 수치데이터 형태로 구성된 고도의 디지털 지도 데이터 세트를 의미한다. 대부분의 DEM은 해당 지역의 특성을 30m×30m 단위의 격자로 사용하지만 최근에는 미국 지질조사소(United States Geological Survey; USGS)에서 공간데이터 개선을 위한 노력의 일환으로 지형특성을 10m×10m의 공간해상도로 개선하는 역할을 수행하고 있다. DEM 자료는 지형 분석을 위한 지형학이나 물리적 지리와 관련하여 지리정보시스템(GIS)에서 가장 많이 사용되고 있으며 이외에도 3D시각화를 위한 렌더링 작업에도 많이 이용된다.

연구대상 지역인 제주도 중서귀 구역에 SWAT 모델을 적용하기 위해 공간특성정보의 기본 틀을 제공하는 제주도 DEM 자료를 활용한다. 제주도 DEM 자료는 수치지도에서 추출한 등고선을 이용하여 격자 형태로 만들어져 있으며 각 격자에는 표고 값이 입력되어 있어 분석 시 구역특성이 고려된다. 본 연구에서는 환경부에서 제공하는 30m×30m 해상도의 제주도 DEM을 ArcView GIS를 활용하여 구축하고 SWAT 모델의 입력 형태인 GRID파일로 사용된다. 제주도 DEM의 분석결과는 0~1950m의 표고를 나타내며, 평균 표고는 283.69m, 평균 경사는 9.04%로 나타났다.

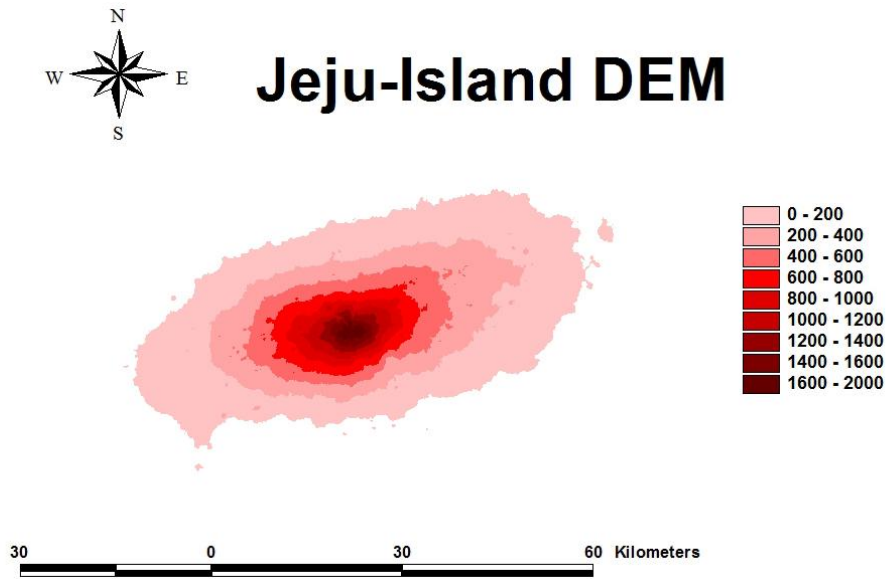


Fig. 4.29 Digital Elevation Model (DEM) data of Jeju-Island for research

(2) 토지이용도 자료 구축

토지피복도(land-cover map) 및 토지이용도(Landuse map)는 인공위성이 촬영한 영상을 이용하여 지표면의 상태를 표현한 디지털 지도를 의미하며 지표면의 물리적 상황을 분류한 것이다. 특히 현재의 지표면 이용 상황을 광범위하게 반영하고 있으므로 여러 모델링의 과정에서 기초자료로 활용된다.

토지이용도는 피복 특성에 따라 시가화 건조지역, 농업지역, 초지, 습지, 나지, 수역으로 전체 7개의 항목으로 구성되어 대분류로 나누어지며, 22개 항목의 중분류, 41개 항목의 세분류로 나누어 해당 지역의 피복특성을 세분화 시키고 분석 시 코드로 구분하여 나타낸다.

본 연구에 사용된 토지이용도 자료는 2007년 갱신된 중분류(1:25,000) 자료를 활용하였으며 격자크기는 유역별로 100m×100m으로 설정하여 모형의 입력 자료로 사용하였다. 제주도 중서귀유역의 토지이용 상태는 산림지역(FRSD, FRSE, FRST)이 전체 유역의 58.16%로 가장 많은 분포를 나타내며, 과수원(ORCD)이 23.01% 분포하는 것으로 나타났다. 그 외로 주거지역 및 위락시설 지역(URLD)이 3.01%, 밭, 하우스 재배지 및 기타 재배지가 6.24%의 분포를 나타냈다.

Table 4.23 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
		공공시설지역	160			도로	154
						기타 교통, 통신시설	155
						환경기초시설	161
						교육·행정시설	162
농업지역	200	논	210	기타 공공시설	163		
				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
						강기습	612
수역	700	내륙수	710	암벽/바위	613		
				채광지역	621		
		해양수	720			운동장	622
						기타나지	623
						하천	711
				호소	712		
				해양수	721		

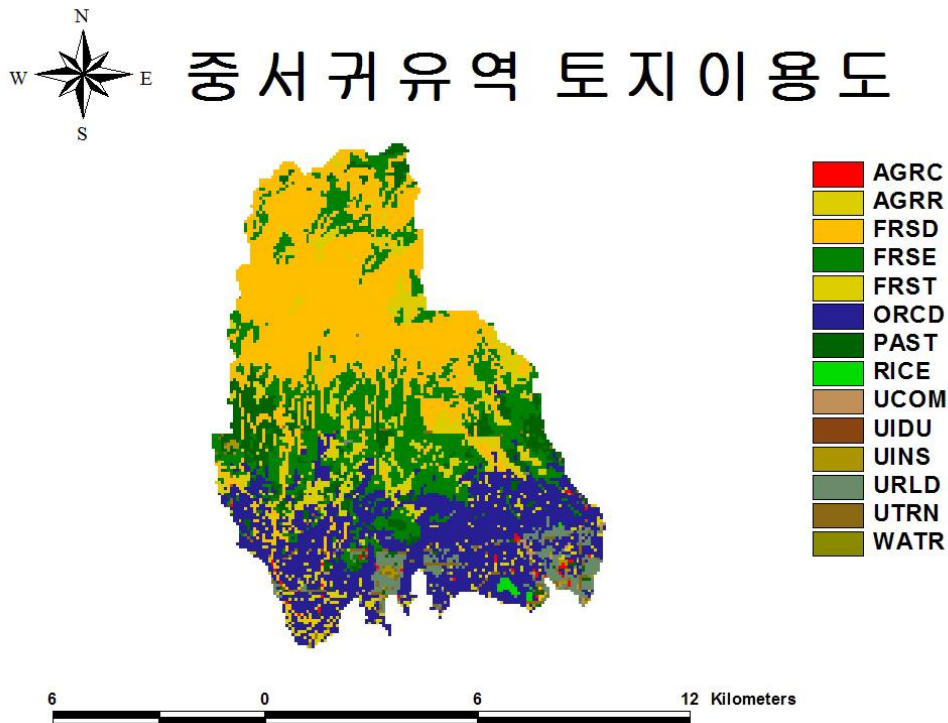


Fig. 4.30 Landuse map (land-cover map) of the studied basin

Table 4.24 Ground coverage state at the studied basin

Value	구분		면적(km ²)	비율(%)
110,140	URLD	주거지역,위락시설지역	2.96	3.01
120	UIDU	공업지역	0.02	0.02
130	UCOM	상업지역	0.25	0.26
150	UTRN	교통지역	1.23	1.25
160	UINS	공공시설지역	0.36	0.37
210	RICE	논	0.26	0.26
220, 230, 250	AGRR	밭,하우스재배지,기타 재배지	6.15	6.24
240	ORCD	과수원	22.68	23.01
310	FRSD	활엽수림	32.83	33.31
320	FRSE	침엽수림	20.74	21.04
330	FRST	혼효림	3.75	3.81
410,430	PAST	자연초지, 목장	6.91	7.01
620	AGRC	인공 나지	0.35	0.36
710	WATR	수역	0.05	0.05
Total			98.57	100

(3) 토양도 자료 구축

SWAT 모델에 적용되는 토양도(Soil type map) 자료는 농업과학기술원의 토양도 전산화 사업에 의해 구축된 농업토양정보시스템(Agricultural Soil Information System, ASIS)의 1:25,000 축척의 정밀 토양도를 사용하였다. 제주도 중서귀 유역의 토양도 자료를 ArcView GIS를 활용하여 유역 격자크기를 100m×100m로 설정하고 SWAT 모델의 입력 자료로 구축한다.

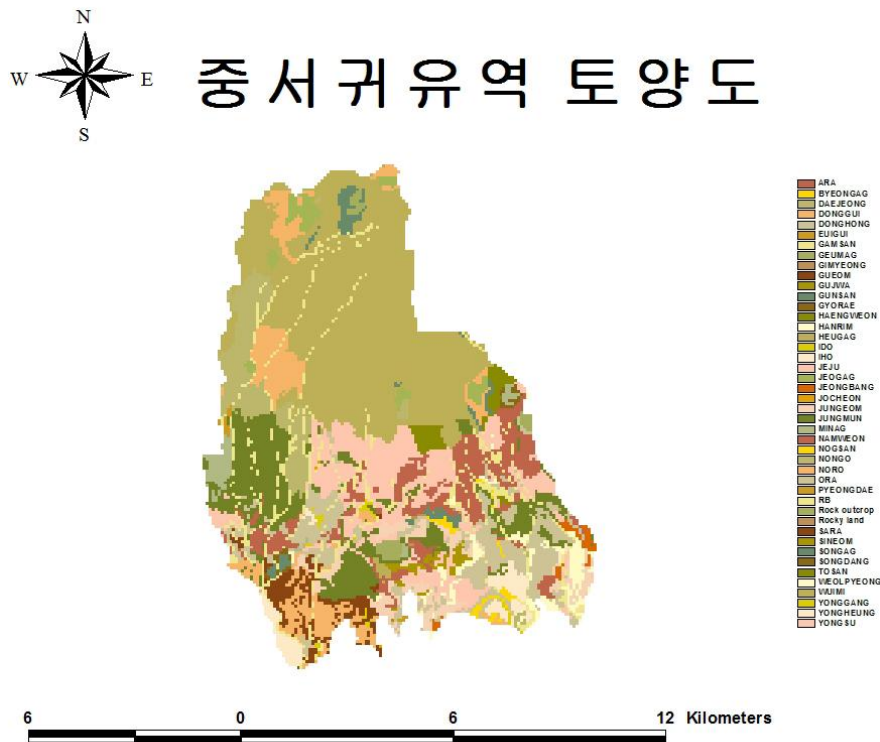


Fig. 4.31 Soil type map of the studied basin

Table 4.25 Hydrologic soil groups in the studied watershed

구분	면적(km ²)	비율(%)
NOGSAN	0.04	0.04
NAMWEON	0.87	0.89
PYEONGDAE	0.13	0.13
BYEONGGAG	0.47	0.47
SINEOM	0.10	0.1
SONGAG	0.23	0.23
GUEOM	1.87	1.9
GEUMGAG	0.52	0.53

IHO	0.23	0.23
GIMYEONG	0.01	0.01
NORO	3.78	3.84
YONGGANG	0.11	0.11
MINAG	1.10	1.11
SONGDANG	0.17	0.17
Rocky land	0.06	0.06
DAEJEONG	0.10	0.1
ARA	5.99	6.07
SARA	0.45	0.46
TOSAN	1.20	1.22
HAENGWEON	0.07	0.07
JEONGAG	1.48	1.5
JEJU	9.64	9.78
NONGO	5.02	5.1
YONGHEUNG	1.77	1.8
JEONGBANG	0.47	0.48
GUNSAN	1.16	1.17
GAMSAN	0.78	0.8
JUNGEOM	3.01	3.05
EUIGUI	0.03	0.03
IDO	0.24	0.25
DONGGUI	2.77	2.81
RB	4.92	4.99
YONGSU	0.02	0.02
WEOLPYEONG	0.12	0.12
Rock outcrop	0.21	0.21
HANRIM	1.97	2
JUNGMUN	9.67	9.81
ORA	7.35	7.46
WUIMI	0.17	0.17
JOCHEON	0.04	0.04
HEUGAG	29.41	29.84
GYORAE	0.16	0.16
DONGHONG	0.04	0.04
GUJWA	0.61	0.62
Total	98.57	100

1.2 모형의 보정 및 검증

1.2.1 SWAT 모형의 매개변수 민감도 분석

(1) 중서귀 지역의 매개변수 추정

수치적 민감도 분석은 SWAT 모형의 모의 결과에 영향을 미치는 매개변수를 추정하고, 검증하는 자료와 비교·분석을 통해 최종적으로 모형화된 시스템을 가장 비슷한 값으로 나타내기 위한 단계이다. 민감도 분석을 실시하여 구축된 모형의 입력 수치변화에 의한 변동을 분석하고 가장 민감한 모형 매개변수를 식별하여 분석에 효율성을 높이는데 목적이 있다.

SWAT의 매개변수의 종류와 영향인자들은 Table. 4.26과 같이 Crop.dat, Chemical, Ground water, HRU General, Soil, Main channel, Management 항목의 7가지로 대분류되어 있으며 각각의 항목에 따라 28가지의 세부 매개변수로 구성되어 있다.

이 연구에서는 SWAT 모형을 활용하여 함양량을 추정하는 과정에서 모형의 검증에 이용되는 유출량의 영향인자와 지하수의 영향인자를 선별하여 각각의 매개변수에 따라 범위를 설정하였다. Table. 4.27은 민감도 분석을 위해 선정한 매개변수와 설정 범위를 나타낸다.

Table 4.26 Parameters in SWAT model (Jung, 2008)

분류	매개변수	하한치	상한치	영향인자
Crop.dat	USLE_C	0.001	0.5	토지피복에 따른 피복 계수
	SMFMX	0	10	6월 21일의 용해 요소
	SMFMN	0	10	12월 21일의 용해 요소
	SPCON	0.0001	0.01	토사이동 방정식에서의 계수
	SPEXP	1	1.3	토사이동 방정식에서의 계수
	NPERCO	0	1	질산 침투 계수
	PRERCO	10	17.5	인산 침투 계수
	PHOSKD	100	200	토양의 인성을 구분하는 계수
Chemical	SOL_LABP	0	100	토양층에서의 초기 NO ₃ 농도
	SOL_ORGN	0	10000	토양층에서의 초기 산화질소 농도
	SOL_ORGP	0	4000	토양층에서의 초기 산화인 농도
	SOL_NO3	0	5	토양층에서의 초기 NO ₃ 농도

Ground water	ALPHA_BF	0	1	기저유출 감수 상수
	GWQMN	0	5000	기저유량에 대한 얇은 대수층의 임계 수분량
	GW_REVAP	0.02	0.2	얇은 대수층의 REVAP 계수
	REVAPMN	0	500	침투에 대한 얇은 대수층의 임계수분량
HRU General	ESCO	0	1	토양증발 보상계수
	SLOPE	0.0001	0.6	소유역의 평균 경사도 계수(%)
	SLSUBBSN	10	150	경사의 길이(m)
	n	-	-	매닝의 조도계수
Soil	TLAPS	0	50	온도 변동 계수
	SOL_AWC	0	1	토양층 유효수분량
Main channel	CH_COV	-0.001	1	하천의 피복 요소
	CH_EROD	-0.05	0.6	하천의 침식성 요소
	CH_K2	-0.01	150	하천에서의 수리전도도 계수
Management	BIOMIX	0	1	생물학적 혼합계수
	USLE_P	0.1	1	USLE 경험계수
	CN_2	35	98	AMC-II 조건 에서의 SCS유출곡선지수

Table 4.27 The value of the hydrological parameters used in the analysis

분류	매개변수	항목별 변수값 설정범위					하한치	상한치
		-100%	-50%	0%	+50%	+100%		
Ground water	ALPHA_BF	-25%	-12%	0%	+12%	+25%	0	1
	GWQMN	-100%	-50%	0%	+50	+100%	0	5000
	GW_REVAP	-100%	-50%	0%	+50	+100%	0.02	0.2
	REVAPMN	-100%	-50%	0%	+50	+100%	0	500
HRU General	ESCO	-100%	-50%	0%	+50	+100%	0	1
	SLOPE	-25%	-12%	0%	+12%	25%	0.0001	0.6
	SLSUBBSN	-25%	-12%	0%	+12%	+25%	10	150
Soil	TLAPS	-100%	-50%	0%	+50	+100%	0	50
	SOL_AWC	-0.05	-0.025	0%	+0.025	+0.05	0	1
Main channel	CH_COV	-100%	-50%	0%	+50	+100%	-0.001	1
	CH_EROD	-25%	-12%	0%	+12%	+25%	-0.05	0.6
	CH_K2	-100%	-50%	0%	+50	+100%	-0.01	150
Management	CN_2	-8.0	-4.0	0%	+4.0	+8.0	35	98

(2) 민감도 분석 결과

제주도 남부 중서귀 지역의 소유역별 함양량을 산정하기 위해 Fig. 4.32와 같이 7개의 소유역으로 구분하고 민감도 분석을 실시하였다. 중서귀 지역의 소유역 구분은 SWAT 모형 내에서 구축된 DEM 자료의 Elevation에 따라 모의되다.

Fig. 4.32의 ①은 강정천이 주하천인 구역이며 ②은 악근천, ③은 연외천, ④ 동홍천을 주하천으로 한 구역을 나타낸다. 그 외 악근천과 연외천 사이의 ⑤ A-basin과 ⑥ B-basin, ⑦ C-basin은 실제 하천이 형성되어 있지 않지만 전체 중서귀 지역을 포함하는 함양량을 추정하기 위해 SWAT 모형의 구축과정에서 3개의 소유역으로 구분하였다.

중서귀 지역 7개소의 소유역을 대상으로 한 민감도 분석은 선정된 각각의 매개변수 항목에 따라 상한치와 하한치를 기준으로 $\pm 50\%$, $\pm 100\%$ 의 변수를 설정하였다. 설정 변수에 의한 유출량과 함양량을 추정하여 민감도를 나타내는 결과는 Fig. 4.33 ~ Fig. 4.46과 같다. 또한 SWAT 모형의 민감도 분석과정에서 산정된 모의값은 12개의 소유역의 전체 면적에 일괄적으로 평균강우량이 적용되므로 고도에 따른 강우특성이 고려되지 않는 모형의 한계점이 있다.

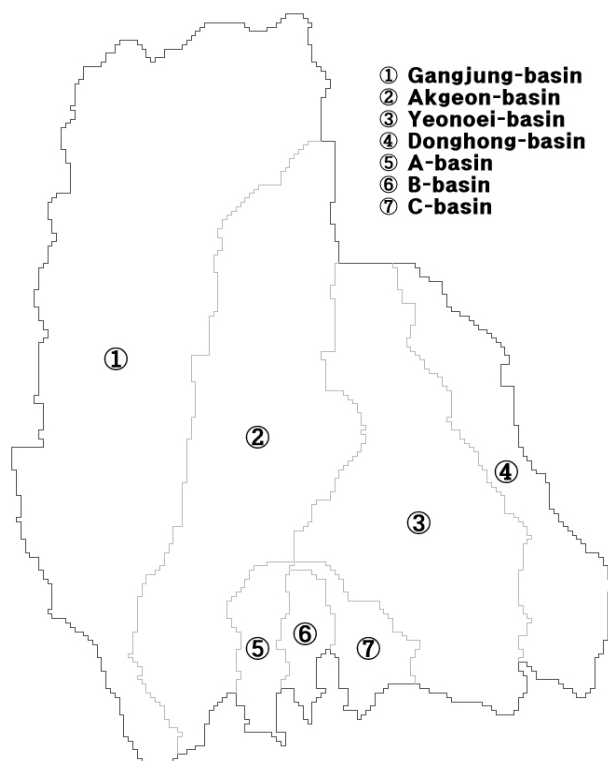


Fig. 4.32 Sub-basin of Mid-Seogwi watershed of Jeju Island

① 강정천 유역의 민감도 분석 결과

SWAT 모형의 28개의 매개변수 중 본 연구와 관련하여 선정된 13개 항목의 매개변수를 강정천 유역에 적용하여 민감도 분석을 실시한 결과는 Fig. 4.33~4.34와 Table. 4.28과 같다. 13개의 매개변수 중 ESCO, TLAPS, CH_COV, CH_EROD, CH_K2 항목은 함양량과 유출량 변화율에 영향이 없으며, SLOPE, SLSUBBSN, SOL_AWC, CN_2 항목이 함양량 변화율과 유출량 변화율에 민감한 반응을 나타냈다.

강정천 유역의 유출량에 대한 매개변수 민감도는 전체적으로 소유역의 평균 경사도 계수인 SLOPE 항목이 최소 -8%까지 변화율을 나타냈으며 경사 길이를 나타내는 SLSUBBSN 항목이 최대 12%의 변화율을 나타냈다. 또한 매개변수가 증가함에 따라 유출곡선지수인 CN_2, 토양층 유효수분량 SOL_AWC와 SLOPE 항목이 증가하는 경향을 나타냈으나 SLSUBBSN 항목은 감소하는 경향을 나타냈다(Fig. 4.33; Table 4.28).

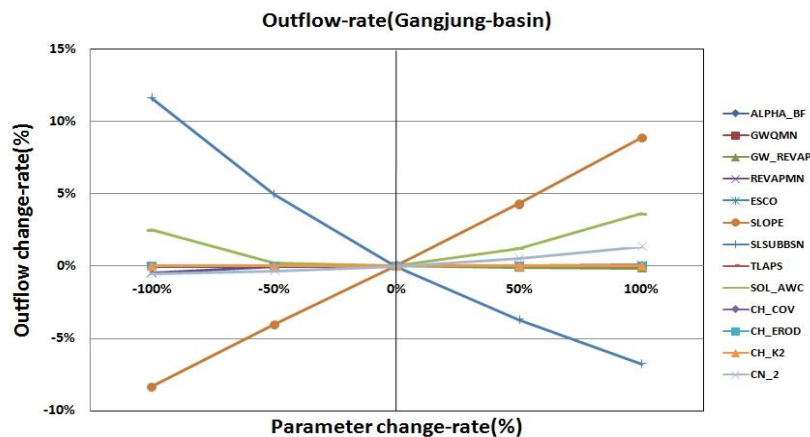


Fig. 4.33 Outflow-rate change of Gangjung-basin by changing parameters

강정천 유역의 함양량에 대한 매개변수 민감도는 전체적으로 토양층 유효수분량의 매개변수인 SOL_AWC 항목이 최소 -50%에서 최대 98%의 민감한 변화율을 나타냈다. 또한 매개변수가 증가함에 따라 소유역의 평균 경사도 계수인 SLOPE 항목과 유출곡선지수인 CN_2, 토양층 유효수분량 SOL_AWC 항목이 감소하는 경향을 나타냈으나 SLSUBBSN 항목은 반대로 증가하는 경향을 나타냈다. 이 항목 외에도 기저유출 감수 상수인 ALPHA_BF 항목과 얇은 대수층에 대한 REVAP 계수인 GW_REVAP, 침루에 대한 얇은 대수층의 임계수분량의 매개변수인 REVAPMN 항목이 함양량의 변화에 반응을 나타냈으

며 이 중 REVAPMN 항목이 최소 -11%에서 최대 2%의 변화율을 나타냈다(Fig. 4.34; Table 4.28).

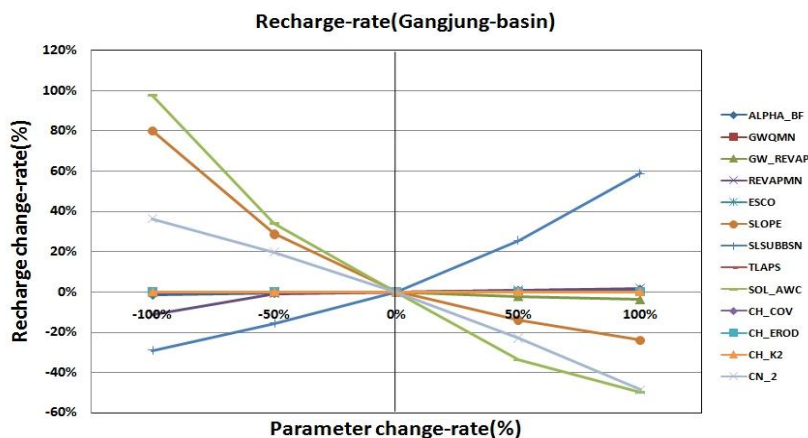


Fig. 4.34 Recharge-rate change of Gangjung-basin by changing parameters

Table 4.28 The changes of outflow and recharge-rates by changing parameters; ① Gangjung-basin

매개변수	함양량 변화율(%)					유출량 변화율(%)				
	-100	-50	0	+50	+100	-100	-50	0	+50	+100
ALPHA_BF	-2%	-1%	0%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%
GWQMN	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
GW_REVAP	0%	0%	0%	-2%	-4%	0%	0%	0%	0%	0%
REVAPMN	-11%	-1%	0%	1%	2%	0%	0%	0%	0%	0%
ESCO	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SLOPE	80%	29%	0%	-14%	-24%	-8%	-4%	0%	4%	9%
SLSUBBSN	-29%	-16%	0%	26%	59%	12%	5%	0%	-4%	-7%
TLAPS	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SOL_AWC	98%	34%	0%	-34%	-50%	2%	0%	0%	1%	4%
CH_COV	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CH_EROD	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CH_K2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CN_2	36%	20%	0%	-23%	-49%	-1%	0%	0%	1%	1%

② 악근천 유역의 민감도 분석

SWAT 모형의 28개의 매개변수 중 본 연구와 관련하여 선정된 13개 항목의 매개변수를 악근천 유역에 적용하여 민감도 분석을 실시한 결과는 Fig. 4.35~4.36과 Table. 4.29와 같다. 13개의 매개변수 중 ESCO, TLAPS, CH_COV, CH_EROD, CH_K2 항목은 함양량과 유출량 변화율에 영향이 없으며, SLOPE, SLSUBBSN, SOL_AWC, CN_2 항목이 함양량 변화율과 유출량 변화율에 민감한 반응을 나타냈다.

악근천 유역의 유출량에 대한 매개변수 민감도는 전체적으로 소유역의 평균 경사도 계수인 SLOPE 항목이 최소 -9%까지 변화율을 나타냈으며 경사 길이를 나타내는 SLSUBBSN 항목이 최대 13%의 변화율을 나타냈다. 또한 매개변수가 증가함에 따라 유출곡선지수인 CN_2, 토양층 유효수분량 SOL_AWC와 SLOPE 항목이 증가하는 경향을 나타냈으나 SLSUBBSN 항목은 감소하는 경향을 나타냈다(Fig. 4.35; Table 4.29).

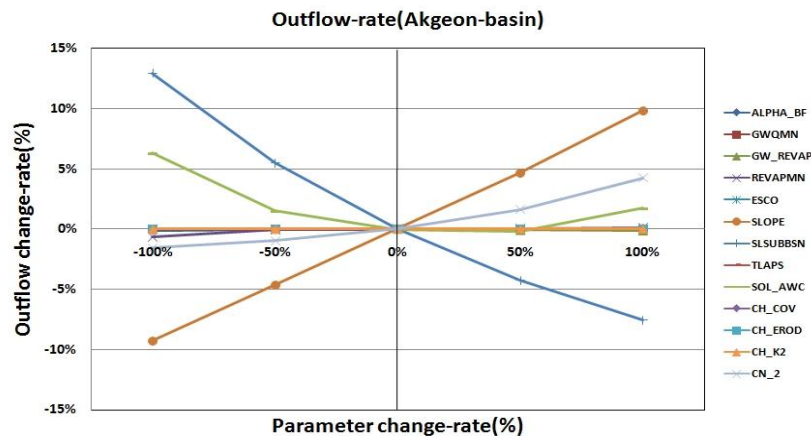


Fig. 4.35 Outflow-rate change of Akgeon-basin by changing parameters

악근천 유역의 함양량에 대한 매개변수 민감도는 전체적으로 토양층 유효수분량의 매개변수인 SOL_AWC 항목이 최소 -69%에서 최대 156%의 민감한 변화율을 나타냈다. 또한 매개변수가 증가함에 따라 소유역의 평균 경사도 계수인 SLOPE 항목과 유출곡선지수인 CN_2, 토양층 유효수분량 SOL_AWC 항목이 감소하는 경향을 나타냈으나 SLSUBBSN 항목은 반대로 증가하는 경향을 나타냈다. 이 항목 외에도 기저유출 감수 상수인 ALPHA_BF 항목과 얇은 대수층에 대한 REVAP 계수인 GW_REVAP, 침투에 대한 얇은 대수층의 임계수분량의 매개변수인 REVAPMN 항목이 함양량의 변화에 반응을 나타냈으

며 이 중 REVAPMN 항목이 최소 -20%에서 최대 3%의 변화율을 나타냈다(Fig. 4.36; Table 4.29).

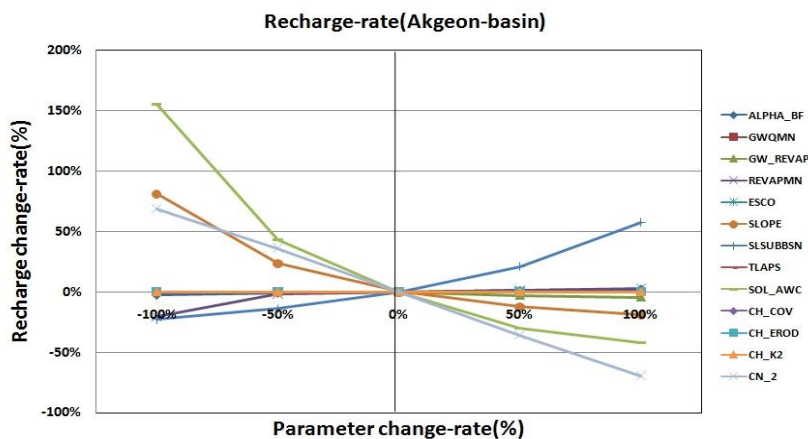


Fig. 4.36 Recharge-rate change of Akgeon-basin by changing parameters

Table 4.29 The changes of outflow and recharge-rates by changing parameters; ② Akgeon-basin

매개변수	함양량 변화율(%)					유출량 변화율(%)				
	-100	-50	0	+50	+100	-100	-50	0	+50	+100
ALPHA_BF	-3%	-1%	0%	1%	2%	0%	0%	0%	0%	0%
GWQMN	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
GW_REVAP	0%	0%	0%	-3%	-4%	0%	0%	0%	0%	0%
REVAPMN	-20%	-2%	0%	1%	3%	-1%	0%	0%	0%	0%
ESCO	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SLOPE	81%	24%	0%	-12%	-19%	-9%	-5%	0%	5%	10%
SLSUBBSN	-23%	-14%	0%	21%	57%	13%	5%	0%	-4%	-8%
TLAPS	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SOL_AWC	156%	43%	0%	-31%	-42%	6%	1%	0%	0%	2%
CH_COV	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CH_EROD	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CH_K2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CN_2	69%	36%	0%	-36%	-69%	-2%	-1%	0%	2%	4%

③ 연외천 유역의 민감도 분석

SWAT 모형의 28개의 매개변수 중 본 연구와 관련하여 선정된 13개 항목의 매개변수를 연외천 유역에 적용하여 민감도 분석을 실시한 결과는 Fig. 4.37~4.38과 Table. 4.30과 같다. 13개의 매개변수 중 ESCO, TLAPS, CH_COV, CH_EROD, CH_K2 항목은 함양량과 유출량 변화율에 영향이 없으며, SLOPE, SLSUBBSN, SOL_AWC, CN_2 항목이 함양량 변화율과 유출량 변화율에 민감한 반응을 나타냈다.

연외천 유역의 유출량에 대한 매개변수 민감도는 전체적으로 소유역의 평균 경사도 계수인 SLOPE 항목이 최소 -8%까지 변화율을 나타냈으며 경사 길이를 나타내는 SLSUBBSN 항목이 최대 9%의 변화율을 나타냈다. 또한 매개변수가 증가함에 따라 유출곡선지수인 CN_2, SLOPE 항목이 증가하는 경향을 나타냈으나 토양층 유효수분량 SOL_AWC 항목과 SLSUBBSN 항목은 감소하는 경향을 나타냈다(Fig. 4.37; Table 4.30).

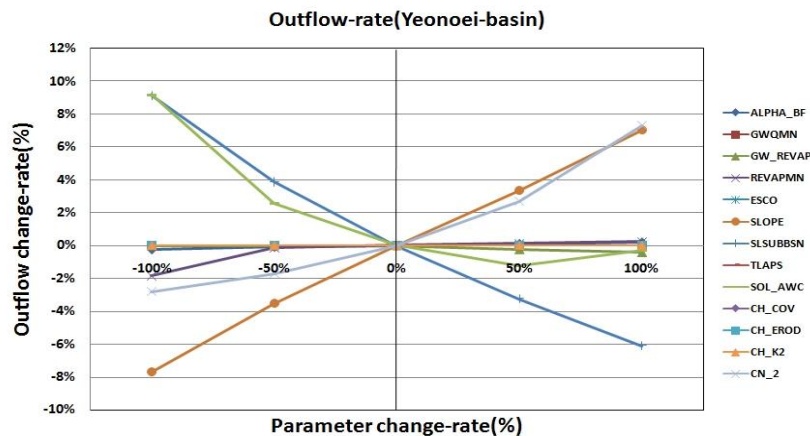


Fig. 4.37 Outflow-rate change of Yeoneoi-basin by changing parameters

연외천 유역의 함양량에 대한 매개변수 민감도는 전체적으로 유출곡선지수인 CN_2 항목이 최소 -53%의 변화율을 나타냈으며 토양층 유효수분량의 매개변수인 SOL_AWC 항목이 최대 83%의 민감한 변화율을 나타냈다. 또한 매개변수가 증가함에 따라 소유역의 평균 경사도 계수인 SLOPE 항목과 유출곡선지수인 CN_2, 토양층 유효수분량 SOL_AWC, 얇은 대수층에 대한 REVAP 계수인 GW_REVAP 항목이 감소하는 경향을 나타냈으나 SLSUBBSN 항목은 반대로 증가하는 경향을 나타냈다. 이 항목 외에도 기저유출 감수 상수인 ALPHA_BF 항목과 얇은 대수층의 REVAP 계수인 GW_REVAP, 침투에 대한 얇은

대수층의 임계수분량의 매개변수인 REVAPMN 항목이 함양량의 변화에 반응을 나타냈으며 이 중 REVAPMN 항목이 최소 -21%에서 최대 3%의 변화율을 나타냈다(Fig. 4.38; Table 4.30).

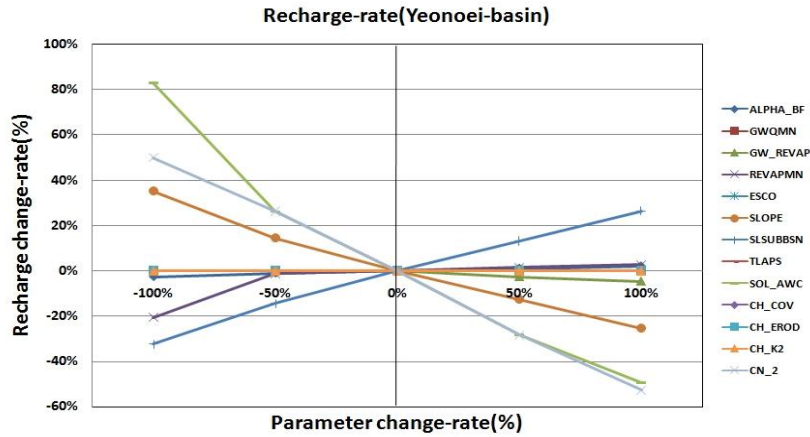


Fig. 4.38 Recharge-rate change of Yeonoei-basin by changing parameters

Table 4.30 The changes of outflow and recharge-rates by changing parameters; ③ Yeonoei-basin

매개변수	함양량 변화율(%)					유출량 변화율(%)				
	-100	-50	0	+50	+100	-100	-50	0	+50	+100
ALPHA_BF	-3%	-1%	0%	1%	2%	0%	0%	0%	0%	0%
GWQMN	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
GW_REVAP	0%	0%	0%	-3%	-5%	0%	0%	0%	0%	0%
REVAPMN	-21%	-1%	0%	1%	3%	-2%	0%	0%	0%	0%
ESCO	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SLOPE	35%	14%	0%	-13%	-25%	-8%	-4%	0%	3%	7%
SLSUBBSN	-32%	-15%	0%	13%	26%	9%	4%	0%	-3%	-6%
TLAPS	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SOL_AWC	83%	26%	0%	-28%	-49%	9%	3%	0%	-1%	0%
CH_COV	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CH_EROD	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CH_K2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CN_2	50%	26%	0%	-28%	-53%	-3%	-2%	0%	3%	7%

④ 동홍천 유역의 민감도 분석

SWAT 모형의 28개의 매개변수 중 본 연구와 관련하여 선정된 13개 항목의 매개변수를 동홍천 유역에 적용하여 민감도 분석을 실시한 결과는 Fig. 4.39~4.40과 Table. 4.31과 같다. 13개의 매개변수 중 ESCO, TLAPS, CH_COV, CH_EROD, CH_K2 항목은 함양량과 유출량 변화율에 영향이 없으며, SLOPE, SLSUBBSN, SOL_AWC, CN_2 항목이 함양량 변화율과 유출량 변화율에 민감한 반응을 나타냈다.

동홍천 유역의 유출량에 대한 매개변수 민감도는 전체적으로 소유역의 평균 경사도 계수인 SLOPE 항목이 최소 -5%까지 변화율을 나타냈으며 토양층 유효수분량인 SOL_AWC 항목이 12%의 변화율을 나타냈다. 또한 매개변수가 증가함에 따라 SOL_AWC, SLSUBBSN, GW_REVAP 항목은 감소하는 경향을 나타냈으나 반대로 SLOPE, REVAPMN 항목은 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 4.39; Table 4.31).

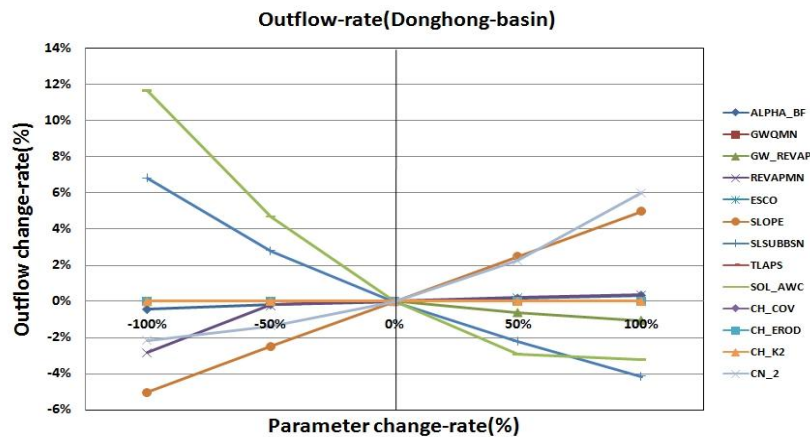


Fig. 4.39 Outflow-rate change of Donghong-basin by changing parameters

동홍천 유역의 함양량에 대한 매개변수 민감도는 전체적으로 토양층 유효수분량 SOL_AWC 항목이 최소 -41%에서 최대 54%의 민감한 변화율을 나타냈다. 또한 매개변수가 증가함에 따라 얇은 대수층의 REVAP 계수인 GW_REVAP, 토양층 유효수분량 SOL_AWC, 유출곡선지수인 CN_2, SOL_AWC 항목이 감소하는 경향을 나타냈으나 SLSUBBSN 항목은 반대로 증가하는 경향을 나타냈다. 이 항목 외에도 기저유출 감수 상수인 ALPHA_BF 항목과 얇은 대수층에 대한 REVAP 계수인 GW_REVAP, 침투에 대한 얇은 대수층의 임계수분량의 매개변수인 REVAPMN 항목이 함양량의 변화에 반응을 나타

냈으며 이 중 GW_REVAP 항목이 최소 -5%의 변화율을 나타냈다(Fig. 4.40; Table 4.31).

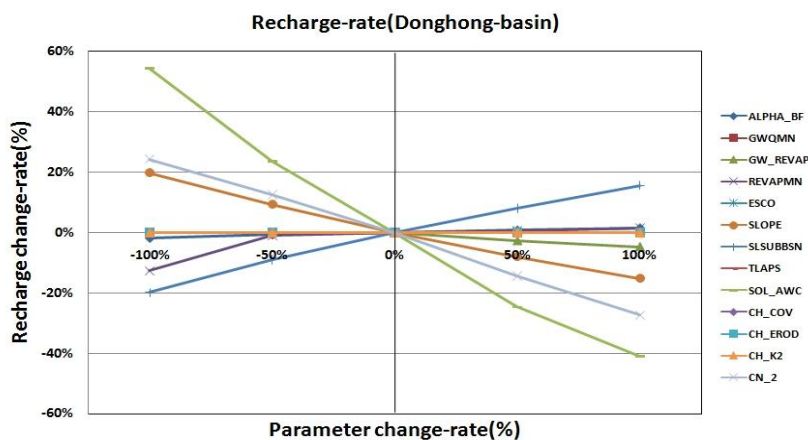


Fig. 4.40 Recharge-rate change of Donghong-basin by changing parameters

Table 4.31 The changes of outflow and recharge-rates by changing parameters; ④ Donghong-basin

매개변수	함양량 변화율(%)					유출량 변화율(%)				
	-100	-50	0	+50	+100	-100	-50	0	+50	+100
ALPHA_BF	-2%	-1%	0%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%
GWQMN	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
GW_REVAP	0%	0%	0%	-3%	-5%	0%	0%	0%	-1%	-1%
REVAPMN	-13%	-1%	0%	1%	2%	-3%	0%	0%	0%	0%
ESCO	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SLOPE	20%	9%	0%	-8%	-15%	-5%	-2%	0%	3%	5%
SLSUBBSN	-20%	-9%	0%	8%	16%	7%	3%	0%	-2%	-4%
TLAPS	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SOL_AWC	54%	23%	0%	-25%	-41%	12%	5%	0%	-3%	-3%
CH_COV	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CH_EROD	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CH_K2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CN_2	24%	13%	0%	-14%	-27%	-2%	-1%	0%	2%	6%

⑤ A 유역의 민감도 분석

SWAT 모형의 28개의 매개변수 중 본 연구와 관련하여 선정된 13개 항목의 매개변수를 A 유역에 적용하여 민감도 분석을 실시한 결과는 Fig. 4.41~4.42와 Table. 4.32와 같다. 13개의 매개변수 중 ESCO, TLAPS, CH_COV, CH_EROD, CH_K2 항목은 함양량과 유출량 변화율에 영향이 없으며, SLOPE, SLSUBBSN, SOL_AWC, CN_2 항목이 함양량 변화율과 유출량 변화율에 민감한 반응을 나타냈다.

A 유역의 유출량에 대한 매개변수 민감도는 전체적으로 소유역의 토양층 유효수분량인 SOL_AWC와 유출곡선지수인 CN_2 항목이 최소 -5%의 변화율을 나타냈으며 SOL_AWC 항목이 최대 15%의 변화율을 나타냈다. 또한 매개변수가 증가함에 따라 SOL_AWC, SLSUBBSN, GW_REVAP, CN_2 항목은 감소하는 경향을 나타냈으나 반대로 SLOPE는 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 4.41; Table 4.32).

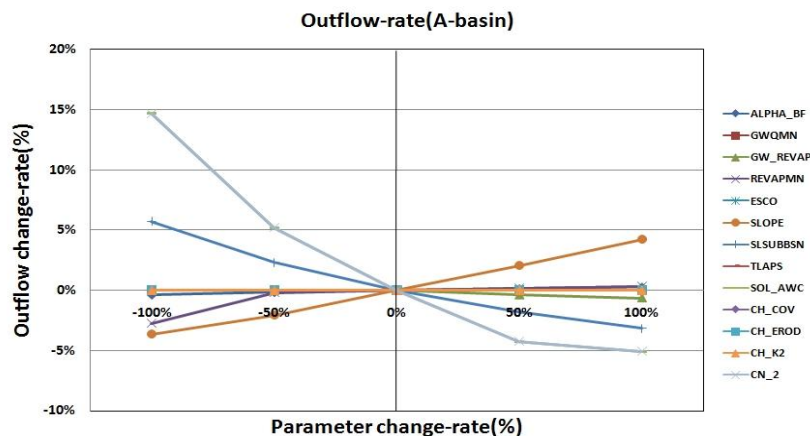


Fig. 4.41 Outflow-rate change of A-basin by changing parameters

A 유역의 함양량에 대한 매개변수 민감도는 전체적으로 토양층 유효수분량 SOL_AWC 항목이 최소 -35%에서 최대 61%의 민감한 변화율을 나타냈다. 또한 매개변수가 증가함에 따라 얇은 대수층에 대한 REVAP 계수인 GW_REVAP, 소유역의 평균 경사도 계수인 SLOPE, 토양층 유효수분량 SOL_AWC, 유출곡선지수인 CN_2 항목이 감소하는 경향을 나타냈으나 SLSUBBSN, REVAPMN 항목은 반대로 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 4.42; Table 4.32).

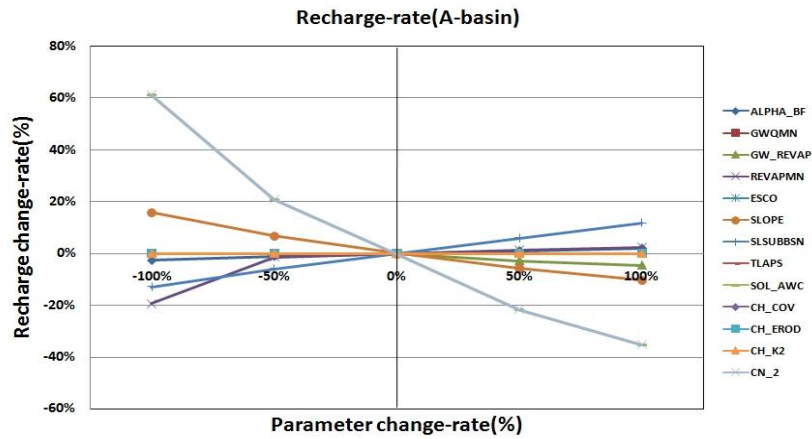


Fig. 4.42 Recharge-rate change of A-basin by changing parameters

Table 4.32 The changes of outflow and recharge-rates by changing parameters; ⑤
A-basin

매개변수	함양량 변화율(%)					유출량 변화율(%)				
	-100	-50	0	+50	+100	-100	-50	0	+50	+100
ALPHA_BF	-3%	-1%	0%	1%	2%	0%	0%	0%	0%	0%
GWQMN	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
GW_REVAP	0%	0%	0%	-3%	-5%	0%	0%	0%	0%	-1%
REVAPMN	-19%	-1%	0%	1%	2%	-3%	0%	0%	0%	0%
ESCO	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SLOPE	16%	7%	0%	-6%	-10%	-4%	-2%	0%	2%	4%
SLSUBBSN	-13%	-6%	0%	6%	12%	6%	2%	0%	-2%	-3%
TLAPS	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SOL_AWC	61%	21%	0%	-22%	-35%	15%	5%	0%	-4%	-5%
CH_COV	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CH_EROD	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CH_K2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CN_2	61%	21%	0%	-22%	-35%	15%	5%	0%	-4%	-5%

⑥ B 유역의 민감도 분석

SWAT 모형의 28개의 매개변수 중 본 연구와 관련하여 선정된 13개 항목의 매개변수를 B유역에 적용하여 민감도 분석을 실시한 결과는 Fig. 4.43~4.40과 Table. 4.33과 같다. 13개의 매개변수 중 ESCO, TLAPS, CH_COV, CH_EROD, CH_K2 항목은 함양량과 유출량 변화율에 영향이 없으며, SLOPE, SLSUBBSN, SOL_AWC, CN_2 항목이 함양량 변화율과 유출량 변화율에 민감한 반응을 나타냈다.

B 유역의 유출량에 대한 매개변수 민감도는 전체적으로 소유역의 평균 경사도 계수인 SLOPE 항목이 최소 -8%까지 변화율을 나타냈으며 경사의 길이를 나타내는 SLSUBBSN 항목이 최대 9%의 변화율을 나타냈다. 또한 매개변수가 증가함에 따라 기저유량의 얇은 대수층에 대한 입계 수분량인 GW_REVAP, SLSUBBSN, 소유역의 토양층 유효수분량인 SOL_AWC 항목은 감소하는 경향을 나타냈으나 소유역의 평균 경사도 계수인 SLOPE와 유출곡선지수인 CN_2 항목은 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 4.43; Table 4.33).

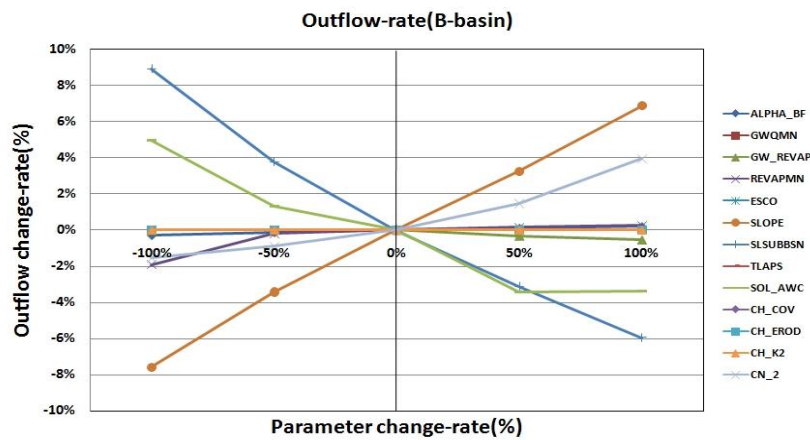


Fig. 4.43 Outflow-rate change of B-basin by changing parameters

B 유역의 함양량에 대한 매개변수 민감도는 전체적으로 토양층 유효수분량 SOL_AWC 항목이 최소 -44%에서 최대 48%의 민감한 변화율을 나타냈다. 또한 매개변수가 증가함에 따라 얇은 대수층에 대한 REVAP 계수인 GW_REVAP, 소유역의 평균 경사도 계수인 SLOPE, 토양층 유효수분량 SOL_AWC, 유출곡선지수인 CN_2 항목이 감소하는 경향을 나타냈으나 SLSUBBSN, REVAPMN, ALPHA_BF 항목은 반대로 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 4.44; Table 4.33).

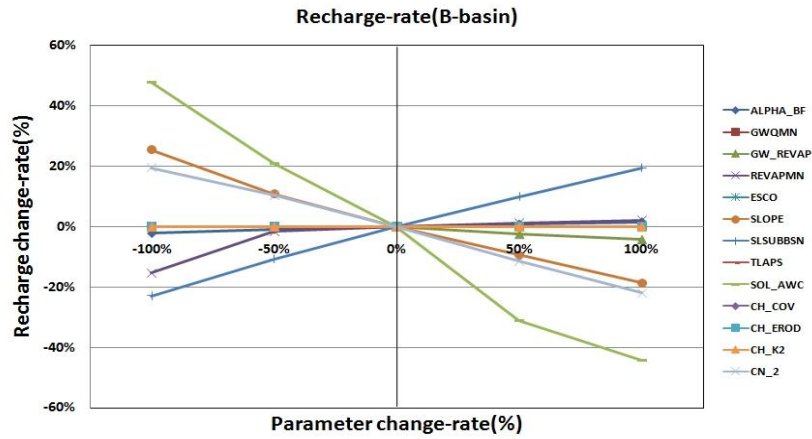


Fig. 4.44 Recharge-rate change of B-basin by changing parameters

Table 4.33 The changes of outflow and recharge-rates by changing parameters; ⑥ B-basin

매개변수	함양량 변화율(%)					유출량 변화율(%)				
	-100	-50	0	+50	+100	-100	-50	0	+50	+100
ALPHA_BF	-2%	-1%	0%	1%	2%	0%	0%	0%	0%	0%
GWQMN	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
GW_REVAP	0%	0%	0%	-3%	-4%	0%	0%	0%	0%	-1%
REVAPMN	-15%	-2%	0%	1%	2%	-2%	0%	0%	0%	0%
ESCO	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SLOPE	25%	11%	0%	-9%	-19%	-8%	-3%	0%	3%	7%
SLSUBBSN	-23%	-11%	0%	10%	19%	9%	4%	0%	-3%	-6%
TLAPS	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SOL_AWC	48%	21%	0%	-31%	-44%	5%	1%	0%	-3%	-3%
CH_COV	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CH_EROD	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CH_K2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CN_2	19%	10%	0%	-11%	-22%	-2%	-1%	0%	1%	4%

⑦ C 유역의 민감도 분석

SWAT 모형의 28개의 매개변수 중 본 연구와 관련하여 선정된 13개 항목의 매개변수를 C유역에 적용하여 민감도 분석을 실시한 결과는 Fig. 4.45~4.46과 Table. 4.34와 같다. 13개의 매개변수 중 ESCO, TLAPS, CH_COV, CH_EROD, CH_K2 항목은 함양량과 유출량 변화율에 영향이 없으며, SLOPE, SLSUBBSN, SOL_AWC, CN_2 항목이 함양량 변화율과 유출량 변화율에 민감한 반응을 나타냈다.

C 유역의 유출량에 대한 매개변수 민감도는 전체적으로 소유역의 토양층 유효수분량인 SOL_AWC가 최소 -6%에서 최대 14%의 변화율을 나타냈다. 또한 매개변수가 증가함에 따라 또한 매개변수가 증가함에 따라 기저유량에 대한 얇은 대수층의 임계 수분량인 GW_REVAP, SLSUBBSN, 소유역의 토양층 유효수분량인 SOL_AWC 항목은 감소하는 경향을 나타냈으나 소유역의 평균 경사도 계수인 SLOPE와 유출곡선지수인 CN_2 항목은 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 4.45; Table 4.34).

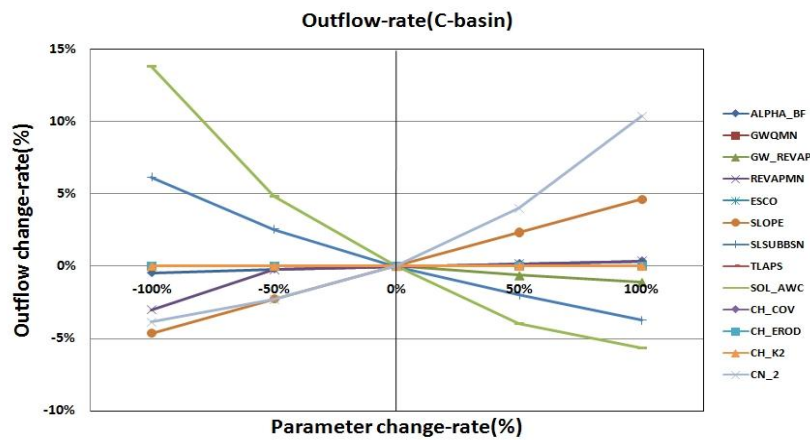


Fig. 4.45 Outflow-rate change of C-basin by changing parameters

B 유역의 함양량에 대한 매개변수 민감도는 전체적으로 토양층 유효수분량 SOL_AWC 항목이 최소 -31%에서 최대 43%의 민감한 변화율을 나타냈다. 또한 매개변수가 증가함에 따라 얇은 대수층에 대한 REVAP 계수인 GW_REVAP, 소유역의 평균 경사도 계수인 SLOPE, 토양층 유효수분량 SOL_AWC, 유출곡선지수인 CN_2 항목이 감소하는 경향을 나타냈으나 SLSUBBSN, REVAPMN, ALPHA_BF 항목은 반대로 증가하는 경향을 나타냈다 (Fig. 4.46; Table 4.34).

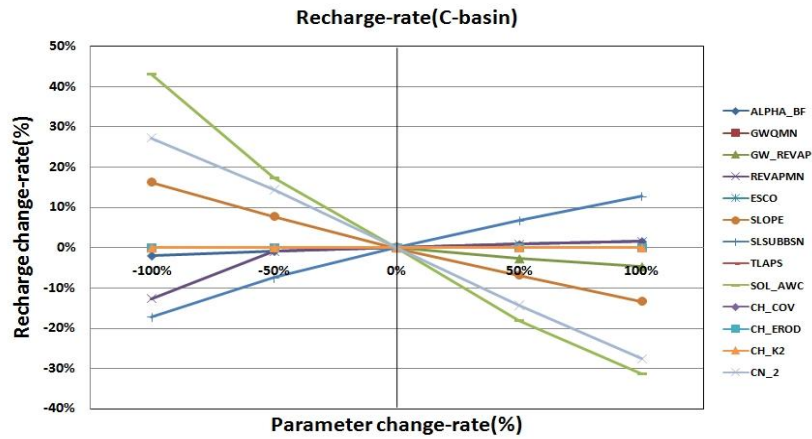


Fig. 4.46 Recharge-rate change of C-basin by changing parameters

Table 4.34 The changes of outflow and recharge-rates by changing parameters; ⑦
C-basin

매개변수	함양량 변화율(%)					유출량 변화율(%)				
	-100	-50	0	+50	+100	-100	-50	0	+50	+100
ALPHA_BF	-2%	-1%	0%	1%	2%	0%	0%	0%	0%	0%
GWQMN	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
GW_REVAP	0%	0%	0%	-3%	-5%	0%	0%	0%	-1%	-1%
REVAPMN	-13%	-1%	0%	1%	2%	-3%	0%	0%	0%	0%
ESCO	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SLOPE	16%	8%	0%	-7%	-13%	-5%	-2%	0%	2%	5%
SLSUBBSN	-17%	-7%	0%	7%	13%	6%	3%	0%	-2%	-4%
TLAPS	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SOL_AWC	43%	17%	0%	-18%	-31%	14%	5%	0%	-4%	-6%
CH_COV	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CH_EROD	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CH_K2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CN_2	27%	14%	0%	-14%	-28%	-4%	-2%	0%	4%	10%

본 연구와 관련하여 선정된 13개 항목의 매개변수를 중서귀 유역의 7개 소유역에 대해 민감도를 분석한 전체 결과는 Fig. 4.47~4.48과 같다.

매개변수 민감도의 변화 범위는 유출량과 함양량에 대해 공통적으로 GWQMN(기저유량에 대한 얇은 대수층의 임계수분량), ESCO(토양증발 보상계수), TLAPS(온도 변동 계수), CH_COV(하천의 피복 요소), CH_EROD(하천의 침식성 요소), CH_K2(하천에서의 수리전도도 계수) 항목은 매개변수 민감도에 영향이 없음을 나타냈다. 이 외에 7개 매개변수 항목은 소유역별로 변화 범위의 차이를 나타냈으며 ALPHA_BF(기저유출 감수 상수) 항목은 유출량의 민감도에 영향이 없으나 함양량의 민감도 변화에 약 4%의 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한 SWAT 모델을 적용한 결과 유출량은 최소 -7%에서 최대 12%의 보정범위를 나타내며 함양량은 -46%에서 78%의 보정범위를 나타냈다.

본 연구의 SWAT 모델을 활용한 유출량과 함양량을 산정하는 과정에서 특정 매개변수가 민감도를 나타내는 이유는 SWAT 모델에 적용되는 계산식에 기인한다.

SWAT 모델은 유출량을 산하는 과정에서 유출곡선법(NRCS-CN)방법과 Green & Ampt 침투법이 적용 계산방법으로 제공된다. 이 중 NRCS-CN방법은 유출량 계산 시 직접유출량 산정에만 적용되며 토양속의 침투를 고려한 유출량 계산에는 Green & Ampt 침투법이 적용된다. 또한 함양량을 산정하는 과정에서 지표하 흐름의 모의를 위해 동역학적 저류모형(kinematic storage model)이 적용된다. 따라서 SWAT 모델의 유출량과 함양량 모의를 위한 각각의 관련 식 적용과정에서 7개 소유역의 토지이용도와 토양도 분포 범위가 가장 영향이 큰 변수로 작용되었기 때문에 13개 매개변수 중 특정 매개변수만 민감도를 나타냈으며 소유역별로 민감도 범위가 다르게 나타난다. 또한 소유역의 평균 경사도 계수인 SLOPE와 경사 길이인 SLSUBBSN 항목의 매개변수는 지형특성과 관련되며 토양수의 이동과 관련된 동역학적 저류모형(kinematic storage model)의 식에 적용되는 변수이므로 전체 물수지 분석을 산정하는 SWAT 모델에서 함양량과 유출량 계산결과에 영향을 준다.

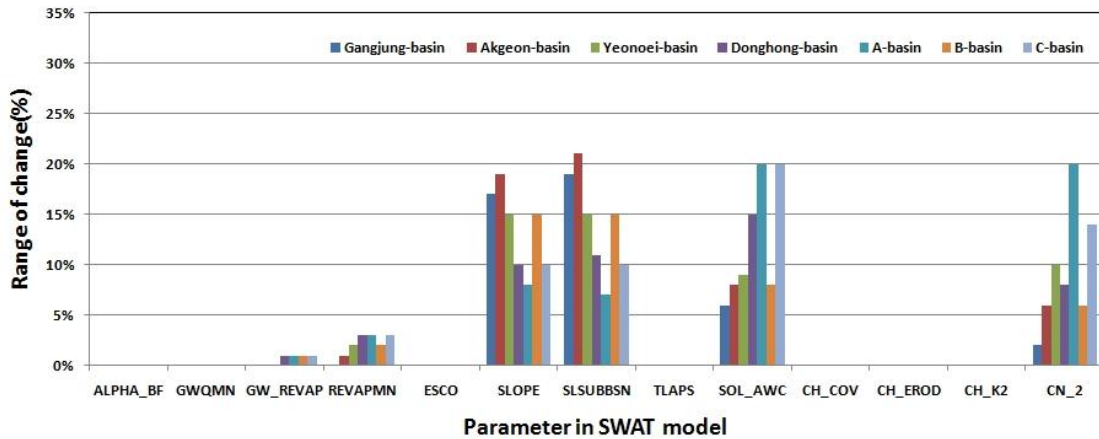


Fig. 4.47 The range of Outflow-rate change by Parameters in SWAT model

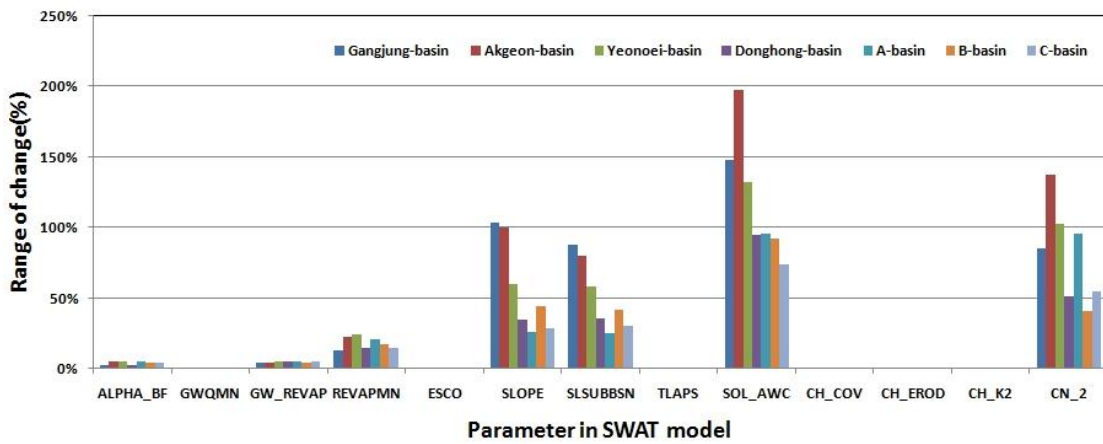


Fig. 4.48 The range of Recharge-rate change by Parameters in SWAT model

1.2.2 SWAT 모델의 보정과 적용

(1) 강정천 유역

강정천 유역을 대상으로 SWAT 모델링 결과를 보정하기 위해 2011년 7월부터 2015년 12월까지 최신 정밀 관측기기인 ADCP 현장실측관측 자료를 이용하였으며, 매개변수를 보정한 결과는 Fig. 4.47과 같다.

강정천 유역의 민감도 분석은 AMC-II에서의 SCS 유출곡선지수인 CN_2와 토양층 유효수분량인 SOL_AWC, 소유역의 평균 경사도 계수인 SLOPE, 경사길이를 보정하는 SLSUBBSN 인자를 보정하였다. 이 중 HRU General 항목의 세부 매개변수인 SLOPE, SLSUBBSN는 다른 인자 중 가장 민감하고 지형특성과 관련되므로 CN_2

와 SOL_AWC를 보정한 후에 마지막으로 보정하였다.

매개변수 적용은 CN-2를 -4 하향조정, SOL_AWC를 +0.02 상향조정, SLOPE를 +3% 상향조정 하였으며 모의결과를 보정한 결과 R^2 값이 Fig. 4.51(a)와 같이 0.87을 나타냈다.

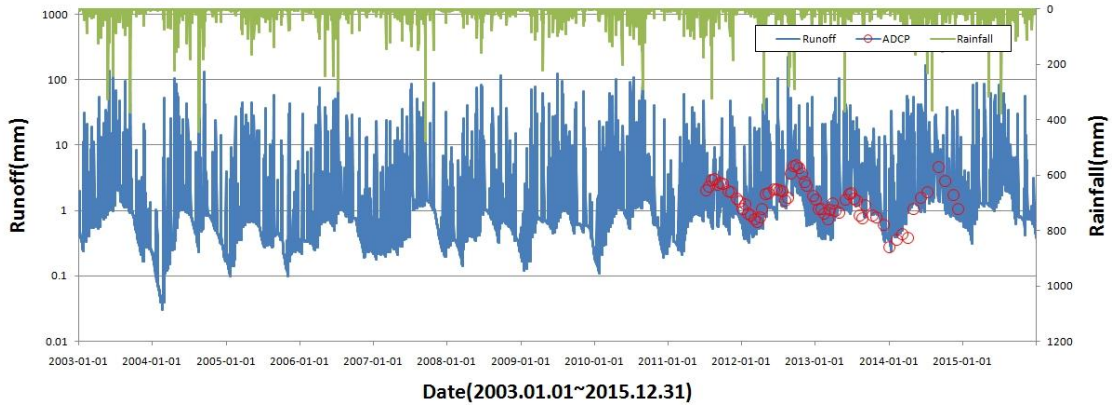


Fig. 4.49 Runoff simulation result of Gangjung stream basin

Table 4.35. Calibrated parameters of Gangjung-basin

매개변수	영향인자	하한치	상한치	보정값
CN_2	AMC-II에서의 SCS 유출곡선지수	35	98	-4
SOL_AWC	토양층 유효수분량	0	1	+0.02
SLOPE	소유역의 평균 경사도 계수(%)	0.0001	0.6	+3%
SLSUBBSN	경사길이(m)	10	150	none

(2) 약근천 유역

약근천 유역을 대상으로 SWAT 모델링 결과를 보정하기 위해 2011년 7월부터 2015년 12월까지 최신 정밀 관측기기인 ADCP 현장실측관측 자료를 이용하였으며, 매개변수를 보정한 결과는 Fig. 4.48과 같다.

약근천 유역의 민감도 분석은 AMC-II에서의 SCS 유출곡선지수인 CN_2와 토양층 유효수분량인 SOL_AWC, 소유역의 평균 경사도 계수인 SLOPE, 경사길이를 보정하는 SLSUBBSN 인자를 보정하였다. 이 중 HRU General의 항목의 세부 매개변수인 SLOPE, SLSUBBSN는 다른 인자 중 가장 민감하고 지형특성과 관련되므로 CN_2와 SOL_AWC를 보정한 후에 마지막으로 보정하였다.

매개변수 적용은 CN-2를 -5 하향조정, SOL_AWC를 +0.03 상향조정, SLOPE를 +4% 상향조정, SLSUBBSN를 +5% 상향조정 하였으며 모의결과를 보정한 결과 R^2 값이 Fig. 4.51(b)와 같이 0.93을 나타냈다.

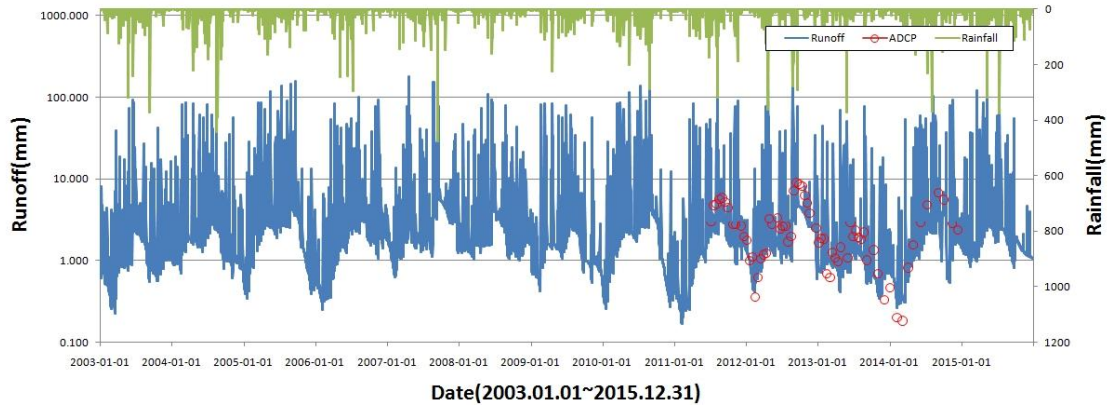


Fig. 4.50 Runoff simulation result of Akgeon stream

Table 4.36. Calibrated parameters of Akgeon-basin

매개변수	영향인자	하한치	상한치	보정값
CN_2	AMC-II에서의 SCS 유출곡선지수	35	98	-5
SOL_AWC	토양층 유효수분량	0	1	+0.03
SLOPE	소유역의 평균 경사도 계수(%)	0.0001	0.6	+4%
SLSUBBSN	경사길이(m)	10	150	+5%

(3) 연외천 유역

연외천 유역을 대상으로 SWAT 모델링 결과를 보정하기 위해 2011년 7월부터 2015년 12월까지 최신 정밀 관측기기인 ADCP 현장실측관측 자료를 이용하였으며, 매개변수를 보정한 결과는 Fig. 4.49과 같다.

연외천 유역의 민감도 분석은 AMC-II에서의 SCS 유출곡선지수인 CN_2와 토양층 유효수분량인 SOL_AWC, 소유역의 평균 경사도 계수인 SLOPE, 경사길이를 보정하는 SLSUBBSN 인자를 보정하였다. 이 중 HRU General의 항목의 세부 매개변수인 SLOPE, SLSUBBSN는 다른 인자 중 가장 민감하고 지형특성과 관련되므로 CN_2와 SOL_AWC를 보정한 후에 마지막으로 보정하였다.

매개변수 적용은 CN-2를 +3 상향조정, SOL_AWC를 -0.03 하향조정, SLOPE를

-2% 하향조정, SLSUBBSN를 -3% 하향조정 하였으며 모의결과를 보정한 결과 R^2 값이 Fig. 4.51(C)와 같이 0.83을 나타냈다.

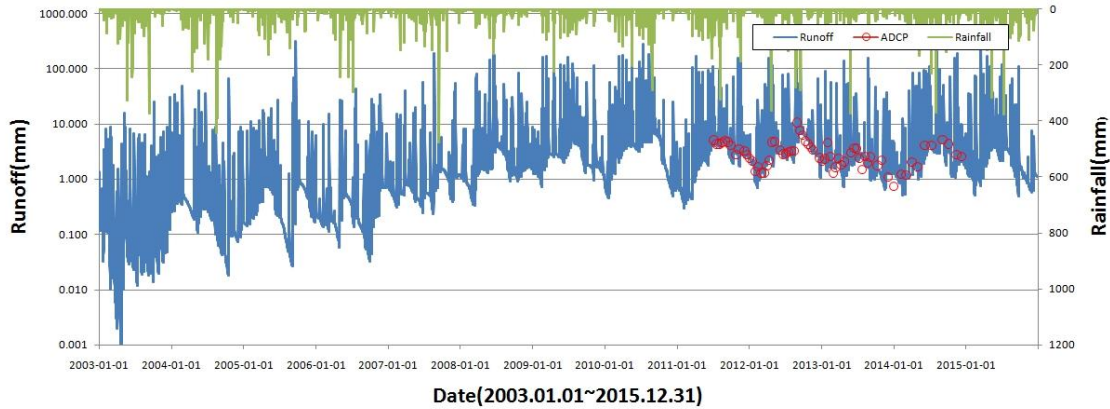


Fig. 4.51 Runoff simulation result of Yeonoei stream

Table 4.37. Calibrated parameters of Yeonoei-basin

매개변수	영향인자	하한치	상한치	보정값
CN_2	AMC-II에서의 SCS 유출곡선지수	35	98	+3
SOL_AWC	토양층 유효수분량	0	1	-0.04
SLOPE	소유역의 평균 경사도 계수(%)	0.0001	0.6	-2%
SLSUBBSN	경사길이(m)	10	150	-3%

(4) 동홍천 유역

동홍천 유역을 대상으로 SWAT 모델링 결과를 보정하기 위해 2011년 7월부터 2015년 12월까지 최신 정밀 관측기기인 ADC 현장실측관측 자료를 이용하였으며, 매개변수를 보정한 결과는 Fig. 4.50과 같다.

연외천 유역의 민감도 분석은 AMC-II에서의 SCS 유출곡선지수인 CN_2와 토양층 유효수분량인 SOL_AWC, 소유역의 평균 경사도 계수인 SLOPE, 경사길이를 보정하는 SLSUBBSN 인자를 보정하였다. 이 중 HRU General의 항목의 세부 매개변수인 SLOPE, SLSUBBSN는 다른 인자 중 가장 민감하고 지형특성과 관련되므로 CN_2와 SOL_AWC를 보정한 후에 마지막으로 보정하였다.

매개변수 적용은 CN-2를 +5 상향조정, SOL_AWC를 -0.03 하향조정, SLOPE를 -4% 하향조정, SLSUBBSN를 -9% 하향조정 하였으며 모의결과를 보정한 결과 R^2 값이 Fig. 4.51(C)와 같이 0.81을 나타냈다.

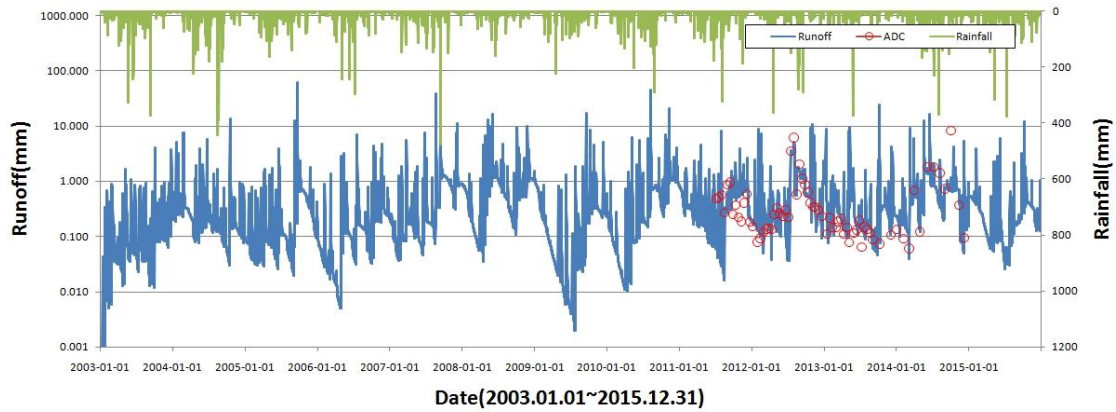
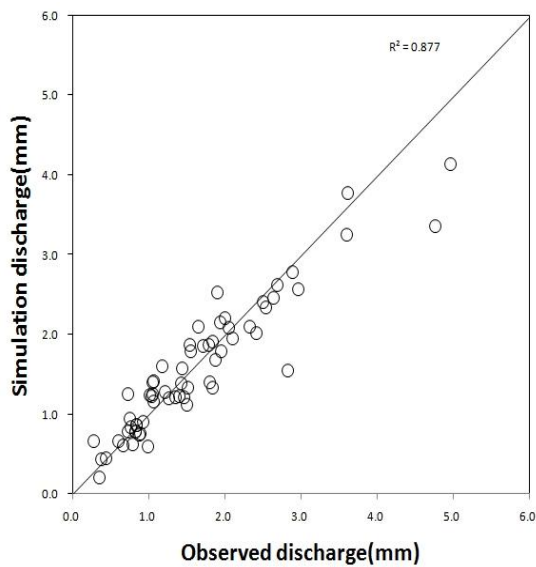


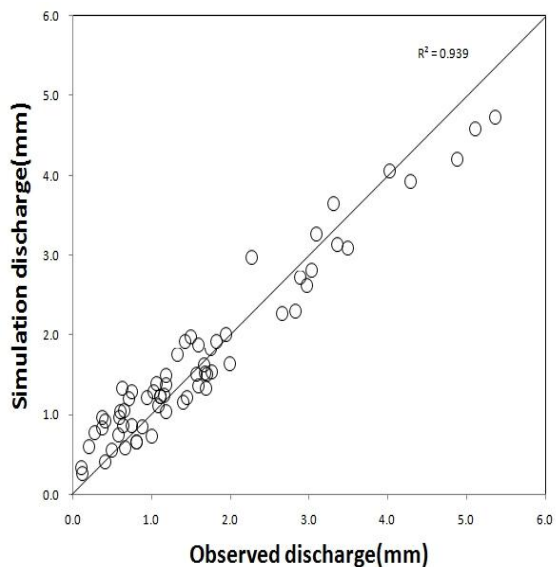
Fig. 4.52 Runoff simulation result of Donghomg stream

Tabl 4.38. Calibrated parameters of Donghong-basin

매개변수	영향인자	하한치	상한치	보정값
CN_2	AMC-II에서의 SCS 유출곡선지수	35	98	+5
SOL_AWC	토양층 유효수분량	0	1	-0.03
SLOPE	소유역의 평균 경사도 계수(%)	0.0001	0.6	-4%
SLSUBSN	경사길이(m)	10	150	-9%



(a)



(b)

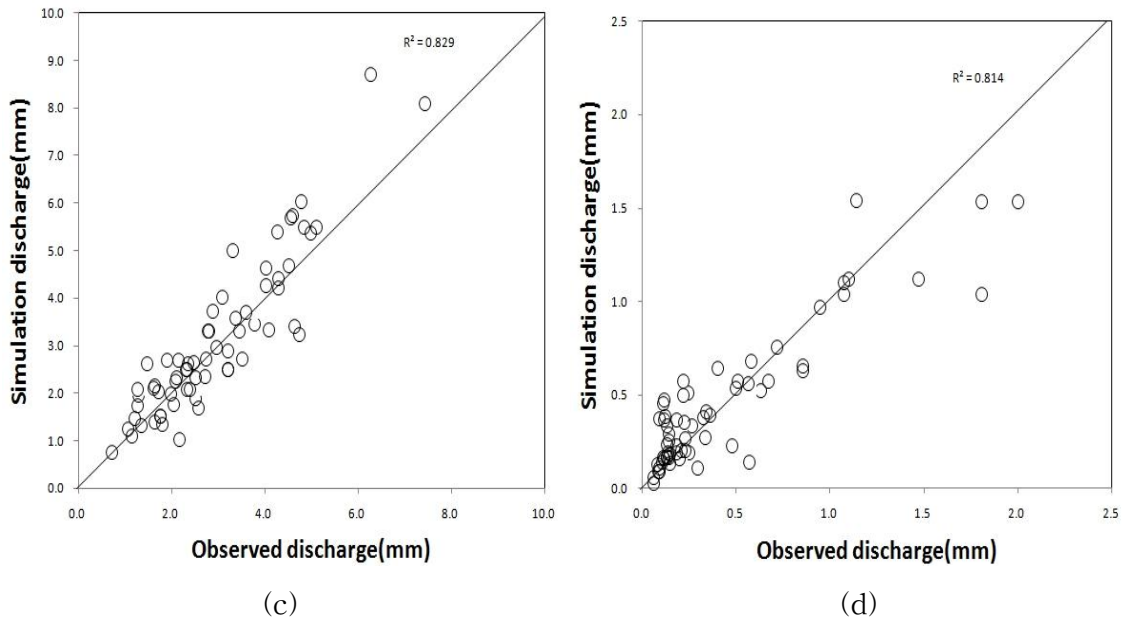


Fig. 4.53 Result of calibration; a)Gangjung; b)Akgeon; c)Yoenoei; d)Donghong

1.3 지하수 함양량 추정 결과 및 고찰

SWAT에서 산출된 2012~2015년 지하수 함양량을 지하수 유동모델에 적용하여 함양에 따른 부정류상태를 모의하였다. 2012년의 지하수 함양량은 58.3(3월)~223.1 mm/월(9월)로 산출되었으며, 연평균 121.5 mm로 확인되었다. 2013년은 64.1(2월)~180.6 mm/월(6월), 연평균 95.3 mm이며, 2014년은 77.1(4월)~210.9 mm/월(9월), 연평균 113.4 mm, 2015년은 64.5(3월)~161.0 mm/월(6월), 연평균 106.6 mm로 확인되었다. 지하수 함양량은 갈수기인 12월부터 3월까지 작게 나타나며, 풍수기인 6월~10월까지 큰 폭의 함양특성이 나타났다. 특히, 2013년의 경우 강우량이 적은 시기로 평년에 비해 약 20%정도 낮은 함양률을 보였다.

소유역별 함양특성을 확인한 결과 ZONE-1 지역에서 가장 크게 함양되는 것으로 확인되었으며, ZONE-5, 8, 9, 11유역에서도 비교적 큰 함양특성이 나타났다. 해당지역의 상시 흐르는 하천인 악근천, 강정천, 동홍천이 분포하는 지역으로 지속적인 함양특성으로 함양량이 크게 산출된 것으로 판단된다.

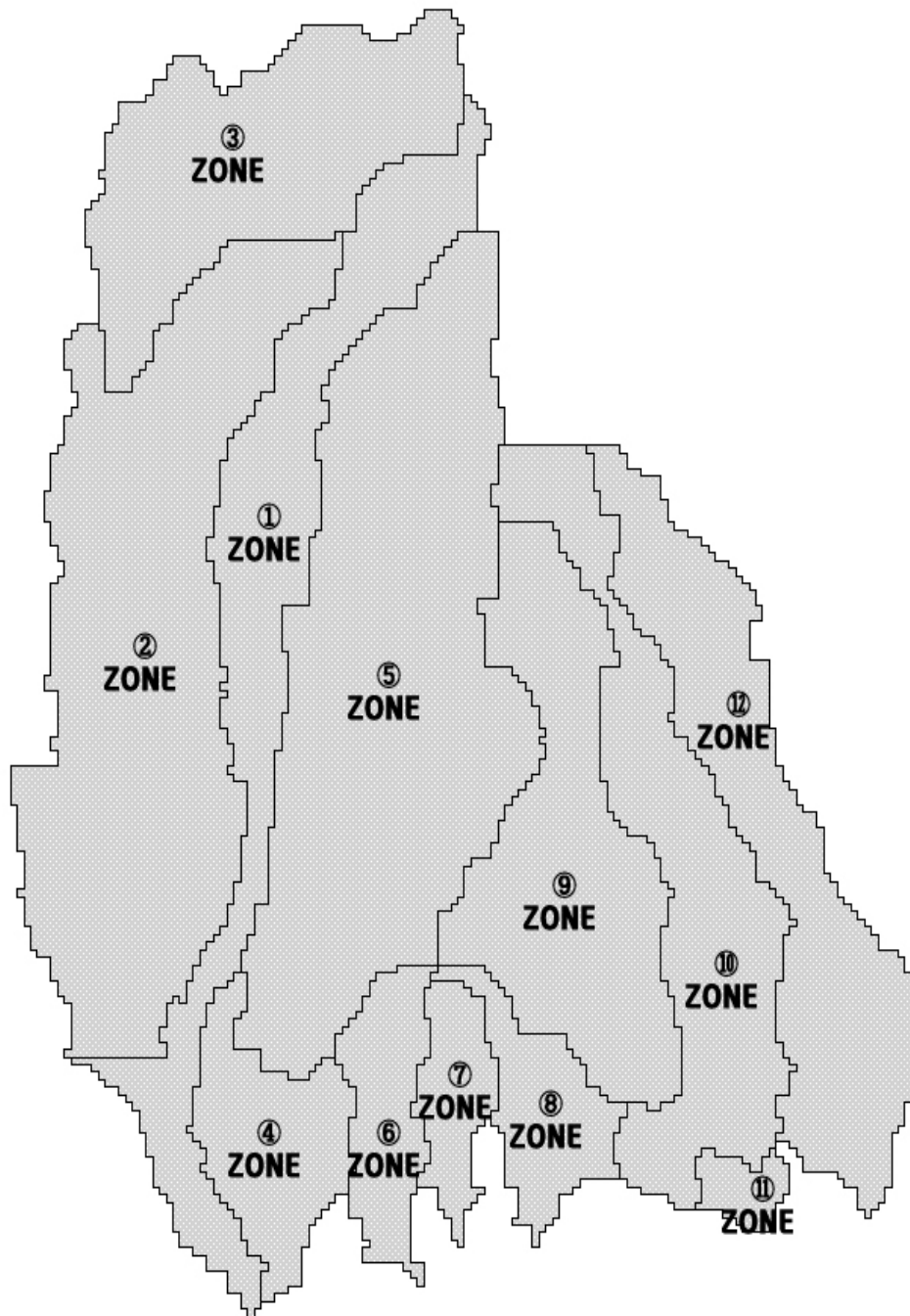


Fig 4.54 Recharge area of the studied basin

Table 4.39 Monthly recharge rates of sub-basins (2012~2015) Unit : (mm/day)

구분	2012년 월별 함양량												
	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	합계
1 ZONE	31.6	14.0	12.4	27.8	37.2	42.1	67.3	88.0	145.1	134.5	25.5	17.7	643.3
2 ZONE	2.0	1.7	2.7	5.2	3.3	2.1	1.1	0.6	0.7	0.2	3.4	3.4	26.4
3 ZONE	1.9	1.8	3.0	5.8	3.4	2.3	1.2	0.7	0.8	0.6	3.9	3.9	29.2
4 ZONE	21.1	9.7	9.5	19.3	18.3	13.5	10.3	17.5	18.1	8.2	15.6	13.1	174.2
5 ZONE	0.0	1.0	2.4	4.7	2.7	1.9	1.0	0.5	0.6	0.1	2.4	2.8	20.1
6 ZONE	9.1	4.9	5.7	11.4	9.5	6.7	4.7	6.7	7.0	3.1	8.3	7.5	84.5
7 ZONE	7.1	4.8	5.7	11.3	9.2	7.3	7.1	7.7	12.0	10.5	8.1	7.2	98.2
8 ZONE	1.7	1.9	3.0	5.8	3.5	2.4	1.3	0.7	0.8	0.3	3.6	3.6	28.3
9 ZONE	4.2	3.3	4.7	9.1	6.2	4.4	2.5	2.3	2.4	1.4	5.9	5.7	52.2
10 ZONE	6.1	4.0	5.2	10.2	7.4	4.8	2.7	1.9	2.1	1.0	7.0	6.6	59.1
11 ZONE	8.0	5.1	5.7	11.4	9.6	8.0	8.4	9.1	14.5	13.0	8.5	7.3	108.6
12 ZONE	9.2	6.2	6.8	13.5	11.7	9.6	10.4	11.8	19.1	17.0	10.0	8.6	133.8
합계	102.0	58.3	66.6	135.5	122.0	105.1	118.1	147.6	223.1	189.9	102.2	87.3	1457.8

구분	2013년 월별 함양량												
	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	합계
1 ZONE	14.3	11.2	14.1	17.4	28.2	36.7	18.4	26.2	52.3	31.6	27.1	26.0	303.6
2 ZONE	3.2	2.9	3.0	2.4	4.7	7.1	3.0	3.0	1.8	2.0	2.0	2.6	37.7
3 ZONE	3.7	3.4	3.5	3.1	6.6	9.9	4.0	3.9	2.3	2.6	2.6	3.2	48.8
4 ZONE	11.1	8.9	10.6	10.4	15.9	23.7	12.8	9.9	6.0	14.5	14.7	14.9	153.3
5 ZONE	2.9	2.7	2.8	2.2	5.0	7.4	2.8	2.9	1.7	1.2	1.2	1.9	34.7
6 ZONE	6.7	5.6	6.3	5.8	9.5	14.2	6.9	5.8	3.7	6.9	7.0	7.5	86.0
7 ZONE	6.4	5.4	6.1	5.6	10.5	15.3	7.2	6.8	6.6	7.0	6.9	7.4	91.2
8 ZONE	3.4	3.0	3.2	2.7	5.9	8.8	3.4	3.4	2.1	2.4	2.5	3.2	43.9
9 ZONE	5.4	4.7	5.2	4.2	7.5	11.2	4.8	4.5	3.1	3.4	3.5	4.5	62.1
10 ZONE	6.1	5.1	5.6	4.7	7.8	11.6	5.2	4.7	3.3	5.1	5.2	5.6	70.0
11 ZONE	6.4	5.3	6.1	5.9	10.8	15.6	7.5	7.1	7.9	7.9	7.7	8.0	96.1
12 ZONE	7.4	6.1	7.1	6.9	13.3	19.1	9.3	8.7	8.9	9.6	9.5	9.7	115.5
합계	77.0	64.1	73.7	71.4	125.7	180.6	85.3	86.9	99.8	94.1	89.9	94.5	1143.0

구분	2014년 월별 함양량												
	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	합계
1 ZONE	19.3	18.4	17.7	14.6	20.2	21.4	28.9	40.6	82.9	85.2	76.7	38.4	464.4
2 ZONE	3.2	2.5	3.0	3.2	3.7	3.3	4.3	4.1	5.2	2.0	0.5	1.6	36.6
3 ZONE	3.6	3.0	3.7	4.2	4.9	4.8	6.9	6.6	8.3	3.2	1.3	2.3	52.8
4 ZONE	13.8	14.0	12.3	10.2	11.6	12.1	14.9	15.4	19.5	9.1	11.4	17.1	161.4
5 ZONE	2.5	2.3	2.6	3.3	4.0	3.9	4.7	4.6	5.8	2.3	0.6	0.1	36.6
6 ZONE	7.5	7.4	6.9	6.3	7.1	7.0	8.7	8.8	11.1	5.0	4.5	7.2	87.5
7 ZONE	7.2	6.3	6.6	6.5	7.9	8.4	10.1	10.8	15.7	10.1	6.9	6.0	102.5
8 ZONE	3.6	3.0	3.4	3.8	4.7	4.6	5.9	5.8	7.3	2.8	0.7	1.4	47.2
9 ZONE	5.4	5.2	5.2	5.2	5.3	5.2	6.4	6.4	7.7	3.5	2.3	2.2	59.9
10 ZONE	6.1	6.0	5.8	5.5	5.7	5.1	6.3	6.3	8.0	3.5	1.7	4.4	64.4
11 ZONE	7.5	6.4	6.7	6.5	8.2	8.9	10.7	11.7	17.6	11.9	8.3	7.1	111.4
12 ZONE	8.9	7.3	7.9	7.7	10.2	11.1	13.2	14.3	21.8	14.8	10.2	8.6	136.0
합계	88.6	81.6	81.9	77.1	93.8	95.8	120.9	135.3	210.9	153.5	125.1	96.5	1360.9

구분	2015년 월별 함양량												
	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	합계
1 ZONE	26.8	20.4	18.7	22.2	51.8	41.7	37.0	57.9	59.2	79.9	76.8	68.7	561.0
2 ZONE	1.8	1.4	1.4	1.3	2.2	4.8	4.0	2.7	1.6	0.6	0.3	0.2	22.2
3 ZONE	2.0	1.4	1.2	1.0	2.3	4.5	4.2	3.0	1.6	0.6	0.3	0.2	22.3
4 ZONE	16.1	12.5	12.1	9.8	21.0	26.0	22.2	14.6	7.7	3.5	2.6	2.1	150.2
5 ZONE	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	4.2	3.5	2.6	1.5	0.6	0.3	0.2	13.7
6 ZONE	7.0	5.6	5.4	4.5	9.2	13.2	11.2	7.5	4.1	1.9	1.3	1.0	71.8
7 ZONE	5.8	5.0	5.1	5.1	9.4	12.7	11.0	9.6	7.5	7.2	6.1	5.4	90.1
8 ZONE	1.4	1.2	1.1	0.9	2.3	6.3	5.2	3.7	2.1	0.8	0.4	0.3	25.7
9 ZONE	2.6	2.8	3.3	3.6	4.6	7.6	6.4	4.7	2.6	1.4	1.0	0.7	41.3
10 ZONE	4.9	4.1	4.2	3.8	5.6	9.4	7.9	5.2	3.0	1.6	1.0	0.7	51.5
11 ZONE	6.8	5.6	5.4	5.4	10.4	13.4	11.9	10.7	8.9	9.1	7.9	6.9	102.2
12 ZONE	8.2	6.7	6.5	6.3	13.3	17.2	14.9	13.5	11.1	11.1	9.4	8.5	126.7
합계	83.5	66.7	64.5	64.0	133.1	161.0	139.3	135.5	110.8	118.2	107.3	94.8	1278.7

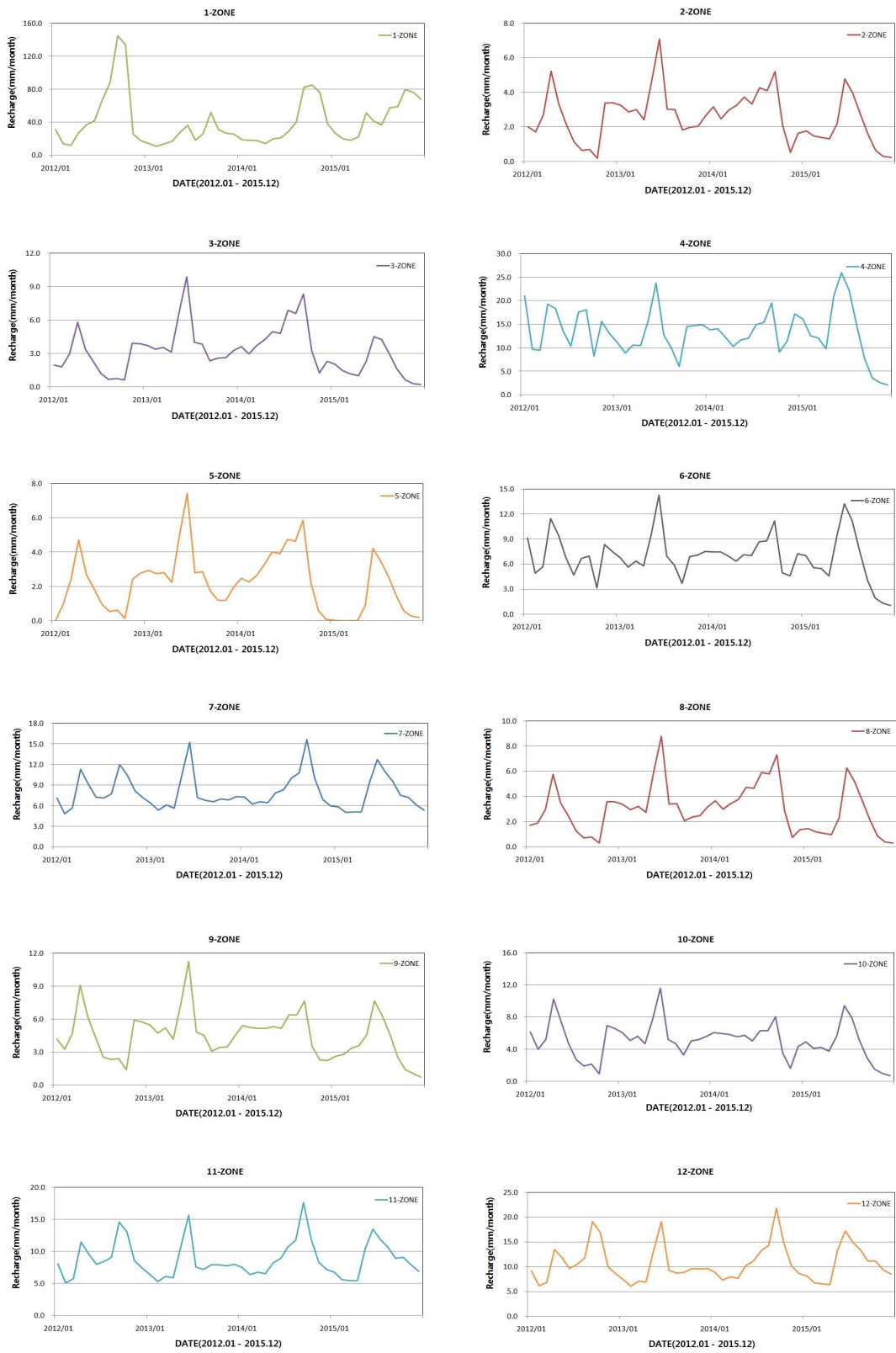


Fig 4.55 Recharge of sub-basin(2012~2015 yaers)

2. 지하수유동해석

2.1 모형의 구축

중서귀수역의 지하수유동해석을 위한 모형 구축방법은 개념모형(conceptual model)을 이용하여 MODFLOW 모델링을 구축하였다. 개념모형을 이용하는 방법은 Map 모듈에서 GIS tool을 이용하여 모델링하려는 지역의 개념모형의 데이터를 grid로 전환하는 방법이다. 투수계수, 모델 경계 등 시뮬레이션에 필요한 모든 데이터와 일정수두경계, sources/sinks의 위치는 개념모형에서 정의될 수 있다.

본 연구에서는 유역경계 Coverage, 투수계수 Coverage, Recharge Coverage, wells Coverage, Observation Coverage 등 5개의 Coverage을 생성하여 개념모형을 구축하였다.

2.1.1 MODFLOW 입력자료

대상지역의 개념모형을 구성을 위해 GIS 툴에서 획득한 shapes File 자료를 Feature Objects로 전환 후 5개의 Coverage로 구분하였다.

본 모델에 입력된 커버리지 중 유역경계와 투수계수 Coverage 구성은 중서귀수역의 경계면으로 설정하여 격자망 구성에 필요한 값과 투수계수를 할당하였으며, Recharge Coverage는 SWAT모형에서 구분한 12개의 소유역의 함양량 값을 입력하여 Coverage를 구성하였다.

Well Coverage 구성은 중서귀수역 내에 위치한 지하수 개발관정 중 현재 개발·이용 중인 477개소의 관정별 양수능력을 입력하였다.

Observation Coverage 구성에는 대상수역 내 지하수위 장기관측망인 JD-SH, JM-YH 등 2개소가 있으나 E.L 200 m 이하부에 위치하고 있고, 관측 지점 및 개수가 공간분포특성이 유역 내 수위특성을 반영한다고 보기에 어렵다고 판단되므로 최근 개발된 지하수관정과 중산간 및 그 이상의 지점의 관정 중 지하수위의 객관성이 확보가 가능한 지점을 선정하여 Table 4.40 및 Fig. 4.54와 같이 총 9개소의

관측지점의 지하수위 값을 입력하였다.

Fig. 4.55와 같이 5개의 Coverage를 구성된 개념모델(conceptual model)은 개별 셀(cell)에 값이 자동 할당되어 GRID로 전환된다.

Table 4.40 Groundwater level observation well used in observation coverage

No	Observation Name	X-좌표	Y-좌표	EL.m	굴착깊이	비고
1	JD-SH	155676.7	72830.1	69	134.5	
2	JM-YH	152710.8	73825.3	122	135.0	
3	F-627	156678.6	74233.5	145	180.0	
4	B-HOTEL	153996.2	73344.1	99	120.0	
5	F-574	157603.7	75775.7	236	255.0	
6	F-526	154305.6	77749.1	450	420.0	
7	IV-RESORT	153197.9	77402.9	400	300.0	
8	T-UNIVERSITY	150000.8	77572.5	417	430.0	
9	FOREST	150473.4	80657.8	765	411.0	

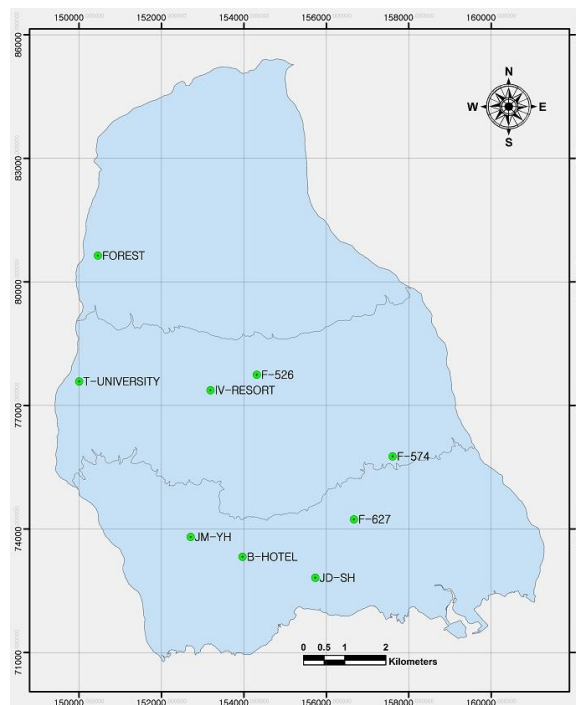


Fig 4.54 The position of the groundwater level observation well

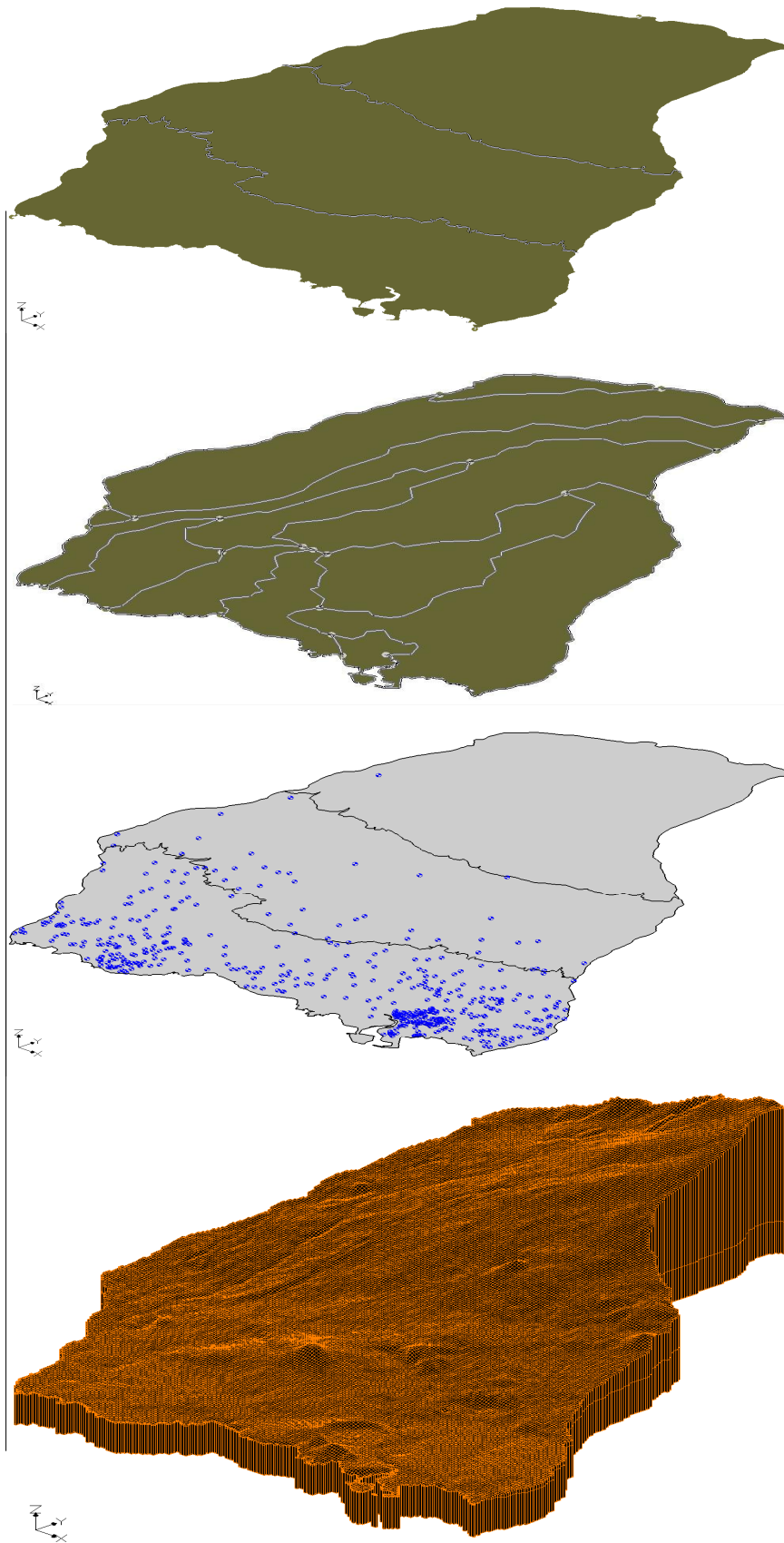


Fig 4.55 Coverage of configuration

1.2.2 지층구조

제주도는 여러 시기에 걸쳐 용암분출에 의해 형성된 화산섬으로 시기를 달리하는 용암류는 다층의 지질구조 특성을 보이거나 모델에서는 이러한 지하지질구조의 복잡함을 표현하는데 어려움이 있기 때문에 본 연구에서는 현무암층과 서귀포층 등 2개의 Layer로 단순화하여 설정하였다.

중서귀수역의 수직적인 지층은 1 layer 현무암층, 2 layer 서귀포층(SGF) 등 2개의 layer로 구분하였으며, 이 중 1층 상부구간은 수치지형도를 이용하여 생성한 수치고도자료(DEM)를 보간(interpolation)하여 실제 수직적인 층을 재현하였다.

하부의 서귀포층 상부경계는 Fig 4.56의 서귀포 포착심도를 토대로 구성하였다. 다만, 중서귀수역 하류측인 해안가 부근에서는 일정수두경계면으로 설정된 해안 경계선의 지하수위(E.L. 0.0 m)보다 저투수성 특징을 보이는 서귀포층의 Top elevation이 상부에 위치하고 있어 해안가 쪽 셀이 “Mark flooded cells” 현상이 일어나기 때문에 해안가 쪽 상부 현무암층 셀의 바닥 고도를 해수면 이하부로 낮추어 모델을 수행하였다. 이는 MODFLOW의 Grid 층위가 연속성을 가지고 있는 구조화된 그리드를 사용하기 때문에 해당구역의 하류부와 같이 현무암층의 단절 즉, pinchout과 같은 일반적인 현상을 명확히 표현하는데 제한이 있으므로 해당지역의 유한 차분 격자들의 고도 값들을 재설정 하였다. 2개의 지질구조로 구성된 중서귀수역의 지층 Layer Cross-section은 Fig. 4.57과 같다.

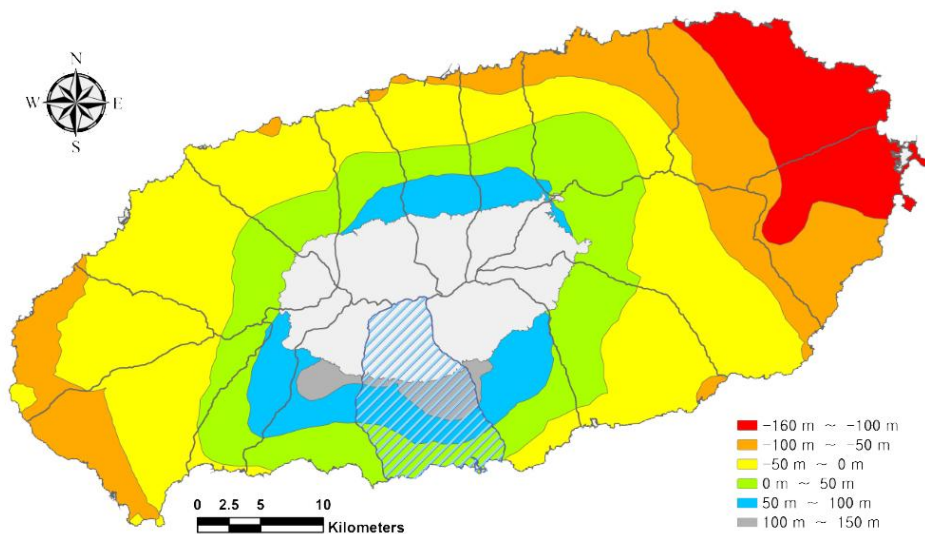


Fig 4.56 Seogwipo-Formation(SGF) layer depth (제주문화 제11호, 2005)

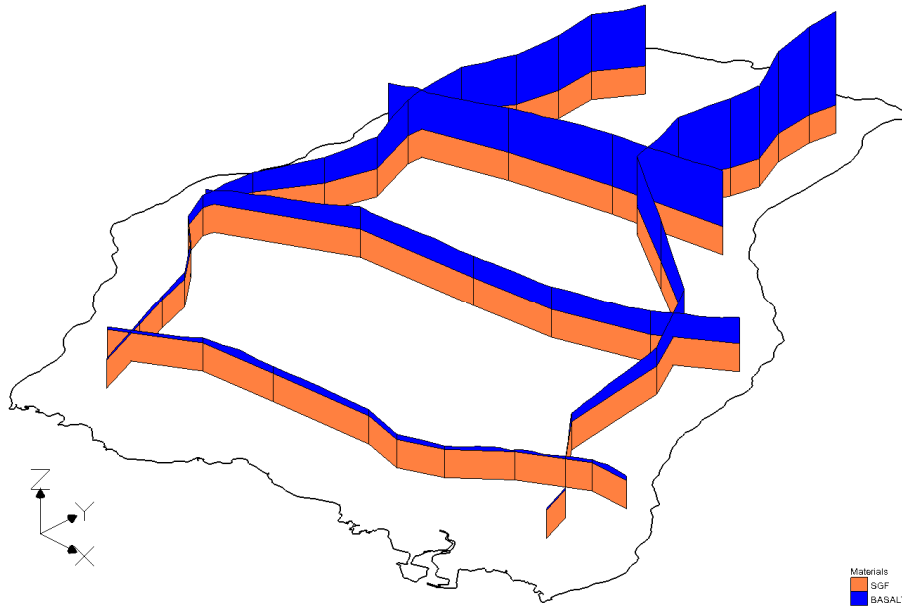


Fig 4.57 Layer cross-sections

1.2.3 격자망 설정 및 모델의 구축

중서귀수역의 격자망을 구성하는 과정에서 연구대상 수역과 인접한 수역 경계면은 지하수 흐름의 영향이 없는 NO-FLOW로 설정하고 비활성화 셀로 지정하여 모의 과정의 효율성을 높였으며 수역 내의 지역은 Active cell로 설정하고 나머지 격자는 Inactive cell로 구성하였다.

격자망 구성을 위한 방법은 유역 경계 Coverage에서 입력한 Max size와 Base size를 이용하여 격자망 구성을 50m × 50m로 설정하고, 대상수역을 제외한 지역은 비활성화셀(Inactive cells)로 구분한 결과, 수역 내 활성화셀(active cells)은 2개의 layer을 포함하여 86,156개의 셀 격자망으로 구성되었다

Table 4.41 Grid network configuration

구분	격자망 구성
Cell refine	Base size: 50m, Bias : 1.0, Max. size: 50m
Number of Cells	323 columns× 262 rows × 2 layers = 169,252 cell (Active cells: 86,156 cell / Inactive cells: 83,096 cell)
number of layers	2 layers

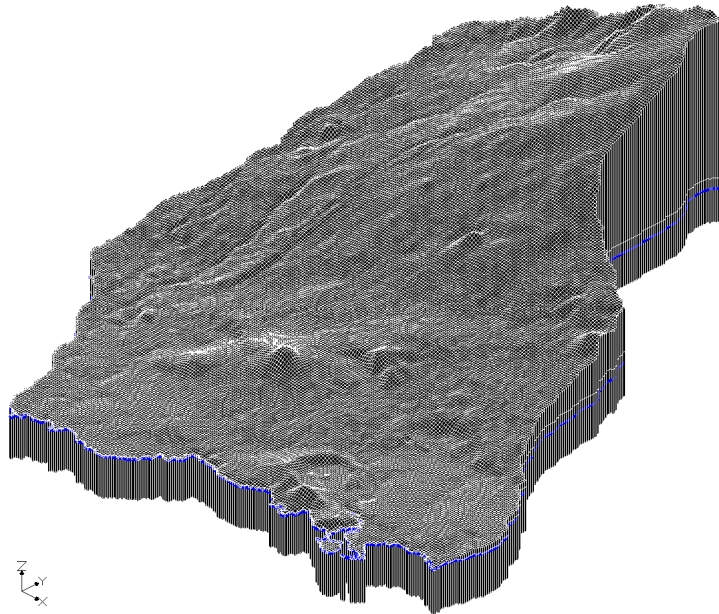


Fig 4.58 Grid network configuration

생성한 격자는 디폴트(default)인 상태로 고도값이 없고 평면 x, y 좌표 값만을 가지고 있기 때문에 각 지층별 Scatter points를 이용하여 내삽하는 과정을 거쳐야 한다. 디폴트 상태의 GRID Data에서 Low data를 기초로 하여 ArcGIS software에서 추출한 AscII 파일을 내삽하는 과정을 거쳐 대상지역의 실제 지형 및 표고 값을 나타내는 3D 격자망을 구성한다.

Fig 4.59는 2개의 지층에 대한 Elevation을 나타낸 것으로 현무암층인 1 layer의 Top층의 표고분포는 최고 EL. 1706.97 m에서 최저 EL. 0.0 m까지 이며, 서귀포층(SGF)으로 구성된 2 layer의 Top층은 최고 EL. 115.0 m, bottom은 최저 EL. -447.98 m까지의 Elevation으로 구성되었다.

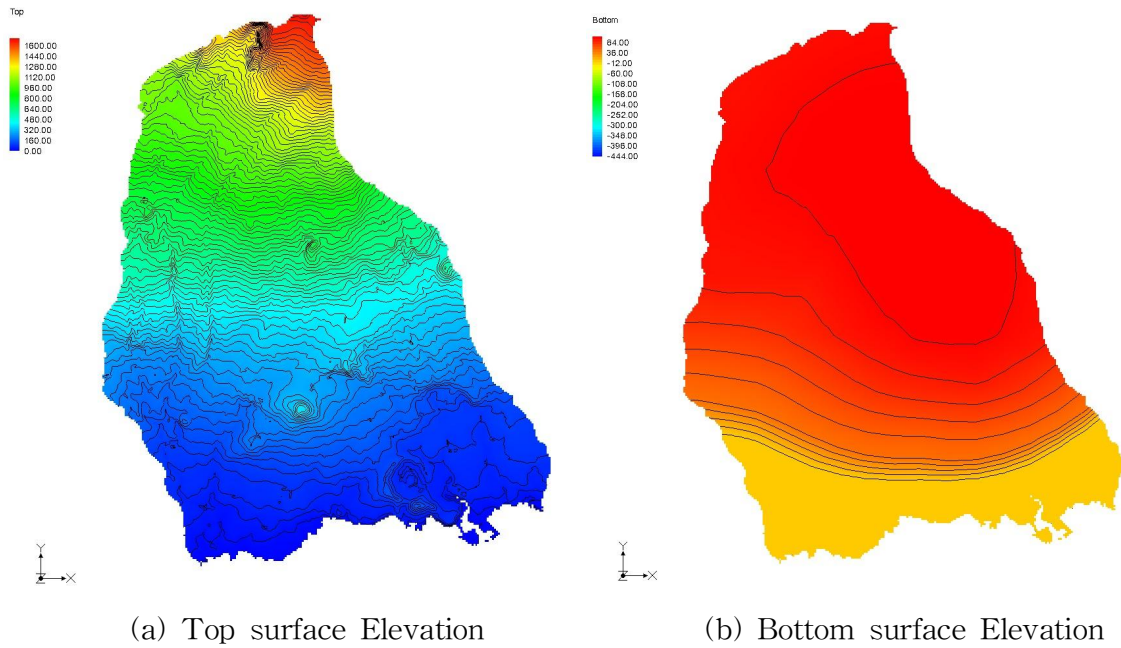


Fig 4.59 Elevation analysis of layers

제주도지하수 부존특성은 서귀포층 지질분포에 따라 상위지하수, 기저지하수, 준기저지하수로 나누어지는데 본 연구대상 유역은 상위지하수에 해당되며, 상위지하수는 비교적 해수면 상단에 위치하며 제주도 남·북부지역에 광범위하게 분포한다. 본 연구대상 유역의 격자망 구성이 완료된 3D 단면도는 Fig 4.60, Fig 4.61과 같이 서귀포층 분포가 해수면상단부에 위치하고 있는 점은 대상지역의 지층구조를 잘 구현한 것으로 판단된다.

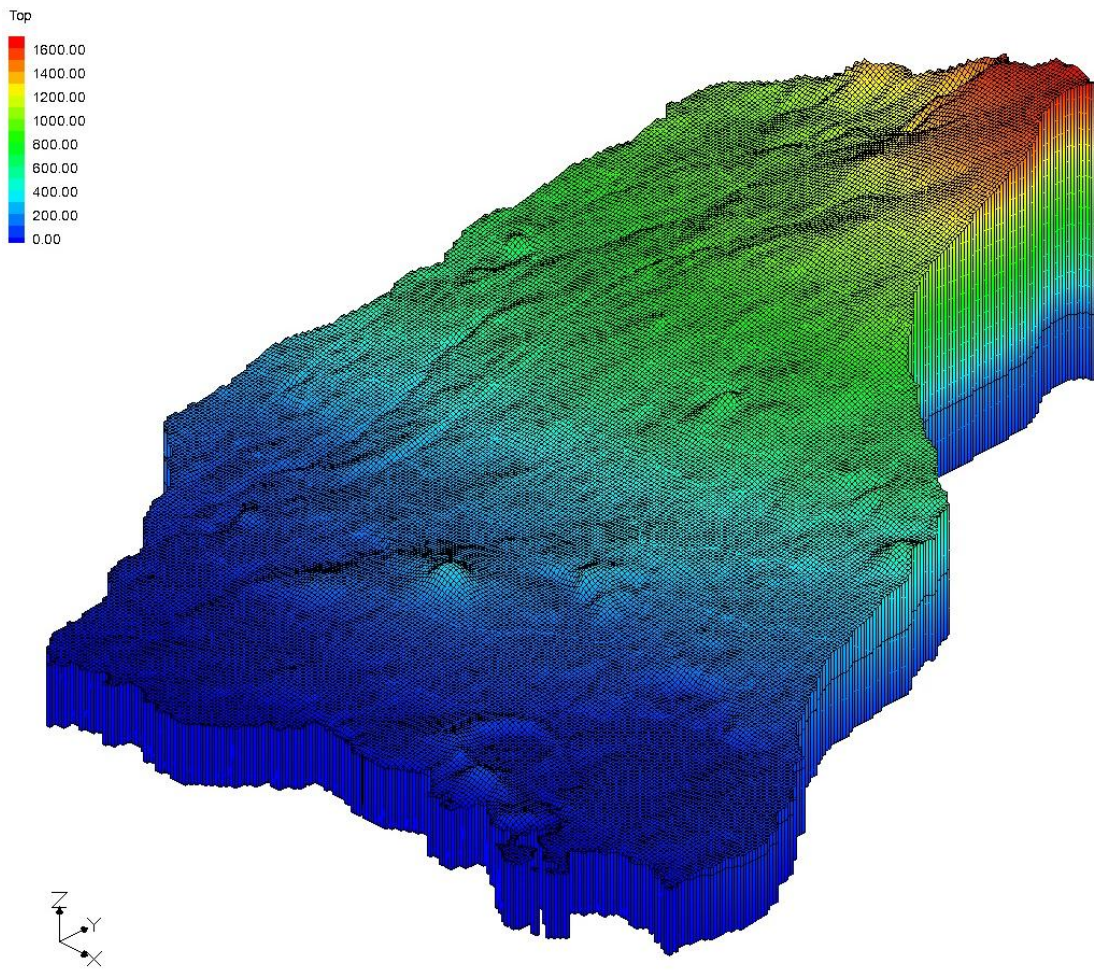


Fig 4.60 3D GRID (Oblique View)

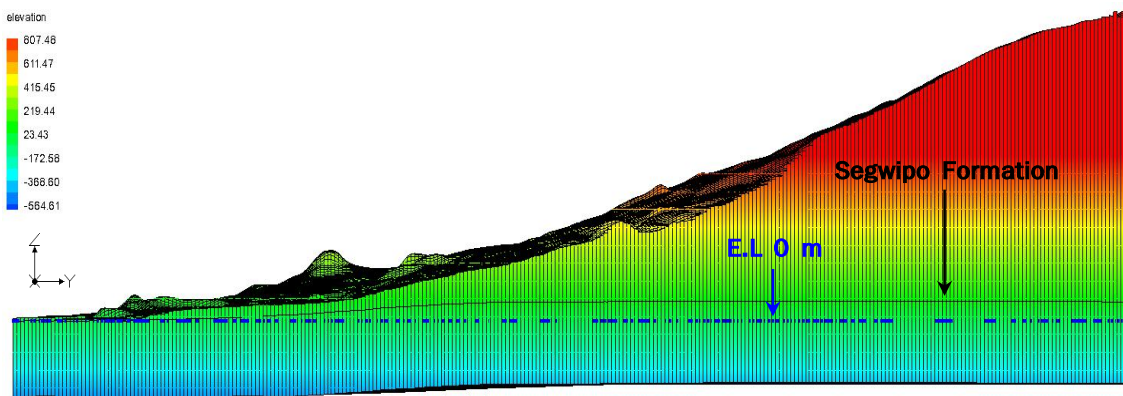


Fig 4.61 3D GRID (Side View)

2.2 정상류 상태에 따른 지하수 유동해석

지하수 유동 모델의 주요 입력 변수인 함양량, 경계조건 및 수리전도도 등은 모델링의 결과에 큰 영향을 미치는 요인으로 지하수계의 공간적 형태 및 복잡한 흐름과정을 표현하기 위해 사용된다(Seo, 2009).

우물에서 관측되는 지하수위 변동은 대수층의 저유량 변화를 의미하며, 강수에 의한 지하수 함양과 대수층에서 지하수의 기저 유출(우물 양수와 같은 배출)에 의하여 발생한다. 본 연구에서는 현장관측을 통해 획득한 하천유출 관측자료를 SWAT과 연계하여 산정한 지하수 함양량을 모델영역의 모든 셀에 적용하여 지하수 유동해석을 실시하였다.

수리전도도는 매질의 투수성을 나타내는 물리량으로 단위 수두구배 시 단위 시간당 단위면적을 통과하는 물의 양을 나타낸다. 중서귀유역의 수리전도도 범위는 8.7 ~ 2,400m/day로 수리전도도 편차가 매우 큰 특징을 나타낸다(제주도, 한국수자원공사, 2003). 본 연구에서의 수리전도도적용은 모델보정 방법 중 Regularization(정규화)라고 불리는 Pilot point 기법을 사용하였다. 정규화는 균일한 제한을 통해 보간되는 인자 값에 조밀한 데이터를 필요로 하는데 객체 함수로부터의 강한 영향을 보이는 값이 부재한다면, 주변 Pilot point들로부터의 평균값으로 제한하도록 하여 모델 자동보정의 과정을 더욱 안정하게 하도록 유도한다. 정규화를 이용한 Pilot point 기법을 이용하면, 관측정의 지하수위의 잔차를 현저하게 줄일 수 있는 복잡한 투수계수 분배를 정의 할 수 있다.

제주도와 같이 수리전도도 값이 지역별로 차이가 크고 동일 유역 내에도 다른 지질구조를 보이는 등 동일 매질에서 동일 투수성을 보이지 않는 다양함으로 인해 실측 값들을 적용하기에 어려운 곳에서 정규화라는 보정방법은 지하수 유동해석을 함에 있어 최적화된 방법이다. 통상적으로 50개 또는 그 이상의 지점을 사용하는데 본 연구에서는 Fig. 4.62와 같이 61개 지점을 유역 내에 고르게 분포시켜 수리전도도 값을 설정하였다.

이러한 주요 입력변수에 대한 설정 기준을 토대로 지하수 정상류 상태의 유동해석을 실시한 결과는 Fig 4.63 등수위 분포도이다.

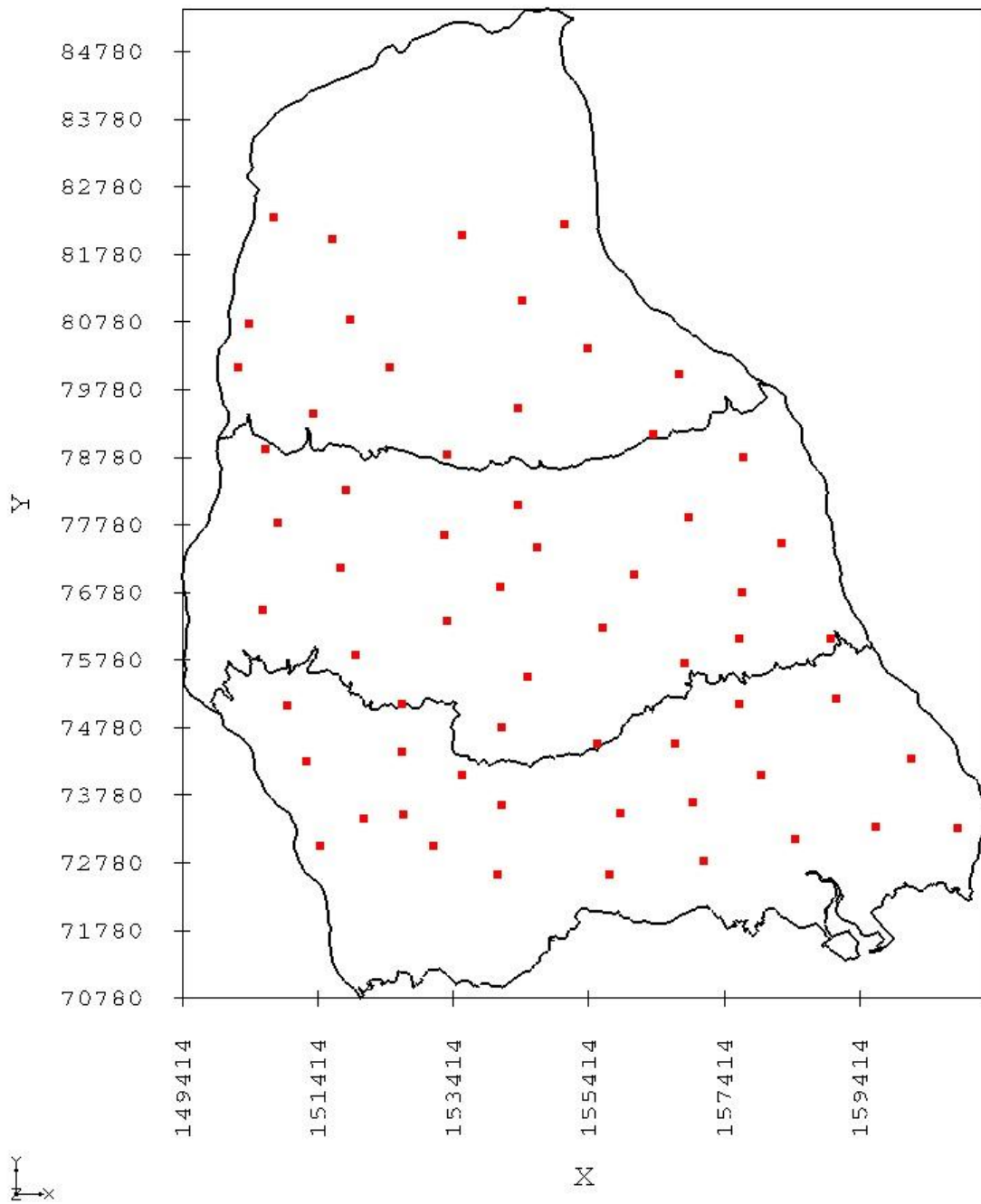


Fig 4.62 Pilot point for hydraulic conductivity

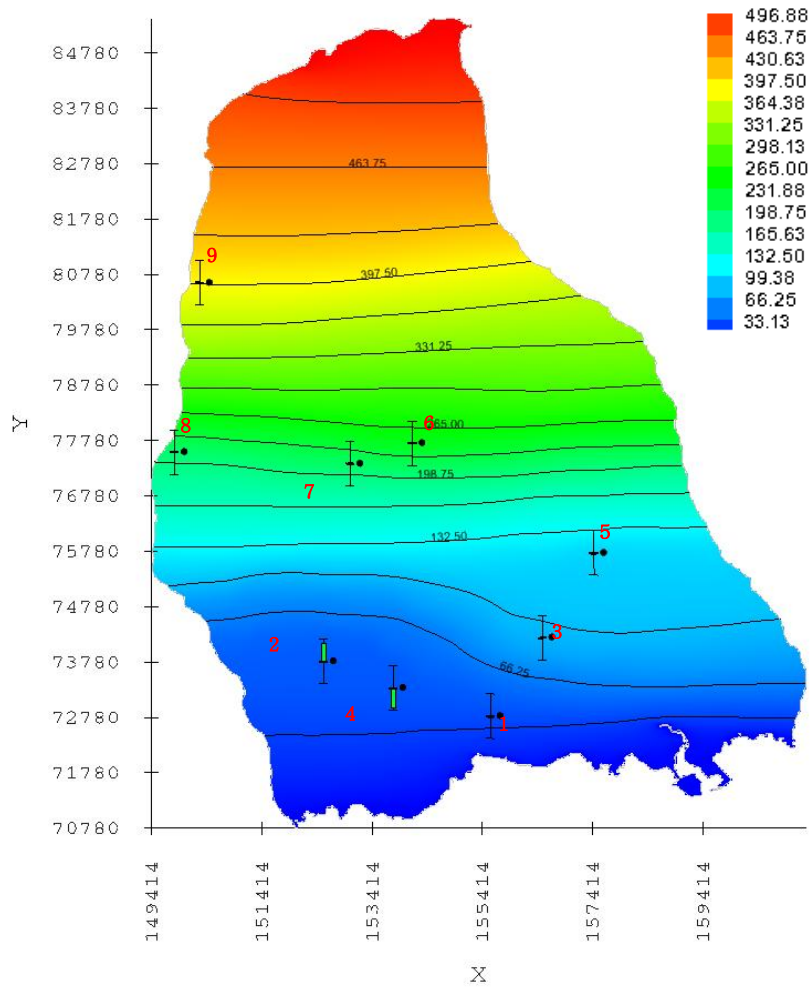


Fig 4.63 Groundwater table contour map under steady state

정상류 상태의 지하수위 흐름 특성은 대상유역 상류측은 지형고도를 반영한 수두 경사를 보이고 있고, 하류측은 좌측하류 부분에서 외곽 경계면 쪽으로 지하수 흐름을 보이다가 해안쪽으로 완만한 유출이 나타났다.

대상수역 내 기준수위 지정은 표고별 지하수위를 고려하고 수위 값의 객관성 확보가 가능한 9개의 지하수위 관정을 선택하여 관측치와 계산된 지하수위를 잔차수두(Residual Head)를 비교 검토한 바, 지하수두 계산치(Computed Head)는 관측치(Obs. Head)와 유사한 결과를 나타내고 있다. T-UNIVERSITY 관정의 잔차는 0.0m로 수두 차가 없으며, JM-YH, B-HOTEL 관정은 각 12.0 m, -13.3 m로 가장 큰 차이를 보이고 있다.

Table 4.42 Comparison results between observation and computed water level

No.	Observation Name	Obs. head (EL.m)	Computed Head (EL.m)	Residual Head (m)
1	JD-SH	41.0	40.0	-1.0
2	JM-YH	36.0	48.0	12.0
3	F-627	92.0	92.7	0.7
4	B-HOTEL	59.0	45.7	-13.3
5	F-574	117.0	116.0	-1.0
6	F-526	248.0	247.6	-0.4
7	IV-RESORT	214.0	215.1	1.1
8	T-UNIVERSITY	213.0	213.0	0.0
9	FOREST	398.0	398.2	0.2

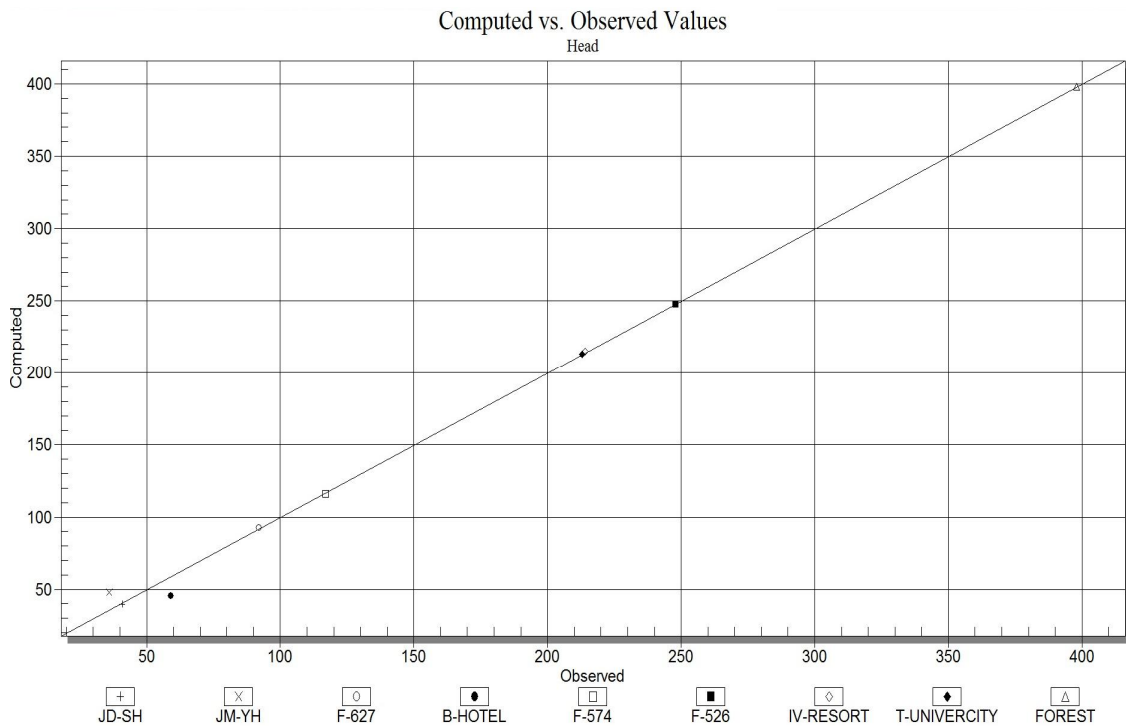


Fig 4.64 Computed vs. Observed Values

일반적으로 지하수위는 지형고도와 이상적인 정비례 관계를 보인다(Fetter, 1998; Williams, 1989). 실제로 Jung(1999), Sim(2000), Lee(2001), Cho(2001)에 의하면 국내 충적층과 암반대수층 지하수위의 표고의 관계는 상관계수가 거의 1에 가까운 직

선적인 비례관계를 나타낸다.

찬차수두가 큰 JM-YH, B-HOTEL의 관정은 대상수역 내 하류측에 위치하는 관정으로 인접 관측지점임에도 불구하고 관측수위 차는 23.0 m를 보이고 있다. 해당 2개 지점의 표고는 JM-YH관측정 E.L 122.0 m, B-HOTEL관정은 E.L 99.0 m 임에도 불구하고 실제 관측수위는 각각 E.L 36.0 m, 59.0 m로 표고와 수위와의 관계는 반비례적인 관계를 갖는 특성을 보이고 있다. 제주도의 경우에는 표고와 지하수위 간의 일정관계를 찾기 어려울 정도로 지역별 대수층의 수리적 차이가 심하다(Choi, 1999). 이와 같이 중서귀수역 하류부에도 국부적으로 발생하는 특이한 지하수위형성은 대수층의 동일 유역 내에서도 서로 다른 대수층 특징을 보이는 것으로 Fig. 4.65의 보정에 따른 수리전도도 등치선도에서 나타났다.

천부 지하수 시스템에 함양된 강우의 경우 용천수의 유출량에 영향을 주는 기간이 2 ~ 3개월로 짧게 나타나며, 영향이 느리게 나타나는 경우는 유동 경로가 매우 길거나, 지체시간을 유지해 줄 수 있을 정도로 수리전도도가 작아야 한다(한국지질자원연구원, 2008). 실제 유출량의 변화는 함양된 물 자체의 이동이 아니라, 압력 전달에 의한 유출부의 반응이므로 낮은 수리전도도는 상대적으로 용출량이 작지만 유역 내 하천 중 강정천과 약근천은 비교적 많은 유출을 보인다. 이러한 현상은 일반적인 천부 지하수 시스템과 연계된 용천수보다 훨씬 큰 지하수 저유량을 갖고 있거나, 더 큰 수리전도도를 가지는 시스템에 의한 영향이다. JM-YH관측정 인근에서는 국소적으로 높은 수리전도도를 보이고, 관측정 하류부까지 서로 다른 수리전도도값을 나타내고 있다. 이 지역은 강정천과 약근천의 상시하천과 인접하고 있어 용암투브, 용암경계층구간 등의 투수성이 잘 발달된 경로로 연결된 양호한 대수층이 상류부에 분포하고 있는 것으로 판단된다.

본 모델에서 1 LAYER의 현무암층의 보정 전 인자 값은 제주도(2003)에서 제시한 남부지역의 수리상수 값을 입력하였으며, 2 LAYER의 서귀포층(SGF)의 수리전도도는 저투수성 지층의 수리상수 값을 적용하였다. 입력된 적용인자는 MODFLOW모형에서 시행 착오 보정과, 모델 자동 보정을 동시에 수행하였고 현장 실측값에 부합될 때까지 모델을 반복·수행한 결과, 현무암층의 수평 수리전도도 범위는 0.17 ~ 1,951.0 m/d, 서귀포층 수평 수리전도도는 0.1 ~ 5.0 m/d로 분석되었다(Table 4.43).

Table 4.43 The value of the modeling of the argument

구 분		Horizontal K (m/d)	Vertical K (m/d)	Specific yield (-)	Porosity (-)
보정 전	1 LAYER	8.7 ~ 2,400	1 ~ 240	0.2 ~ 0.35	0.3
	2 LAYER	0.01 ~ 100	0.001 ~ 10	0.04	0.01 ~ 0.35
보정 후	1 LAYER	0.17 ~ 1951.0	0.2 ~ 200	0.28	0.3
	2 LAYER	0.1 ~ 5	0.01	0.04	0.04

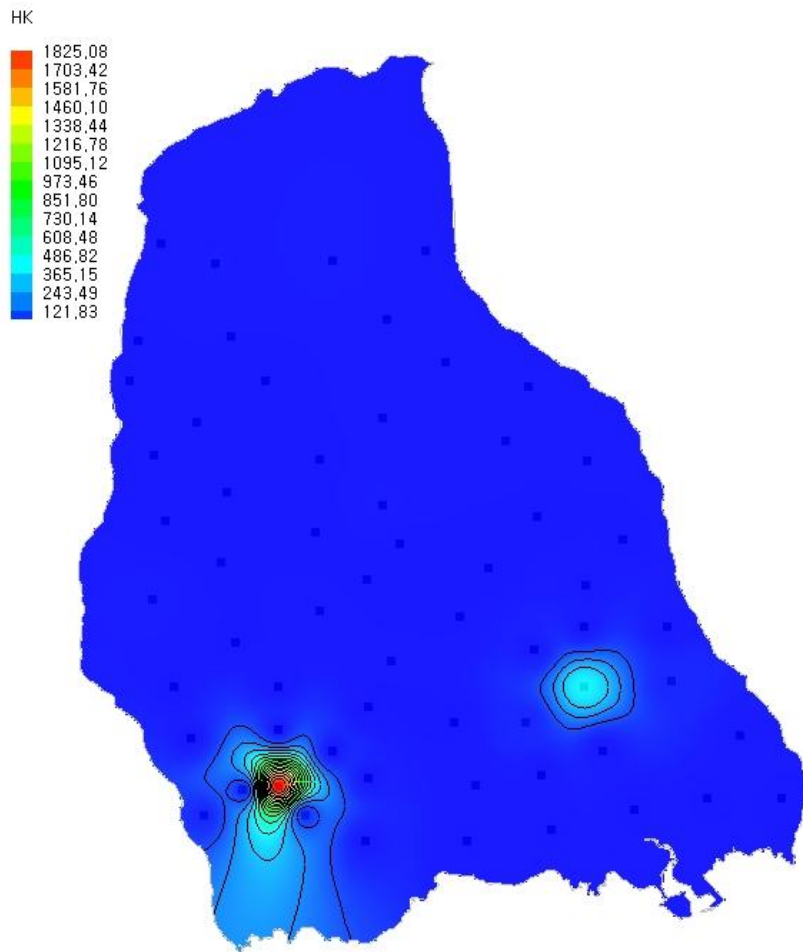


Fig 4.65 Hydraulic conductivity contour lines in Mid-Seogwi

2.3 지하수 함양량에 따른 지하수 유동특성

중서귀유역의 함양량 변화에 따른 지하수위 변동폭을 검토하기 위하여 SWAT모형

을 이용하여 추정된 소유역별 함양량 결과를 각각 10%, 30%, 50%, -10%, -30%, -50% 변화하여 모델링을 수행하였다. 지하수위의 오차는 정류상태 분석 시 계산된 지점수위를 활용하였으며, 중서귀유역의 함양변화에 따른 지하수 유동특성을 분석하였다.

함양을 증가에 따른 중서귀유역의 수위변화 분석결과, 함양량 10%를 증가시킨 경우 9개의 관측지점에서 0.95 ~ 2.51 m의 수위상승특성이 나타났으며, 평균 1.78 m로 소폭 상승하는 것으로 분석되었다. 함양량 30%를 증가시킨 경우 1.91 ~ 5.02 m, 평균 5.31 m가 증가되었으며, 함양량 50% 증가 시 3.79 ~ 9.98 m, 평균 8.79 m 상승하는 것으로 분석되었다. 함양을 감소에 따른 지하수위의 변화는 -10% 감소 시 0.99 ~ 2.57 m, 평균 -1.79 m로 하강하였으며, -30% 감소 시 3.01 ~ 7.71 m, 평균 -5.41 m, -50% 감소 시 5.09 ~ 12.92 m, 평균 -9.08 m 감소하는 것으로 예측되었다.

적은 규모의 함양량을 증감시킨 경우 유사한 상승, 하강의 특성이 나타났으나, 함양량을 30%이상 증감시킨 경우 함양을 증가에 따른 지하수위 변동 폭 보다 감소에 따른 지하수위변화가 크게 나타났다. Fig 4.73는 함양량 변화에 따른 등수위분포도이며, Table 4.40 및 Table 4.41은 계산된 지하수위와 관측수위를 비교·분석한 값을 나타내고 있다.

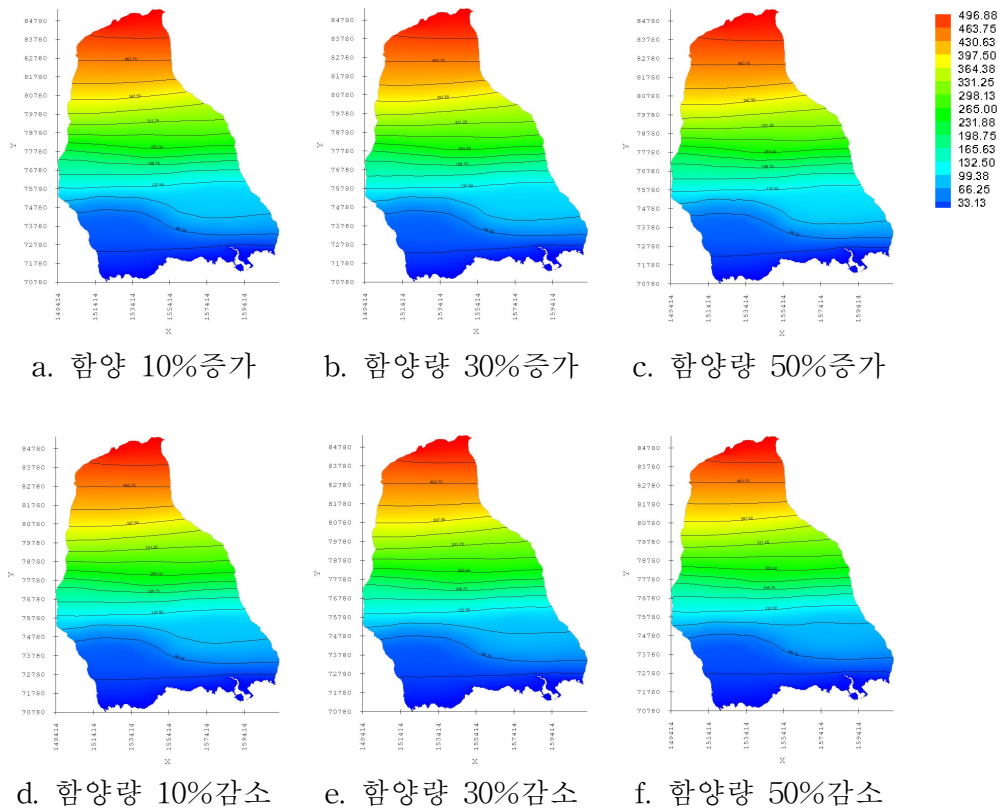


Fig 4.66 On distribution diagram of an equal number of steady flow state

Table 4.44 Changes in the groundwater level due to recharge increase

Unit : (m)

관측정	초기수위	10%증가	30%증가	50%증가
JD-SH	40.00	40.95	42.86	44.74
JM-YH	48.00	49.00	50.95	52.87
F-627	92.70	94.60	98.31	101.96
B-HOTEL	45.70	46.67	48.61	50.52
F-574	116.00	117.85	121.60	125.31
F-526	247.60	250.11	255.13	260.09
IV-RESORT	215.10	217.48	222.11	226.69
T-UNIVERSITY	213.00	215.22	219.64	224.00
FOREST	398.20	400.41	404.83	409.21

Table 4.45 Changes in the groundwater level due to recharge decrease

Unit : (m)

관측정	초기수위(m)	10%감소	30%감소	50%감소
JD-SH	40.00	38.99	36.98	34.91
JM-YH	48.00	47.01	44.99	42.91
F-627	92.70	90.82	86.98	83.07
B-HOTEL	45.70	44.69	42.67	40.60
F-574	116.00	114.08	110.30	106.50
F-526	247.60	245.03	239.89	234.68
IV-RESORT	215.10	212.79	208.05	203.25
T-UNIVERSITY	213.00	210.75	206.23	201.65
FOREST	398.20	395.95	391.46	386.92

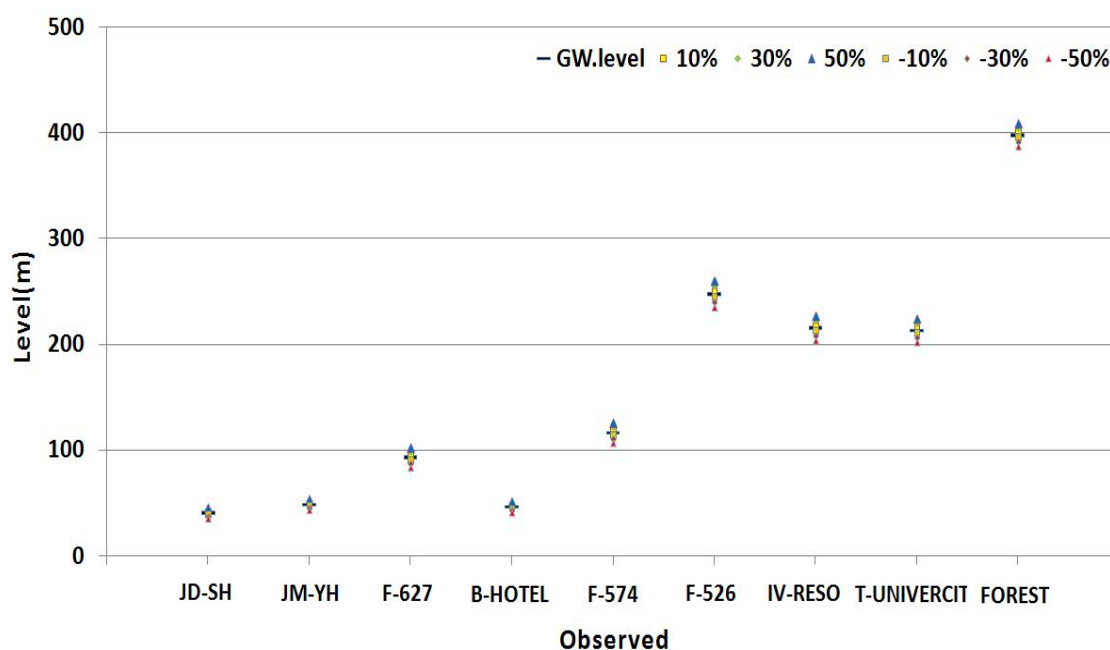
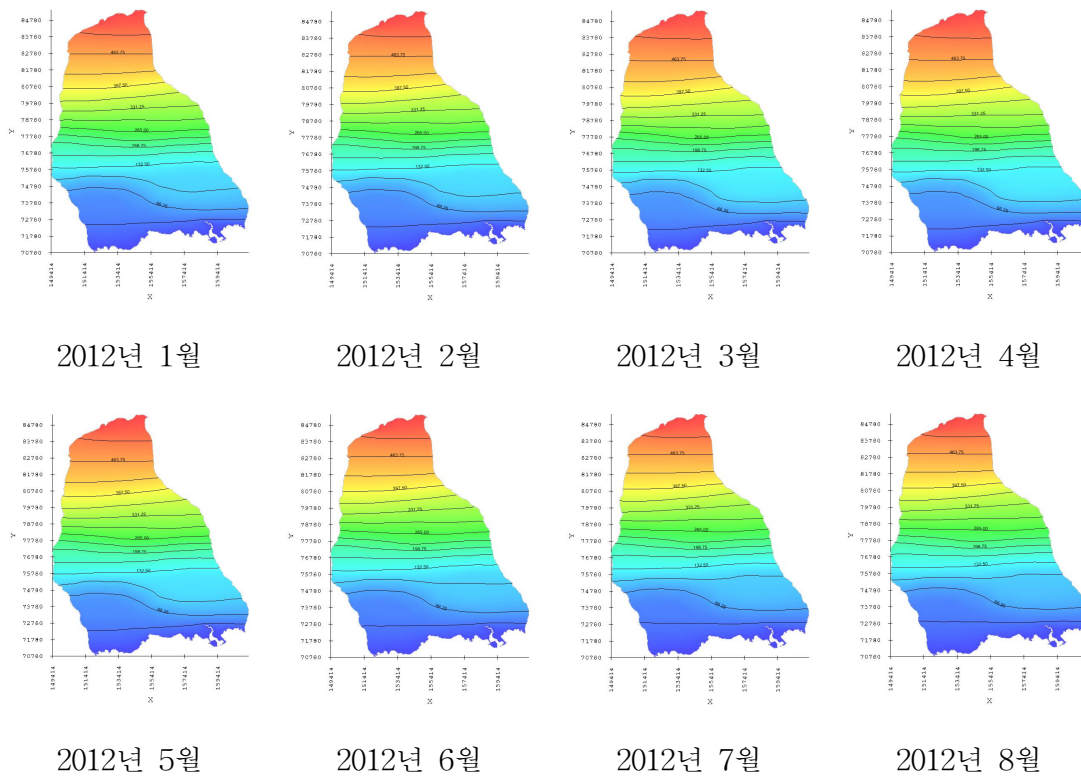
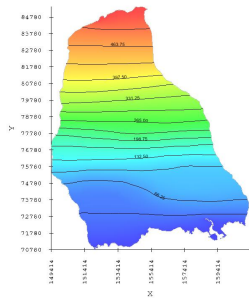


Fig. 4.67 Water level change due to recharge change

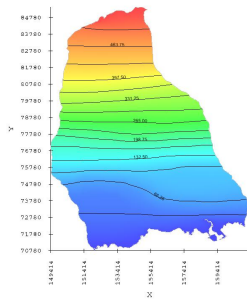
2.4 부정류 상태에 따른 지하수 유동해석 및 고찰

2012년부터 2015년까지 부정류 상태의 지하수 유동해석 결과, Forest 관정의 지하수 수위가 51.57 m로 가장 크게 변동하였으며, JD-SH 관정의 변동폭은 13.45 m로 나타났다. 대체적으로 지하수위 분포가 50 m이하의 경우 15 m이하의 수위변동폭을 나타냈으며, 200 m이하의 경우 30 m이내, 200 ~ 300 m는 변동폭이 50 m 이내, 400 m이상의 경우 50 m이상의 수위변화를 보이는 것으로 분석되었다. MODFLOW 모형을 활용하여 산정된 부정류상태의 지하수두 결과와 관측수두를 비교 분석할 수 있도록 Table 4.46과 같이 정리 하였으며, Fig. 4.66는 양수기간에 따른 등수두분포도이며, Fig. 4.67는 수두변화를 그래프로 나타내었다.

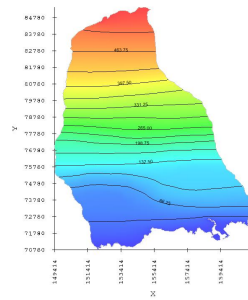




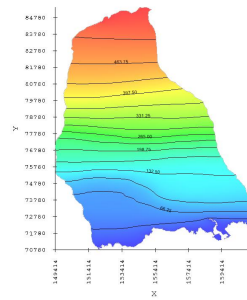
2012년 9월



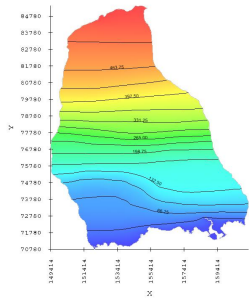
2012년 10월



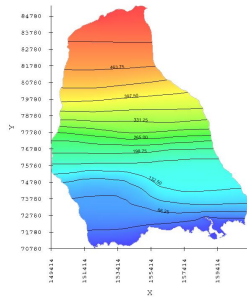
2012년 11월



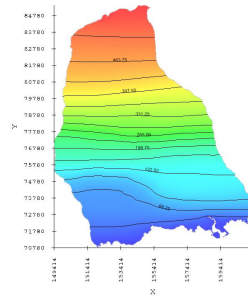
2012년 12월



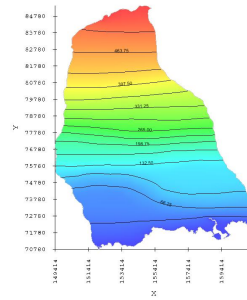
2013년 1월



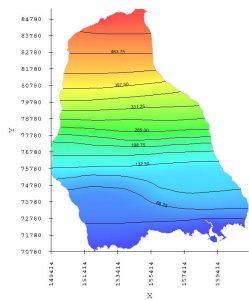
2013년 2월



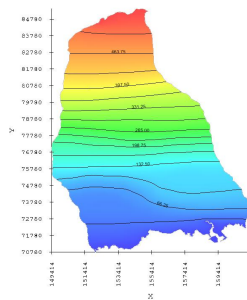
2013년 3월



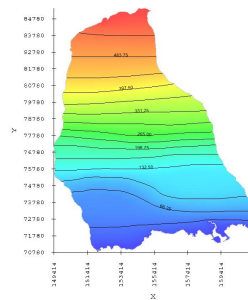
2013년 4월



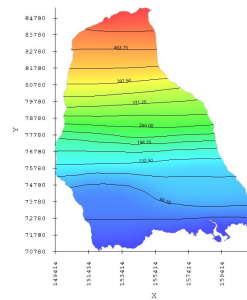
2013년 5월



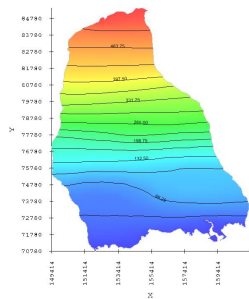
2013년 6월



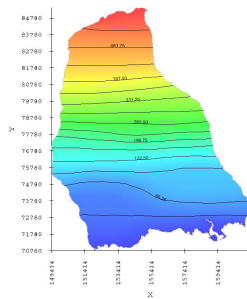
2013년 7월



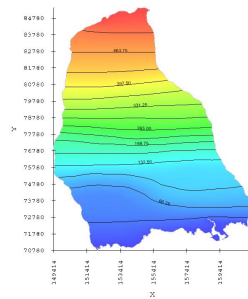
2013년 8월



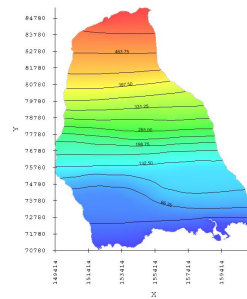
2013년 9월



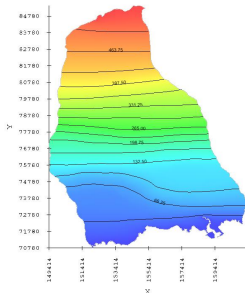
2013년 10월



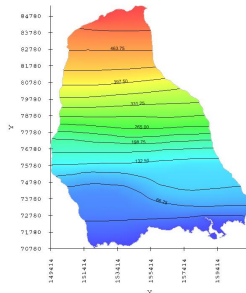
2013년 11월



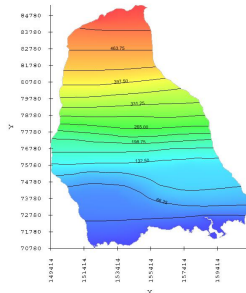
2013년 12월



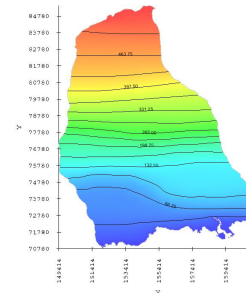
2014년 1월



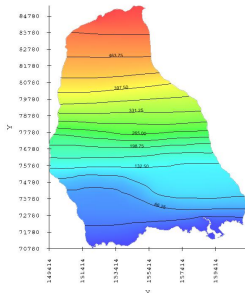
2014년 2월



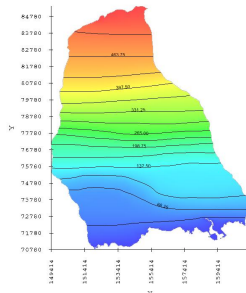
2014년 3월



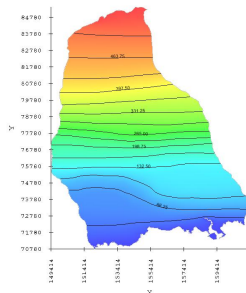
2014년 4월



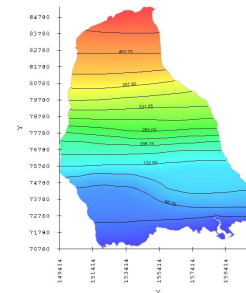
2014년 5월



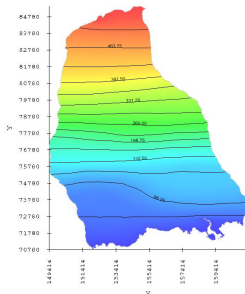
2014년 6월



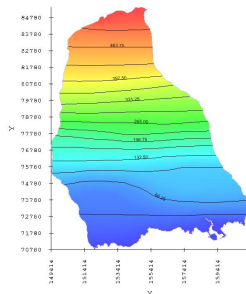
2014년 7월



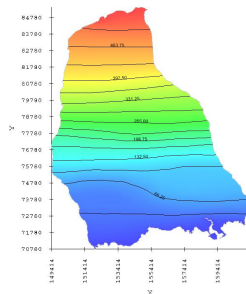
2014년 8월



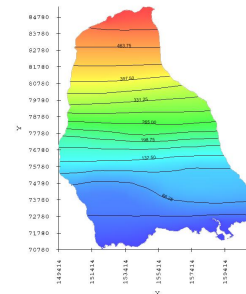
2014년 9월



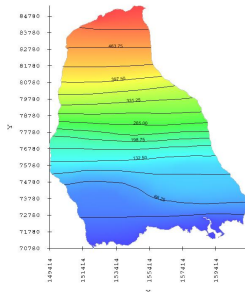
2014년 10월



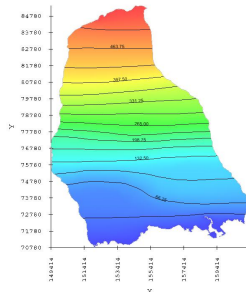
2014년 11월



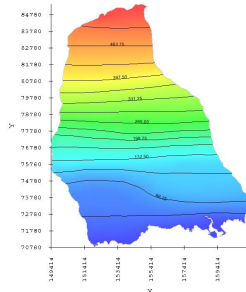
2014년 12월



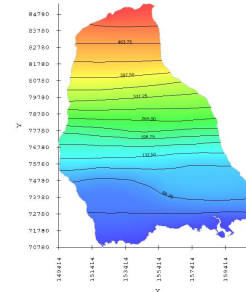
2015년 1월



2015년 2월



2015년 3월



2015년 4월

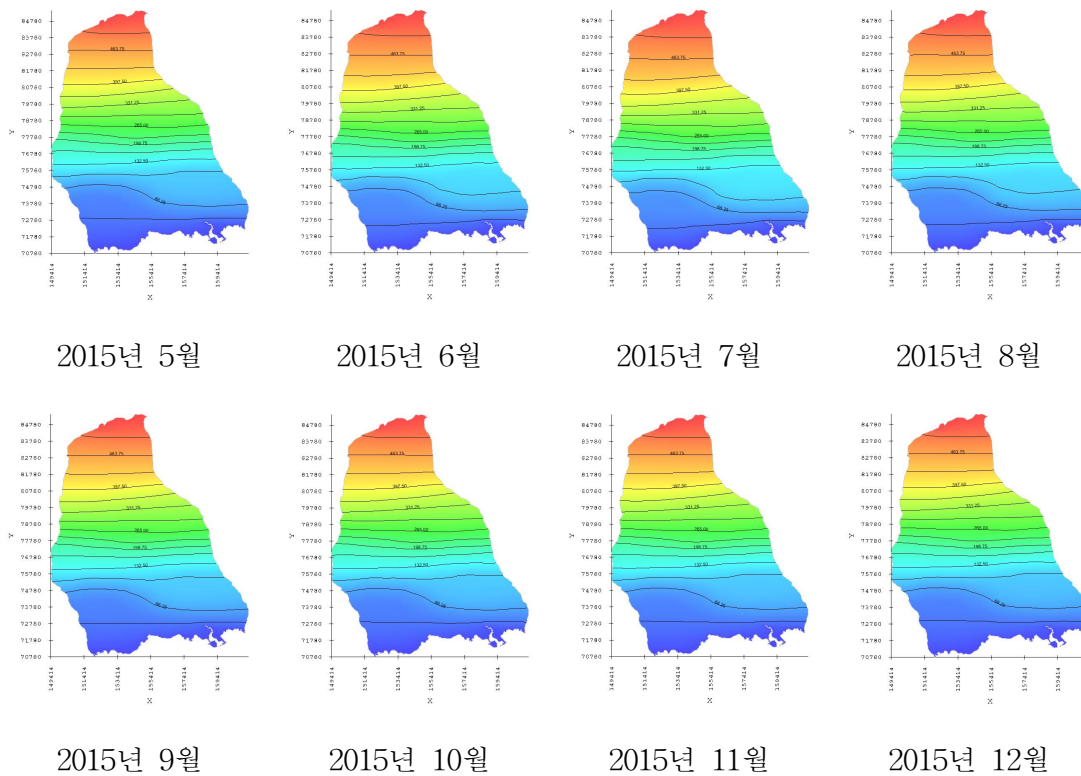


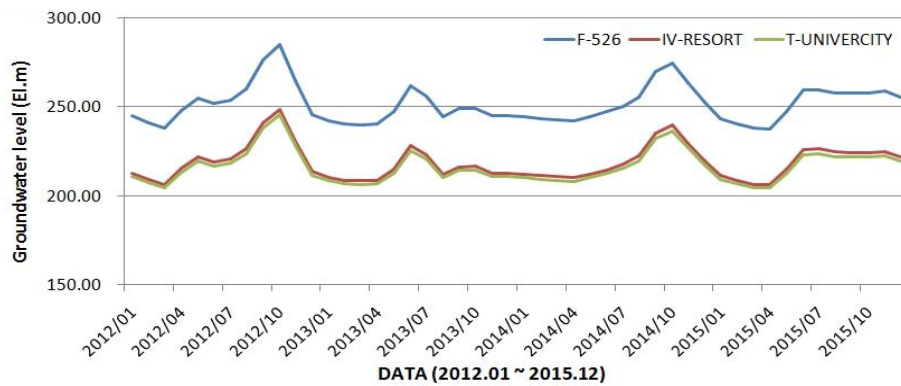
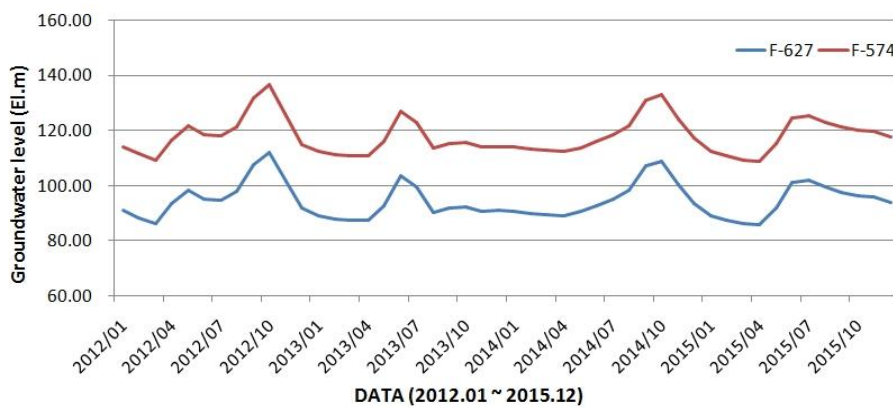
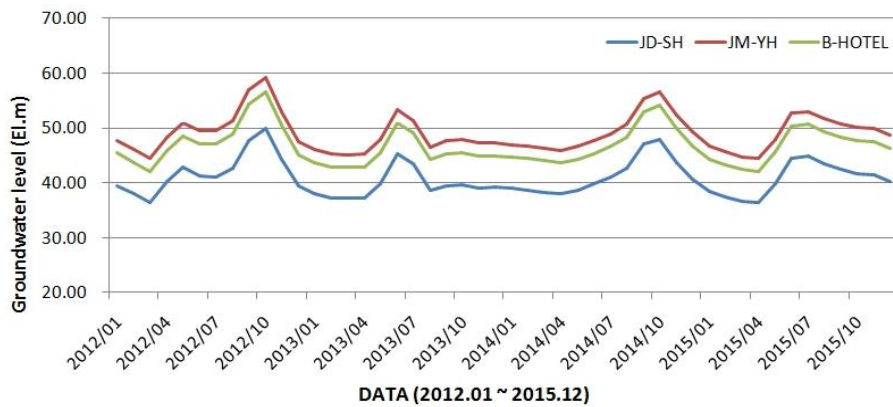
Fig. 4.68 Groundwater level changes in unsteady state

Table 4.46 Groundwater level changes in unsteady state

구분	JD-S H	JM-Y H	F-627	B-HO TEL	F-574	F-526	IV-RE SORT	T-UN I	FORE ST
2012/01	39.45	47.76	90.84	45.41	113.97	244.80	212.67	210.68	396.37
2012/02	37.92	46.06	88.25	43.73	111.44	241.10	209.23	207.36	392.70
2012/03	36.49	44.43	86.01	42.13	109.29	237.95	206.31	204.54	389.34
2012/04	40.24	48.19	93.33	45.88	116.55	247.76	215.39	213.20	397.60
2012/05	42.78	50.89	98.12	48.55	121.40	254.81	221.86	219.38	404.41
2012/06	41.17	49.44	94.91	47.07	118.24	251.84	219.02	216.73	403.14
2012/07	40.97	49.42	94.64	47.00	118.14	253.68	220.56	218.29	406.57
2012/08	42.59	51.39	97.66	48.90	121.32	260.00	226.24	223.81	414.18
2012/09	47.62	56.91	107.43	54.31	131.52	276.45	241.18	238.16	431.68
2012/10	49.81	59.20	112.09	56.56	136.54	284.88	248.78	245.45	440.91
2012/11	44.30	52.94	101.36	50.47	125.10	264.71	230.59	227.94	418.04
2012/12	39.43	47.45	91.61	45.13	114.83	245.69	213.47	211.41	396.21
2013/01	38.07	46.05	89.09	43.74	112.35	242.25	210.31	208.39	392.95

구분	JD-S H	JM-Y H	F-627	B-HO TEL	F-574	F-526	IV-RE SORT	T-UN I	FORE ST
2013/02	37.26	45.23	87.63	42.92	110.92	240.41	208.61	206.76	391.30
2013/03	37.11	45.08	87.33	42.77	110.63	240.03	208.25	206.42	391.01
2013/04	37.21	45.21	87.46	42.90	110.76	240.35	208.52	206.67	391.56
2013/05	39.86	47.82	92.64	45.51	115.91	247.39	214.96	212.79	397.79
2013/06	45.30	53.25	103.42	50.93	126.83	261.64	228.07	225.25	409.88
2013/07	43.43	51.34	99.64	49.04	122.93	256.26	223.13	220.55	405.11
2013/08	38.59	46.56	90.17	44.24	113.47	244.29	212.07	210.08	395.37
2013/09	39.38	47.58	91.87	45.20	115.35	249.00	216.32	214.25	401.34
2013/10	39.63	47.87	92.10	45.49	115.52	249.07	216.38	214.27	401.52
2013/11	39.10	47.19	90.72	44.86	113.95	245.02	212.74	210.68	396.52
2013/12	39.13	47.19	90.83	44.87	114.05	244.89	212.65	210.59	396.10
2014/01	38.94	46.96	90.59	44.65	113.81	244.35	212.19	210.17	395.25
2014/02	38.63	46.68	89.97	44.37	113.18	243.41	211.36	209.36	394.17
2014/03	38.29	46.35	89.33	44.03	112.57	242.70	210.70	208.73	393.57
2014/04	37.93	45.89	88.86	43.59	112.14	242.12	210.15	208.22	392.97
2014/05	38.66	46.57	90.42	44.26	113.71	244.29	212.10	210.08	394.85
2014/06	39.76	47.60	92.59	45.31	115.85	247.07	214.59	212.40	397.35
2014/07	41.04	48.88	95.05	46.58	118.33	250.46	217.69	215.34	400.46
2014/08	42.64	50.61	98.20	48.28	121.56	255.48	222.28	219.77	405.48
2014/09	47.14	55.38	107.08	52.98	130.82	269.72	235.26	232.21	419.88
2014/10	47.97	56.48	108.82	54.02	132.80	274.60	239.62	236.47	426.37
2014/11	43.63	52.32	100.10	49.83	123.87	263.70	229.58	226.98	417.64
2014/12	40.60	49.20	93.59	46.75	117.07	252.55	219.52	217.36	406.13
2015/01	38.40	46.70	89.04	44.33	112.29	243.31	211.22	209.36	395.65
2015/02	37.47	45.63	87.38	43.29	110.59	240.17	208.36	206.57	392.18
2015/03	36.66	44.75	85.96	42.42	109.20	237.97	206.33	204.59	389.96
2015/04	36.36	44.43	85.55	42.11	108.83	237.59	205.97	204.23	389.71
2015/05	39.73	47.93	91.93	45.58	115.17	247.08	214.63	212.52	398.92
2015/06	44.50	52.75	101.15	50.39	124.46	259.31	225.88	223.21	409.41
2015/07	44.87	52.99	101.98	50.66	125.27	259.66	226.24	223.50	408.82
2015/08	43.43	51.65	99.38	49.28	122.76	257.85	224.48	221.91	408.57
2015/09	42.37	50.72	97.61	48.30	121.16	257.72	224.22	221.77	410.18
2015/10	41.62	50.07	96.36	47.62	120.05	257.87	224.25	221.88	411.76
2015/11	41.36	49.96	95.92	47.47	119.72	258.70	224.96	222.63	413.60

구분	JD-S H	JM-Y H	F-627	B-HO TEL	F-574	F-526	IV-RE SORT	T-UN I	FORE ST
2015/12	40.18	48.77	93.60	46.29	117.38	255.34	221.89	219.70	410.40
평균	40.81	49.04	94.37	46.67	117.78	251.40	218.56	216.30	403.02
최대	49.81	59.20	112.09	56.56	136.54	284.88	248.78	245.45	440.91
최소	36.36	44.43	85.55	42.11	108.83	237.59	205.97	204.23	389.34
변화폭	13.45	14.77	26.54	14.46	27.71	47.29	42.81	41.22	51.57



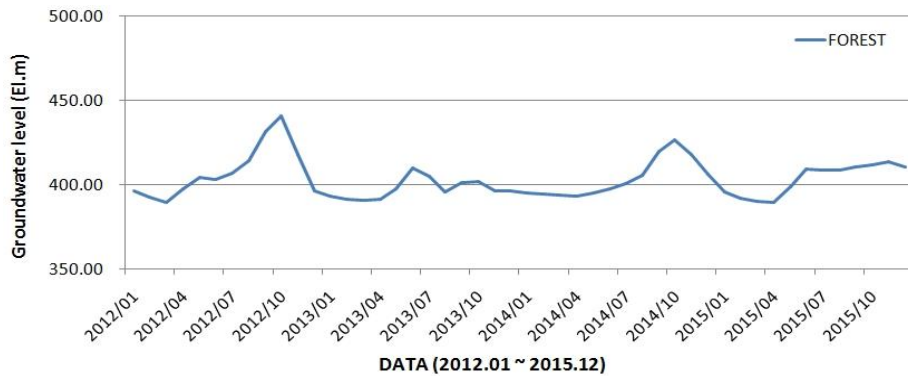


Fig. 4.69 Groundwater level changes in unsteady state

부정류상태에서 산정된 월별지하수위특성과 실제 지하수위와의 경향성 검토를 위해 중서귀유역에 위치한 2개소의 장기관측수위와 비교·분석하였다. 관측정은 JD-SH와 JM-YH으로 일별 관측수위를 월평균 지하수위로 환산하여 모델에서 분석된 월별지하수위와 비교하였다.

관측정 JD-SH의 2012 ~ 2015년 지하수위는 최소 37.76 m, 최대 48.51 m로 수위변동폭은 10.74 m로 확인되었다. JD-SH지점의 계산된 지하수위는 최소 36.36 m, 최대 49.81 m로 수위변동폭은 13.45 m로 산출되었으며, 실제 자연상태의 수위변동폭과 약 2.7 m의 오차가 나타났다. 관측정 JM-YH의 월평균 지하수위의 범위는 27.43 ~ 47.17 m이며, 수위변동폭은 19.74 m로 확인되었다. JM-YH지점의 계산된 지하수위의 범위는 44.43 ~ 59.20 m이며, 수위변동폭은 14.77 m로 분석되었다. JM-YH관정의 경우 실제 지하수 관측수위와 10 ~ 15 m의 수위오차가 발생되었으며, 이는 초기 정류상태의 모델구축 시 인근관정의 관측수위차(23m)를 보정하는 과정에서 실제 관측치에 비해 높게 산정되어, 부정류 분석에서 또한 실제 관측수위에 비해 상향된 결과가 산출된 것으로 확인된다. 2지점의 시계열에 따른 지하수위분포와 계산된 지하수위의 분포특성은 유사한 패턴으로 상승과 하강이 반복되는 것을 확인할 수 있었으며, 관측정이 위치한 인근지역에서도 유사한 흐름패턴이 형성될 것으로 판단된다.

본 연구에서는 실제 물수지 분석을 통해 산정된 함양량 결과로 정상류 분석을 실시하고, 중서귀유역의 수리전도도결과를 산출하여 부정류 모의를 실시한 결과 실제 자연현상과 유사한 수위특성의 결과를 도출할 수 있었다. 이러한 결과는 실제 하천 유출량 결과를 기반으로 SWAT모형을 이용하여 산정한 함양량 결과가 실제 자연

현상과 매우 유사하게 도출된 것으로, 지표에서 발생하는 현상을 명확히 조사·분석하여야 제주지역의 지하수 해석을 보다 정확하게 구현가능 할 것으로 분석되었다.

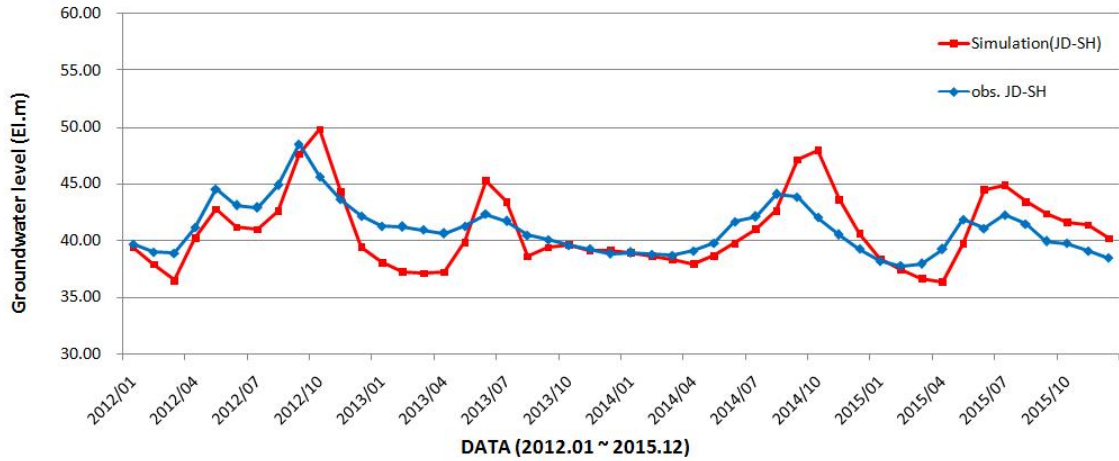


Fig. 4.70 Comparison of the observed data and calculated water level (JD-SH)

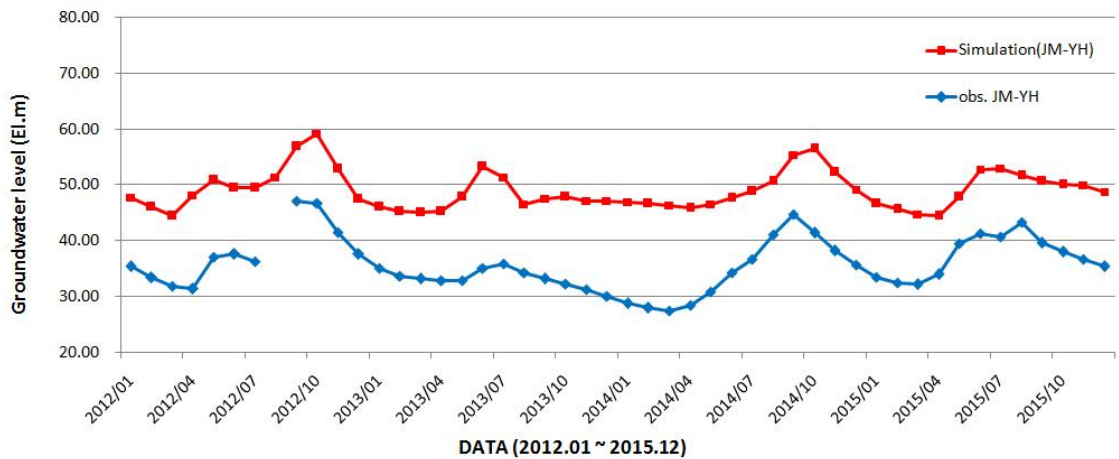


Fig. 4.71 Comparison of the observed data and calculated water level (JM-YH)

2.5 지속양수에 따른 지하수위 변동 특성

중서귀유역에 개발된 477개소의 지하수관정과 양수능력을 적용하여 극한가뭄사상 시 동시양수에 따른 지하수위 변동 분석을 실시하였다. 양수량은 각 관정별 최대치인 1일 양수능력을 기간에 따라 지속 이용하는 것으로 양수기간은 50일 까지 적용하였다. 기준 지하수위는 앞서 분석된 중서귀유역의 정상상태모의에서 산출된 결과

를 적용하였으며, 10일, 30일, 50일 양수에 따른 지역별 수위변동 특성을 분석하였다.

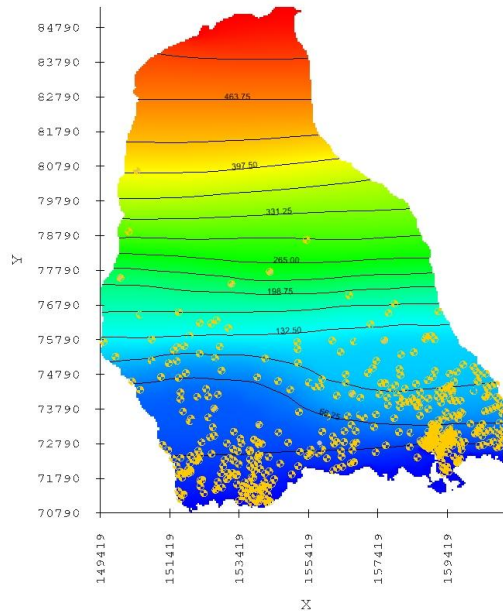


Fig. 4.72 Wells data input groundwater model in Mid-Seogwi

양수기간 10일을 적용한 결과 초기수위대비 1.26 ~ 6.11 m, 평균 3.50 m의 하강분포를 나타냈으며, 유역의 동쪽하부에 위치한 F-627과 F-574관측정에서 각각 6.11 m, 5.17 m로 가장 큰 하강특성이 나타났다. 해당 관측정 하류부에는 지하수 관정이 밀집된 지역으로 수위 변동 폭이 가장 크게 나타난 것으로 분석되며, 최상류부에 위치한 FOREST관정의 하강량은 1.26 m로 가장 작게 분석되었다.

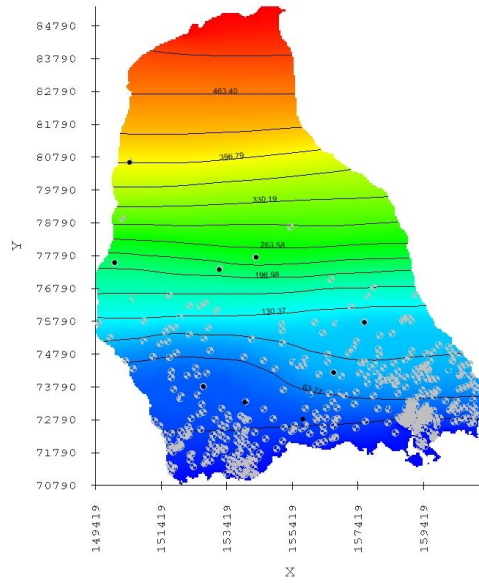


Fig. 4.73 Water level drop amount of full-term 10 days

Table 4.47 Water level drop amount of full-term 10 days

관측정	초기수위(EL.m)	분석수위(EL.m)	하강량(m)	하강율(%)
JD-SH	39.98	36.39	3.59	8.97
JM-YH	48.01	44.96	3.05	6.35
F-627	92.72	86.60	6.11	6.59
B-HOT	45.69	42.55	3.14	6.87
F-574	115.97	110.79	5.17	4.46
F-526	247.57	244.72	2.86	1.15
IV-RES	215.14	211.98	3.17	1.47
T-UNI	212.99	209.81	3.18	1.49
FOREST	398.19	396.93	1.26	0.32
최대			6.11	8.97
최소			1.26	0.32
평균			3.50	4.19

양수기간 30일의 경우 초기수위 대비 8.43 ~ 16.04 m, 평균 12.68 m의 수위하강이 발생되었으며, 10일 양수와 동일하게 F-627관측지점에서 가장 큰 수위하강 특성이 나타났다. 특히, 유역 중앙에 위치한 F-526, IV-RESORT와 상류지역의

T-UNIVERSITY 관측정에서 14.53 ~ 15.73 m로 양수 10일 대비 비교적 크게 하강된 것으로 확인되었다. 이는 하류지역의 광범위하고 지속적인 양수로 인해 상류부의 지하수 흐름이 유역 하류부로 급격하게 집중됨에 상류지역의 수위가 급격하게 하강된 것으로 판단된다. 유역의 좌측 하류부에 위치한 JD-SH와 B-HOTEL, JM-YH 관측정의 수위하강량은 8.34 ~ 8.97 m로 지하수 관정이 밀집된 지역이지만 수위하강량은 가장 작게 산출되었다. 그러나 해당지역의 관측정의 초기수위가 39.98 ~ 48.01 m로 낮게 분포하고 있어 하강량은 비교적 작게 산출되었으나, 초기수위 대비 하강수위의 비율로 계산해 보면 17.37 ~ 22.43%로 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

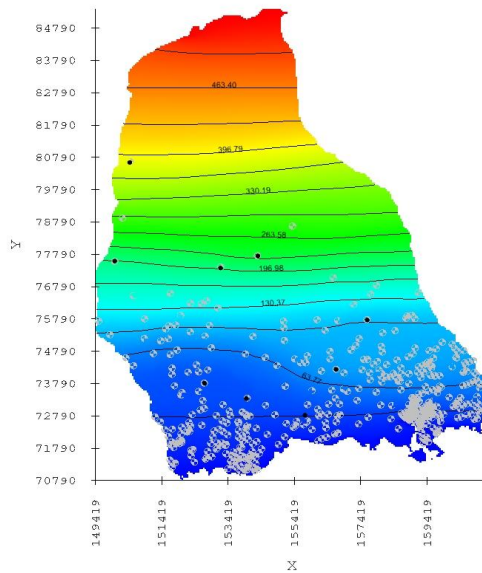


Fig. 4.74 Water level drop amount of full-term 30 days

Table 4.48 Water level drop amount of full-term 30 days

관측정	초기수위(EL.m)	분석수위(EL.m)	하강량(m)	하강율(%)
JD-SH	39.98	31.01	8.97	22.43
JM-YH	48.01	39.67	8.34	17.37
F-627	92.72	76.67	16.04	17.31
B-HOT	45.69	37.24	8.45	18.50
F-574	115.97	101.44	14.53	12.53
F-526	247.57	231.84	15.73	6.35

IV-RES	215.14	200.10	15.05	6.99
T-UNI	212.99	198.46	14.53	6.82
FOREST	398.19	385.68	12.51	3.14
최대			16.04	22.43
최소			8.34	3.14
평균			12.68	12.38

50일 동안 지속 양수한 경우 유역 중앙에 위치한 F-526, IV-RESORT관측정의 지하수위가 가장 크게 하강되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 최상류부에 위치한 FOREST관측정의 지하수위가 양수10일 하강량(1.26 m) 대비 22.71 m로 매우 큰 폭으로 하강되어 하류부의 지속적인 양수는 상류지역의 지하수위 특성에 큰 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있었다.

유역의 서부 하류지역 JD-SH, JM-YH, B-HOTEL관측정은 13.44 ~ 14.20 m의 범위로 비교적 작은 하강특성을 나타냈으나, 초기수위 대비 27.99 ~ 35.52%로 가장 큰 하강 비율특성이 나타나 수위 변동 폭 보다는 초기수위에 따른 하강비율로 지하수 관리를 수행하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 또한 유역 동부지역에 위치한 F-627과 F-574관측정의 수위변동폭은 22.85 ~ 25.51 m이며, 하강률은 19.70 ~ 27.51%로 비교적 높은 수위하강특성과 하강률을 보이고 있어 지하수위 변동폭과 수위하강 비율을 동시에 분석하여 지하수 이용에 대한 관리가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

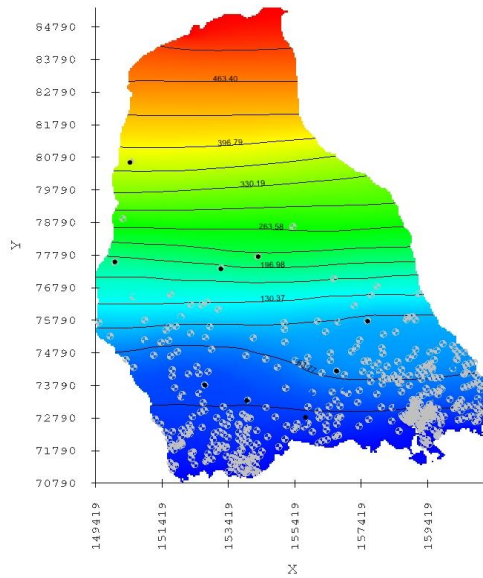


Fig. 4.75 Water level drop amount of full-term 50 days

Table 4.48 Water level drop amount of full-term 50 days

관측정	초기수위(EL.m)	분석수위(EL.m)	하강량(m)	하강율(%)
JD-SH	39.98	25.78	14.20	35.52
JM-YH	48.01	34.57	13.44	27.99
F-627	92.72	67.21	25.51	27.51
B-HOT	45.69	32.08	13.61	29.79
F-574	115.97	93.12	22.85	19.70
F-526	247.57	220.07	27.51	11.11
IV-RES	215.14	189.22	25.92	12.05
T-UNI	212.99	188.05	24.94	11.71
FOREST	398.19	375.47	22.71	5.70
최대			27.51	35.52
최소			13.44	5.70
평균			21.19	20.12

제주특별자치도 지하수관리조례에서는 단계별 기준수위를 설정하여 지하수를 관리하고 있다. 조례에서 정하는 JM-YH관측정의 기준수위는 과거 관측자료의 평균

수위인 43.64 m를 기준으로 지하수위가 1단계(29.97 m) 이하로 하강 할 경우 지하수 다량이용자에게 절수권장안내를 실시하고, 2단계(19.98 m) 이하로 하강 할 경우 지하수 다량이용자에게 최근 3개월 평균이용량의 10 %감량하여 이용조치, 3단계(9.99 m) 이하로 하강 할 경우 지하수 다량이용자에게 3개월 평균이용량의 30 %감량하여 이용하도록 조치하고 하고 있다.

지하수 모형을 이용하여 산정된 초기수위는 48.00 m로, 69일 지속양수 시 지하수 관리조례에 제시된 1단계 지하수위에 도달하는 것으로 분석되었다. 그러나 모델에 적용된 초기수위는 관리조례에 제시된 기준수위에 비해 4.36 m 상향된 수위 결과를 보이며, 조례에서 제시되어 있는 평균 기준수위(43.64 m)로 환산하여 분석한 결과 51일 양수 시 1단계 지하수위에 도달하는 것으로 분석되었다.

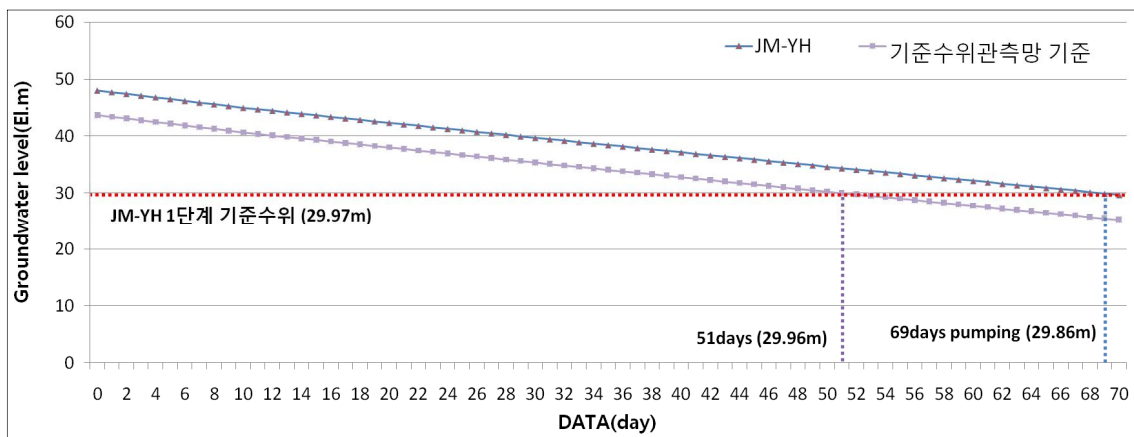


Fig. 4.76 Daily groundwater level variation graph (JM-YH)

V. 결 론

제주도 중서귀유역에 위치한 4개하천(강정천, 악근천, 동홍천, 연외천)을 대상으로 유출량을 관측하고, SWAT모델의 매개변수를 보정하여 하천유출에 따른 소유역별 지하수 함양량을 산출하였다. 관측자료를 기반으로 산정된 지하수 함양량을 GMS-MODFLOW에 적용하여 중서귀유역의 지하수 흐름특성 및 수리특성을 분석하였다. 또한 무함양 상태를 가정하여 기존 지하수관정들의 장기양수에 따른 수위변화 특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 2011년 7월부터 2014년 12월까지 중서귀 유역의 강정천, 악근천, 연외천, 동홍천을 대상으로 최신 관측장비인 ADCP와 ADC를 활용한 평균 유출량은 강정천이 $0.73 \text{ m}^3/\text{sec}$, 악근천이 $0.69 \text{ m}^3/\text{sec}$, 연외천이 $0.68 \text{ m}^3/\text{sec}$, 동홍천 $0.32 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 관측되었다.

2) 중서귀유역의 4개 상시하천을 대상으로 SWAT 모델을 적용하고 민감도를 분석한 결과는 다음과 같다. SWAT 모형의 매개변수 항목 중 함양량과 유출량 변화에 ESCO, TLAPS, CH_COV, CH_EROD, CH_K2는 영향이 없었으나, SLOPE, SLSUBBSN, SOL_AWC, CN_2는 민감하게 반응하였다. SWAT 모델을 적용한 결과 보정범위에 유출량은 최소 -7%에서 최대 12%를, 함양량은 -46%에서 78%를 나타내었다. 또한 현장 관측자료와 모의결과를 비교한 결과는 강정천 유역의 R^2 는 0.88, 악근천 유역의 R^2 는 0.93, 연외천 유역의 R^2 는 0.83, 동홍천 유역의 R^2 는 0.81이었다.

3) SWAT 모델의 함양량 산정결과는 풍수기 때 함양량이 증가하고 갈수기 때 함양량이 감소하는 계절적 특징을 보였으며, 특히 가뭄현상이 발생한 2013년에는 함양량이 평년대비 20%이상 감소되었다.

4) 정상류 상태의 지하수 흐름을 분석한 결과 유역의 상류부는 지형고도를 반영한 수두경사를 보였으며, 하류부 좌측에서는 외곽 경계면 쪽으로 지하수 흐름을 보이다가 해안방향으로 완만한 유출을 보였다. 수리전도도는 실제 관측수위와 유사하도

록 보정한 결과 0.17 ~ 1,951.0 m/d이었다.

5) 중서귀유역의 지하수관정 477개소에 50일 동안 지속양수 한 결과 중·상부의 지하수위가 가장 크게 하강하였다. 유역의 하류부의 경우 초기수위의 변동폭은 작게 산출되었으나 하강율은 매우 크게 나타나는 경향을 보였다. 이는 지하수위 변동에 하강량과 하강율을 동시에 고려하여 지하수 수위에 대한 관리기준을 정하고 관리되어야만 한다.

6) 지하수 모형에서 산출된 JM-YH관측정의 수위를 초기수위로 설정하여 지속양수 69일 이후에 1단계 지하수위에 도달하였다. 이를 제주특별자치도 조례에서 제시된 평균 기준수위로 환산하여 분석한 결과 51일 이후 1단계 지하수위에 도달하였다.

이러한 연구결과들은 제주도 수자원 개발 및 이용과 관리정책 등의 수립 시 기초자료와 미래 기후변화에 대비한 수자원의 예측과 모델링 시에 활용될 수 있다. 향후 이상기후에 따른 지하수위의 변동과 양수에 의한 부정류해석 등을 위해서는 지하수의 함양량을 보다 정확하게 산정하여야 하며, 이를 위한 지속적인 수문성분조사와 지하수위 관측망의 확대와 조사가 필요하다.

참고문헌

- 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-Hydroscience & 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,” Journal of 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.
- RDI, 1996, Acoustic Doppler Current Profilers-Principle of operation, a practical primer. San Diego, CA, Instruments
- SonTek, 2010, Doppler Velocity Log for ROV/AUV Applications, SonTek Newsletter, 6(1), SonTek, SanDiego, CA.
- Toth, J., 1963, A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins, Journal of Geology.
- Ueshita, K. and Sato, T., 1976, Study on the reasonable recover of groundwater in the Nobi Plain, Proceeding of Japan society of civil engineers, 287, 137-146
- USGS, 2011, A Water-Budget Model and Assessment of Groundwater Recharge for the Island of Hawai'i, pp.15 - 20.
- Vieus, B. E., 2001, Distributed Hydrological Modeling Using GIS, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Woolhiser, D. A., 1996, “Search for Physically Based Runoff Model - A Hydrologic El Dorado”, Journal of Hydraulic Engineering 123(3), pp. 122-129.
- Wang, H. F., Anderson, M. P., 1982, Introduction to groundwater modeling-finite difference and finite element methods, W. H. Freeman and company.
- Williams, J. R., Nicks, A. D., Arnold, J. G., 1985, Simulato for water resources

- in rural basins., J. Hydrological. Eng, ASCE 111(6), pp. 970-987.
- <http://www.neins.go.kr/gis/mnu01/doc03a.asp>, 국토환경공간정보
- OECD, 2008, OECD Environmental Outlook to 2030
- 이재수, 2008, 수문학, 구미서관
- 제주발전연구원, 2012, 제주상수도 50년
- 제주특별자치도, 2014, 제주특별자치도 풍수해저감종합계획
- 제주도·한국수자원 공사, 2003, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사Ⅲ, pp. 18~28.
- 제주시, 2009, 한천 외 3개 하천기본계획
- 제주시, 2001, 지방2급 하천정비기본계획 보고서
- 제주시, 1992, 하천정비기본계획
- 한국건설기술연구원, 한국지질자원연구원, 경희대학교, 2007, 우리나라 지역특성에 맞는 최적 지하수 함양량 산정 기법 개발
- 한국지질자원연구원, 2008, 제주도 지하수 부존 특성에 대한 지구과학적 해석, pp. 129.
- 한국지질자원연구원, 2011, 제주위터 지속이용 가능량 평가 및 기능성 지하수 발굴, 광역경제권 선도산업 육성사업 보고서, pp. 2-108-2-119.
- 한국건설기술연구원, 2008, HyGIS-SWAT manual
- 제주문화 제11호, 2005, 제주도 지하수의 부존 및 산출특성, pp. 95-115.
- 고건, 2005, 제주도 지하수의 개발과 원상복구기술에 관한 연구, 제주대학교 대학원 석사학위 논문, pp 1-4
- 고병련, 1985, 제주도의 지하수 보존형태와 지하수위 변동에 관한 연구, 건국대학교 산업대학원, 학술저널, 26, 205-230
- 김기수, 2015, 4대강 보 설치에 의한 지하수 흐름계 변화, 공주대학원 대학원 석사학위 논문
- 김민철, 2014, 제주도 성상유역의 지하수 유동 및 함양에 따른 수리특성, 제주대학교 대학원 석사학위 논문
- 김재광, 2001, 지하수 유동시스템 해석을 위한 유한요소법의 적용에 관한 연구, 경일대학교 산업대학원 석사학위 논문
- 김동수, 강부식, 2011, ADCP 자료의 공간평균을 이용한 평균유속장 산정에 대한 검

- 증, 한국환경과학회지, 20(1), pp. 107-118
- 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.
- 문덕철, 양성기, 고기원, 박원배, 2005, 제주도 주요하천의 기저유출량 산정에 관한 연구, 한국환경과학회지, 14(4). 405-412.
- 문덕철, 하규철, 고기원, 박기화, 2004, 제주도 하천의 수위-유량 변동특성연구, 한국 지하수도양환경학회 추계학술발표회 논문집, 422-425.
- 변창구, 1999, 제주도 수자원의 효율적인 이용방안 연구, 제주대학교 산업대학원 석사학위논문, pp 2-3
- 박원배, 문덕철, 2010, 하천유출수 활용방안 마련을 위한 수문 및 수질특성 기초연구-한천·화북천·효례천을 중심으로-, 제주발전연구원 정책연구집, 2010-3.
- 박원배, 문덕철, 2009, 제주지역 하천유출수 활용을 위한 수문 및 수질특성 기초연구, 제주발전연구원 정책연구집, 2009-11.
- 박원배, 문덕철, 2008, 하천유출수 활용방안 마련을 위한 수문 및 수질특성 기초연구, 제주발전연구원 정책연구집, 2008-11.
- 시강, 송기현, 2009, 강우-유출 모형의 매개변수 결정에 따른 홍수량 분석, 국가위기관리학회보 제1권, pp. 140-148.
- 서정아, 2009, 제주도 지역 지하수 흐름 모델개발, 공주대학교 대학원 석사학위 논문, pp. 24.
- 윤용남, 2007, 수문학, 청문각
- 이동훈, 2012, 유출분석을 위한 소유역 분할에 대한 연구, 아주대학교 대학원 공학 석사학위 논문, pp. 14-20.
- 원유승, 2007, 지표수와 지하수를 연계한 장기 강우-유출 모형의 개발, 아주대학교 일반대학원 박사학위 논문
- 안승섭, 정도준, 정광옥, 최정우, 2008, GMS-MODFLOW 모델을 이용한 도서유역의 지하수 유동해석, 한국수처리학회지, 16(2), pp. 29-59
- 용재경, 2003, 변동 유한 요소법을 이용한 부정류 상태의 지하수 유동 모델 개발, 경일대학교 산업대학원 석사학위 논문

- 이병철, 2009, 화산도서유역에서의 수치모형을 이용한 지하수 유동해석, 경일대학교 대학원, 박사학위논문
- 이병대, 2001, 영천댐 도수로터널 굴착과 관련된 수리지질학적 특성 연구, 부산대학교 박사학위 논문, pp. 38.
- 양성기, 김동수, 정우열, 류권규, 2011, 다양한 첨단 유량 계측기기를 활용한 제주도 하천 유출 비교 분석, 한국환경과학회지, 20(6), pp.783-788.
- 윤현찬, 2010, 수문학적 토양군의 분류기준에 따른 유출특성, 경상대학교 대학원 공학석사학위논문, pp.15-21.
- 윤태훈, 1999, 응용수문학, 청문각
- 윤성준, 2008, 중소하천 유역에서의 확률홍수량 분석, 한밭대학교 대학원 공학석사학위 논문, pp. 6-12.
- 정우열, 2008, SWAT 모형을 이용한 제주도 하천의 유출량 모의, 제주대학교 대학원 공학석사학위논문, pp. 63-64.
- 정수일, 2003, MODFLOW 모형을 이용한 지표수와 지하수사이의 유동에 관한 연구, 경일대학교 대학원 석사학위 논문
- 전주영, 2016, 지하수 관측정을 통한 지하수 유동 및 수위변화의 평가방법, 가톨릭관동대학교 일반대학원 석사학위 논문
- 정도준, 2008, 화산도서 지역에서의 지하수 유동특성에 관한 연구, 경일대학교 대학원 석사학위 논문
- 정우열, 2008, SWAT 모형을 이용한 제주도 하천의 유출량 모의, 제주대학교 대학원, 석사학위논문, p.9
- 정우열, 양성기, 2009, SWAT 모형을 이용한 제주도 하천의 유출량 모의, 한국환경과학회지, 18(9), pp.1045-1055
- 정일문, 이정우, 김지태, 나한나, 김남원, 2011, 제주도 유출분석을 위한 한계유출 모의기법 개발, 한국환경과학회지, 20(10), pp. 1347-1355.
- 정우열, 양성기, 이준호, 2013, 제주도 도심하천 유역의 유출특성 해석, 한국환경과학회지, 22(5), pp. 555-562.
- 정종호, 윤용남, 2007, 수자원설계실무, 구미서관
- 정남선, 2000, 지형정보자료와 HEC-HMS를 이용한 유출량 산정, 조선대학교 대학원 공학박사학위 논문, pp. 8-17.

- 정상용, 유인걸, 윤명재, 권해우, 허선희, 1999, 불균질 이방성 대수층의 지하수 유동 분석에 지구통계기법의 응용, 지질공학회지, pp. 147-159.
- 정성호, 2002, 전자파표면유속계를 이용한 홍수기 유량 측장에 관한 연구, 밀양대학교 산업대학원 석사학위 논문, pp. 12-24.
- 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
- 최병수, 1999, 제주도 지하수의 우물 비양수량자료를 이용한 대수층상수 결정방법, 지하수환경, 6, pp. 180-187.
- 하규철, 박원배, 문덕철, 2009, 제주도 토지이용변화에 따른 직접유출량 변화 추정, 자원환경지질 42(4), pp. 343-356.
- 한용규, 양성기, 2009, SWAT 모형에 의한 제주도 외도구역의 토지이용변화에 따른 유출량 산정, 한국환경과학회지, 18(9), 1057-1063.

감사의 글

학문의 길로 인도하여 주시고, 항상 긍정의 에너지로 자상한 가르침과 따뜻한 마음으로 이끌어 주신 양성기 교수님께 무한한 감사의 말씀을 드립니다. 또한 바쁘신 와중에도 논문심사과정에서 세심한 가르침을 주신 김남형 교수님, 김상진 교수님, 박원배 박사님, 이병철 박사님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 아울러 대학원 과정에서 많은 가르침을 주신 이병걸 교수님, 박상렬 교수님, 이동욱 교수님께도 감사의 말씀드립니다.

연구과정에 저에게 많은 지식을 전수하고 논문작성에 도움을 주신 단국대학교 김동수 교수님, 한국건설기술원의 김남원 박사님, 정일문 박사님, 정우열 박사님께도 고마운 말씀을 드립니다.

본 논문이 완성되기까지 헌신적으로 도움을 준 이준호, 김용석, 김민철, 강명수, 강보성에게 고마운 마음을 전하며, 바쁜 업무에도 큰 힘이 되어 준 오승태 이사를 비롯한 남천개발 임직원여러분께 감사드립니다.

제가 살아가는 길에 늘 애정어린 눈으로 지켜보시고 든든한 버팀이 되어주신 부모님의 은혜에 감사드리며, 제가 항상 잘되기를 바라시는 장인어른 장모님께 깊은 감사를 드립니다. 따뜻한 격려를 아끼지 않았던 누님, 형님과 동생 내외분께도 감사드립니다.

힘든 직장생활에도 내색하지 않고 뒷바라지를 아끼지 않았던 사랑하는 아내 강윤정과 내 삶의 기쁨인 지영, 상운, 지운과 더불어 이 작은 결실의 기쁨을 함께 하고자 합니다.

2016년 8월
고 재 욱 배상