



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

제주도 성산유역의 지하수 유동 및  
함양에 따른 수리특성

濟州大學校 産業大學院

土木海洋工學科

金 玟 哲

2014 年 8 月

# 제주도 성산유역의 지하수 유동 및 함양에 따른 수리특성

指導教授 楊 城 基

金 玟 哲

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2014 年 8 月

金玟哲의 工學碩士學位 論文을 認准함.

審査委員長 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

濟州大學校 産業大學院

2014 年 8 月

# Hydraulic Characteristics of Groundwater Flow and Recharge in Jeju Sung-san Basin

Min-Chul Kim

(Supervised by Professor Sung-Kee Yang)

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

2014. 8.

This thesis has been examined and approved.

DEPARTMENT OF CIVIL & OCEAN ENGINEERING  
GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY



목 차 .....	i
List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
Summary .....	vi
<b>I. 서론</b> .....	<b>1</b>
1. 연구의 배경 .....	1
2. 연구의 동향 .....	2
3. 연구의 목적 .....	4
<b>II. 제주도 수자원 및 지하수 현황</b> .....	<b>5</b>
1. 제주도 수자원 현황 .....	5
2. 제주도 지하수 현황 .....	8
2-1. 제주도 지하수 이용·개발 현황 .....	8
2-2. 제주도 지하수 부존특성 .....	9
<b>III. 연구대상유역 및 유역현황</b> .....	<b>12</b>
1. 연구대상 유역 선정 .....	12
2. 연구대상 유역 특성 .....	13
2-1. 지형 특성 .....	13
2-2. 지질 특성 .....	16
<b>IV. 지하수 관측자료 및 해석모형</b> .....	<b>20</b>
1. 지하수 관측자료 .....	20
2. 지하수 해석모형 .....	22

<b>V. 결과 및 고찰</b> .....	<b>36</b>
1. 지하수 해석 모형구축.....	36
2. 정상류 상태에 따른 지하수 흐름분석.....	47
3. 지하수 함양량에 따른 지하수위 변동특성.....	55
<b>VI. 결론</b> .....	<b>64</b>
<b>참고문헌</b> .....	<b>66</b>
<b>감사의 글</b> .....	<b>69</b>

## List of Tables

Table II-1. Status of water resources facilities and capacity in Jeju-do	6
Table II-2. Status of water resources development and use in Jeju-do	6
Table II-3. Ratio availability to capacity of water resources facilities in Jeju-do	7
Table II-4. Status of groundwater development in Jeju-do	9
Table III-1. Altitude analysis of Sung-san Basin	14
Table III-2. Slope analysis of Sung-san Basin	15
Table III-3. Geological classification of Sung-san Basin	18
Table IV-1. Status of observation holes of the target region	22
Table IV-2. MODFLOW Main Package	35
Table V-1. Depth of low permeable layer and groundwater wells for observation	39
Table V-2. Model Input Data	46
Table V-3. Observation and Computed Water Level with Comparison	48
Table V-4. Observation and Computed Water Level with Comparison (Flow)	54
Table V-5. Groundwater recharge input data	55
Table V-6. Computed Hydraulic conductivity value	55
Table V-7. Comparison of observed and calculated water levels for 2003~2009	60
Table V-8. $R^2$ , RMS and $R^2$ and RMS excluding JD-SD3 for 2003~2009	62
Table V-9. Hydraulic conductivity according to recharge rate	63

## List of Figures

Fig. II-1. Distribution of groundwater system in Jeju-do	8
Fig. II-2. Mimetic diagram for endowment of groundwater	11
Fig. II-3. Endowment diagram of underground water in Jeju-do	11
Fig. III-1. Classification of 16 water basins of the target region	13
Fig. III-2. Altitude analysis of Sung-san Basin	14
Fig. III-3. Slope analysis of Sung-san Basin	16
Fig. III-4. Geological distribution of Sung-san Basin	19
Fig. IV-1. Status of observation holes for each purpose in Jeju-do	20
Fig. IV-2. Groundwater Observation Point	21
Fig. IV-3. Mimetic diagram of virtual aquifer	24
Fig. IV-4. Block-centered grid and point-centered grid system	26
Fig. IV-5. Isometric drawing of core $i, j, k$ cell and 6 nearby cells	26
Fig. IV-6. Groundwater flow from $(i, j, k)$ cell to $(i, j-1, k)$ cell	27
Fig. V-1. Digital elevation model for the top part (volcanic rock layer) of Jeju-do	36
Fig. V-2. Low Permeability Depth Check Point	37
Fig. V-3. Jeju-do Plan View of Low Permeability and 3D Grid	38
Fig. V-4. Basalt and Low Permeable Layer in Sung-san Basin	43
Fig. V-5. Vertical Layers Boundary	44
Fig. V-6. Boundary and Flow Conditions	45
Fig. V-7. Steady Flow Analysis	47
Fig. V-8. Graphical Comparison between Observation and Computed Water Level	48
Fig. V-9. Elevation of Sung-san Basin	49
Fig. V-10. Elevation and Groundwater Level	50

Fig. V-11. Groundwater in 2013.....	51
Fig. V-12. Boundary Condition (Flow).....	52
Fig. V-13. Steady Flow Analysis (Flow).....	53
Fig. V-14. Graphical Comparison between Observation and Computed Water Level (Flow).....	54
Fig. V-15. Water level distribution according to recharge rate of Groundwater (2003~2009).....	59

## Summary

Depth of low permeability layer confirmed and applied to MODFLOW program for analyzing hydraulic characteristics of Jeju-do Seongsan Basin according to flow and groundwater recharge. The simulation result on numerical analysis is as follows.

Depth of low permeability layer in Jeju-do is 180.0m~140.0m from sea level, and depth of low permeability layer in Seongsan Basin is relatively deep at -43.8m~117.5m. As a result of simulating waterfront boundary adjacent to Seongsan Basin as no-flow during application of MODFLOW model, error between observed water level and calculated water level was -0.26~0.62m. Error was reduced to -0.29~0.36m when flow of water set to north of Seongsan Basin. Characteristics of groundwater level were simulated after applying groundwater recharge data for 2003~2009, and large error was found in groundwater level of observation wells distributed nearby Pyoseon Basin. Mean hydraulic conductivity was computed as  $3.34 \times 10^{-3}$  m/sec according to groundwater recharge.

# I. 서론

## 1. 연구의 배경

제주도의 연평균 강수량은 2,061mm로 국내 최다우 지역이지만 균열, 절리, 클링 커 및 용암터널 등 투수성이 좋은 지질특성으로 대부분의 하천은 건천의 형태를 유지하고 있다. 또한 제주도의 하천은 한라산을 중심으로 남북방향으로 발달해 있으며, 하천의 경사는 매우 급하고, 유로 연장이 짧은 특성으로 하천유출은 집중호우 시에만 단시간 발생하여 지표수 이용은 어려운 실정이다(Jung과 Yang, 2009).

과거 제주도의 식수 및 생활용수는 용천수 및 봉천수로 물허벅이나 우마차 등으로 운반하여 이용하였으나, 현재는 지하수를 개발하여 생활용수 및 농업용수 등으로 이용하고 있다. 제주도의 지하수 이용량은 전체 수자원의 83.9% 이상을 차지하고 있어 지하수에의 의존도가 매우 높다(제주상수도50년, 2012). 그러나 최근 기후변화에 의한 강수량 변동이 심하고, 집중호우 및 가뭄 등에 의한 피해가 심각하여 무분별한 지하수의 개발·이용은 지하수의 고갈과 오염을 초래할 수도 있으며, 물이 생명인 제주도의 수자원 정책에도 큰 영향을 미칠 수 있다.

지하수의 흐름과 함양량 등은 외부로 노출이 되지 않아 시각적으로 확인이 불가능한 현상으로 측정 및 흐름을 예측하기란 매우 어려운 문제이다. 일단 오염된 지하수는 원인을 규명하기란 쉽지 않기 때문에 장기간의 시간 및 비용이 소비될 수도 있어 제주도의 지하수를 효율적으로 개발·이용하기 위해서는 수리지질구조와 함께 지하수의 수리특성을 이해하여야만 한다. 특히, 제주도의 지하수 대수층은 수차례 발생한 화산활동에 의해 생성된 다층구조로 복잡한 지질특성을 가지고 있어, 지하수의 수리적 특성과 부존특성 등에 대해서 풀어야 할 과제가 매우 많다.

## 2. 연구의 동향

지하수 흐름 및 해석과정을 모델화하기 위한 연구로는 Hubbert(1940)의 지하수 유동이론을 모델로 적용시킨 것을 시초로 Toth(1963)는 소규모 배수유역에 대한 지하수흐름의 이론적 해석, Freeze & Witherspoon(1996)는 수학적 모델에 의해 3차원적, 비균질적, 이방등성 유역에 정상지하수 흐름에 대하여 연구하였다. Davis et al(1970)은 1966년 제주도의 24개 지하수의 자료를 활용하여 지하수 평균 지체시간을 추정하였고, 제주도의 지하수는 빠르다는 것을 확인 하였다. Freeze(1971)는 포화·불포화에 대한 천의 흐름의 취급에 대한 3차원 유한차분모델을 개발하고, 소규모 가상(hypothetical)유역에 적용하여 지표면 상부경계조건을 포함시켰다. Gupta와 Tanji(1976), Kuiper(1975)등은 정상상태의 3차원모델의 유용성을 개선하여 적용하였고, Narasimhan 과 Witherspoon(1976)은 3차원 지하수 흐름에 대한 유차분석(Finite Difference) 방정식을 적용하여 발전시켰으며, Ueshita와 Sato(1979)의 경우 과도한 양수에 의한 유역의 침강문제에 대하여 3차원 모델을 적용하여 연구하였다. 그러나 복잡한 지하수면과 복잡한 대수층 및 지질적 특성을 적용하기에 한계가 있었다. 이에 따라 Gupta et al(1984)은 규모가 크고, 다층구조로 이루어진 지층과 시간에 의존하는 수원기간을 갖고 복잡한 지하수 시스템에 대한 3차원 유한 요소모델을 개발하고, Wang & Anderson(1982)은 유한차분과 유한요소법에 의한 지하수 모델링을 연구하였으며, Brown(1986)은 높은 염수를 가진 지역에 대한 유동시스템에 관한 연구를 수행하였다.

지하수 유동시스템에 관한 국내의 연구로는 김영기(1976)의 반야월층의 지하수 유동에 관한연구와 안종성(1983)은 동위원소를 이용한 한강 유역 내 지하수와 지표수의 연관성에 대하여 연구하였다. 배상근(1992)는 대구지역의 지하수 유동계의 변동은 지하수 개발에 의해 변화하는 양수 주변지역의 물의 환경, 특히, 하천수와 지하수의 교류에 대한 변화, 지하수의 흐름, 지하수위 변화를 3차원을 통한 유한차분법으로 해석하였다. 김재광(2001)은 유한 요소법을 이용한 지하수 유동 해석 시스템을 연구하였고, 용재경(2003)은 변동 유한 요소법을 이용한 부정류상태의 지하수 유동개발, 정수일(2003)은 MODFLOW 모형을 이용한 지표수와



지하수사이의 유동을 연구하였다. 이환기(2004)는 수문곡선분리기법과 물리기반 유출을 이용한 지하수 함양량 추정에 대한 연구가 진행 되었고, 김남원(2004)은 지표수 수문성분 해석기술 개발을 통해 수문성분들의 정량화와 상호관계를 규명에 대한 연구, 원유승(2007)은 지표수-지하수를 연계하여 강우 유출모형의 개발에 관한 연구가 진행되었다.

제주도 지하수의 연구는 고병련(1984, 1998)의 제주도 지하수 부존형태와 지하수위 변동, 지하수 수질 및 오염 예측에 관한 모델 연구에 대해서, 김계남(1990)은 암반에서의 지하수 유동특성 분석, 이순탁(1996)은 지하수 수온 및 안정동위체, 방사성동위체와 지하수 수질등의 환경추정가 분석에 의한 제주도에서의 지하수 유동을 연구하였고, 권영달(2002)은 유한 차분법을 이용한 양수에 따른 지하수 유동해석 시스템 해석을 연구하였다. 최근 정도준(2008)은 제주도 서귀포시를 대상으로 지하수 유동특성에 대하여 연구하였고, 최정현(2008)의 지하수 양수량 변화에 따른 자유지하수위 거동에 대한 연구, 석동기(2009)는 제주도 서귀포시의 지표수와 지하수의 유동시스템 연구, 이병철(2009)은 제주도 표선유역에서의 수치모형을 이용한 지하수 유동해석, 이남훈(201) 제주도 서귀포시를 대상으로 지하수 유동특성에 관한연구, 최경창(2011) 해안 저지대의 지형특성에 따른 지하수 유동 특성에 대한 연구가 진행 되었다. 또한, 김남원 등(2009, 2013)은 제주지역 지표수-지하수 연계해석, 통합수문모형을 이용한 제주 한천 유역의 지하수 변동 특성 모의 등 지표수와 지하수의 관계를 통합적으로 해석하는 연구가 진행되었으며, 현재 제주도의 지표수와 지하수를 연계하여 분석하는 연구가 지속적으로 진행되고 있다.

### 3. 연구의 목적

제주의 지하수는 화산암으로 형성된 지질구조로 인하여 내륙과는 매우 상이한 특성을 보이며, 지하수의 유동특성을 파악하기 위해서는 대수층 구조 및 정상류 상태의 지하수의 흐름 등은 기본적으로 파악되어야만 한다.

본 연구에서는 제주도 성산유역의 지하수 유동 및 함양에 따른 수리 특성을 조사하기 위하여 지하수 관측공 및 개인 지하수 관정 총 141개소의 지질주상도 자료를 이용하여 화산암층 하부의 저투수층(퇴적층) 구조를 확인한 후 MODFLOW 프로그램을 사용하여 수치해석을 실시하였다. 또한 성산유역을 대상으로 유역경계면에서 흐름이 없는 NO-FLOW와 저투수층을 고려한 정상류 상태의 흐름을 비교·검토 하였으며, 2011년 한국 지질자원연구원에서 조사된 물수지 분석을 통하여 산출된 함양량의 자료를 이용하여 2003부터 2009년까지 총 7개년에 대한 지하수위의 변동 및 수리특성에 대해 모의하였다.

이 연구를 통해 유역 하부의 저투수층 구조가 지하수 흐름에 미치는 영향을 확인할 수 있으며, 유역의 함양에 따른 평균 수리전도도를 산출하고, 다양한 지층으로 형성되어 있는 복잡한 제주지층을 단순화 하여 수치해석 모형에 적용할 수 있도록 한다. 이는 지하수 개발·이용 및 연구 사업에 유용하게 활용 될 것으로 기대된다.

## II. 제주도 수자원 및 지하수 현황

### 1. 제주도 수자원 현황

제주도의 수자원은 1953년 금산수원 개발을 시작으로 1960년부터는 심정굴착, 간이수도, 어승생 저수지 건설 등의 수자원 개발 사업이 진행되었다. 1970년대에는 지하수관정 개발 사업이 확대되었으며, 2000년에는 동부지역(조천-구좌-성산-표선-남원-서귀포)의 광역상수도 1단계사업이 완료되었으며, 2008년에는 서부지역(애월-한림-한경-대정-안덕-서귀포)을 급수대상으로 하는 광역상수도 2단계사업이 완료되었다(제주상수도 50년, 2012). 현재 제주도는 전국 최초로 광역상수도 공급 시스템이 구축되어 전국 최고의 상수도 보급률을 보이고 있다(환경부, 2012 상수도통계).

#### 1) 수자원 개발 현황

제주도 2011년 기준 수자원시설의 총 시설용량은 633만 $m^3$ /년으로, 지하수는 전체시설의 532만 $m^3$ /년(84.0%)이며, 용천수는 68만 $m^3$ /년(10.8%), 어승생 저수지 및 지표수(농업용 저수지)는 10만 $m^3$ /년(1.7%), 기타 대체수자원과 인공함양은 5만 $m^3$ /년(3.5%)을 차지하고 있다(수자원관리종합계획2013-2022)(Table II-1).

Table II-1. Status of water resources facilities and capacity in Jeju-do

수원	시설수 (개소)	시설용량 (천m <sup>3</sup> /년)	구성비 (%)
지하수	4,851	532,137	84.0
용천수	14	68,255	10.8
어승생 저수지	1	5,475	0.9
지표수 (농업용 저수지)	5	5,383	0.5
대체수자원	빗물이용시설	246	16,500
	하수방류수 재이용시설	1	1,825
	해수담수화	4	812
	중수도	5	239
도서지역 저수지	5	172	0.0
인공함양	101	5,829	0.9
계	5,223	633,751	100.0

출처) 제주특별자치도 수자원관리종합계획(2013-2022)

## 2) 수자원 이용 현황

수자원 총 이용량은 179만m<sup>3</sup>/년으로, 지하수는 전체이용량의 151만m<sup>3</sup>/년(83.9%)로 가장 많으며, 용천수는 15만m<sup>3</sup>/년(8.5%), 어승생 저수지 및 지표수(농업용 저수지)는 2만m<sup>3</sup>/년(1.5%), 기타 대체수자원과 인공함양은 10만m<sup>3</sup>/년(6.0%)으로 이용되고 있다(Table II-2).

Table II-2. Status of water resources development and use in Jeju-do

수원	시설수 (개소)	이용량 (천m <sup>3</sup> /년)	구성비 (%)
지하수	4,851	151,030	83.9
용천수	14	15,321	8.5
어승생 저수지	1	2,010	1.1
지표수 (농업용 저수지)	5	744	0.4
대체수자원	빗물이용시설	236	7,776
	하수방류수 재이용시설	1	-
	해수담수화	4	201
	중수도	5	104
도서지역 저수지	5	129	0.1
인공함양	101	2,664	1.5
계	5,223	179,980	100.0

출처) 제주특별자치도 수자원관리종합계획(2013-2022)

### 3) 시설용량 대비 이용률

수자원시설 총 이용시설 633,751천m<sup>3</sup>/년 중 총 이용량은 179,980천m<sup>3</sup>/년으로 시설용량 대비 28.3%로, 지하수 28.4%, 용천수 23.7%, 어승생 저수지 36.7%, 농업용저수지 13.8%등으로 대부분 시설용량에 비해 낮은 이용률을 보이는 것으로 확인되었다(Table II-3).

Table II-3. Ratio availability to capacity of water resources facilities in Jeju-do

수원		시설용량 (천m <sup>3</sup> /년)	이용량 (천m <sup>3</sup> /년)	시설용량 대비 이용률 (%)
지하수		532,137	151,030	28.4
용천수		68,255	15,321	23.7
어승생 저수지		5,475	2,010	36.7
지표수 (농업용 저수지)		5,383	744	13.8
대체수자원	빗물이용시설	16,500	7,776	57.1
	하수방류수 재이용시설	1,825	-	-
	해수담수화	812	201	24.8
	중수도	239	104	43.5
도서지역 저수지		172	129	75.0
인공함양		5,829	2,664	45.7
계		633,751	179,980	28.3

출처) 제주특별자치도 수자원관리종합계획(2013-2022)

## 2. 제주도 지하수 현황

### 2.1 제주도 지하수 이용·개발 현황

제주도 면적 1,828.3km<sup>2</sup>내 2013년 기준 총 4,824공(염지하수, 조서관측용 제외)의 지하수 관정이 개발·이용되고 있으며, 용도별로 생활용, 공업용, 농업용 및 먹는샘물 제조용으로 구분된다(지하수 조사연보, 2013). 농업용관정은 전체관정의 67.70%(3,266공)로 높은 비중을 차지하고 있으나 대부분 소규모 농업용 관정이 주를 이루며, 생활용관정은 28.61%(1,380공), 공업용관정은 3.54%(171공), 먹는샘물 제조용은 0.15%(7공)를 차지하고 있다.

제주의 지하수는 해안변을 따라 관정이 밀집되어 있고, 중제주와 동제주, 대정, 남원, 동서귀, 중서귀유역에 지하수 관정이 많이 분포되어있다(Fig. II-1).

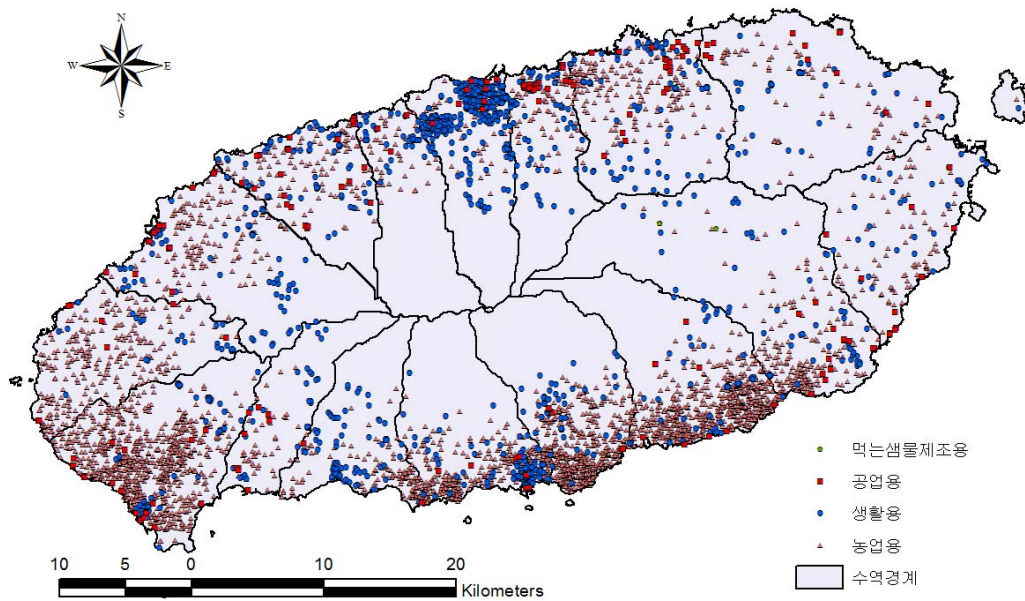


Fig. II-1. Distribution of groundwater system in Jeju-do

제주도 전체 지하수 허가량은 1,457천m<sup>3</sup>/일이며, 전체 허가량 대비 생활용 37.95%(553천m<sup>3</sup>/일), 농업용 59.99%(874천m<sup>3</sup>/일), 공업용 1.78%(26천m<sup>3</sup>/일), 먹는샘물제조용 0.28%(4천m<sup>3</sup>/일)의 취수허가가 진행된 상태이다(Table II-4).

Table II-4. Status of groundwater development in Jeju-do

구분		생활용	농업용	공업용	먹는샘물 제조용	계
지하수 관정	공수 (공)	1,380	3,266	171	7	4,824
	백분율 (%)	28.61	67.70	3.54	0.15	100.0
취수 허가량	허가량 (천m <sup>3</sup> /일)	553	874	26	4	1,457
	백분율 (%)	37.95	59.99	1.78	0.28	100.0

출처) 지하수 조사연보(제주특별자치도, 2013)

※ 염지하수, 조사관측용 제외

## 2.2 제주도 지하수 부존특성

제주도 지하수의 부존형태 분류에 대한 연구는 1990년대부터 시작되었으며, 해안과 접하고 있는 도서지역의 특수성으로 인해 담·염수 경계 형성 및 변동특성과 지하지질 분포, 지하수의 수리경사 지하수위 분포 및 변동특성 등에 따라 기저지하수, 준기저지하수, 상위지하수 3가지 형태로 구분된다(제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(Ⅲ)(2003, 제주도))(Fig. II-2, Fig. II-3).

### 1) 상위 지하수 (High-level Groundwater)

지표면에 내린 강수가 중력을 받아 투수성지층(대수층)을 통해 침투하다가 불투수성 암성이나 투수성이 저조한 저투수성 지층까지 도달하여 더 이상 하부로 침투되지 못하고 저투수층을 따라 이동하는 지하수를 말한다. 상위지하수는 저투

수층의 상부면을 따라 빠른 선형유속으로 유동함으로 풍수기와 갈수기간, 강수에 따른 지하수체의 변화가 심하여 계절별 유량과 수위 변동 폭이 크게 나타나며 채수에 의한 수위 강하량이 크기 때문에 평균 채수량은 낮은 편이다. 그러나 저투수층 상부에 고여 있는 지하수이기 때문에 해수와 직접적으로 접촉하지 않아 수질이 매우 양호한 특징이 있다.

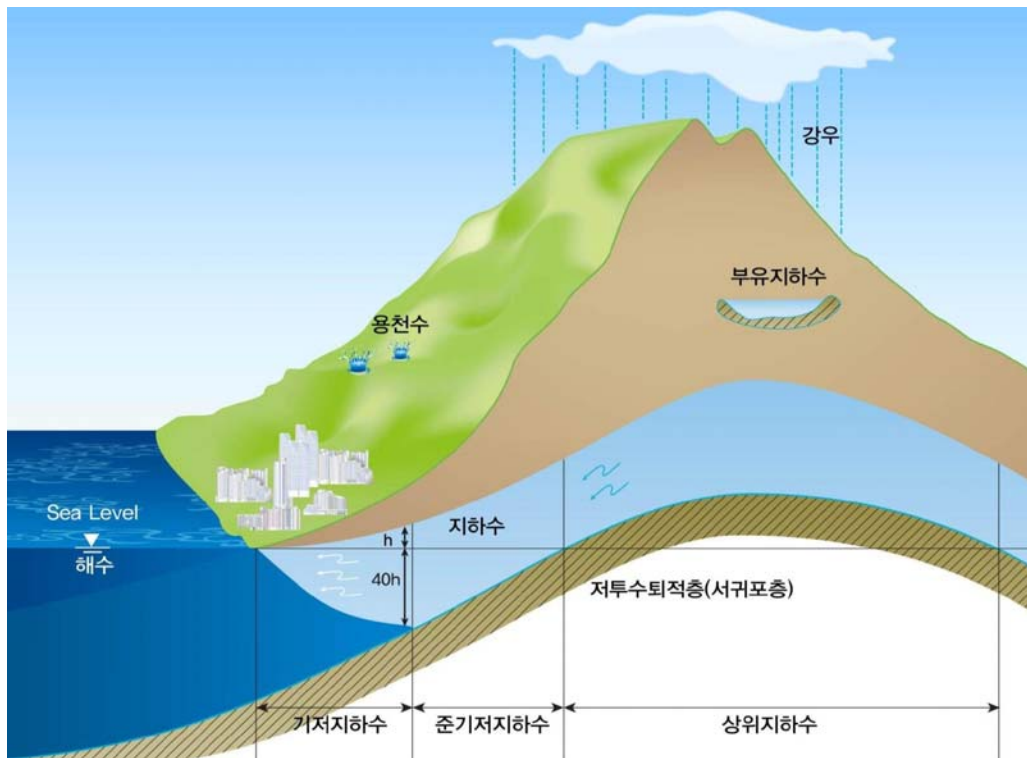
## 2) 준기저지하수 (Parabasal Groundwater)

준기저지하수는 담수 지하수체의 하부가 저투수층에 의해 해수와 직접적인 접촉이 차단되어 Ghyben-Herzberg 원리가 적용되지 않는 지하수체를 의미한다. 이는 평균해수면 상부에 위치하면 상부 준기저지하수로 분류하고, 평균해수면 이하로 위치하면 하부 준기저지하수로 분류된다.

## 3) 기저지하수 (Basal Groundwater)

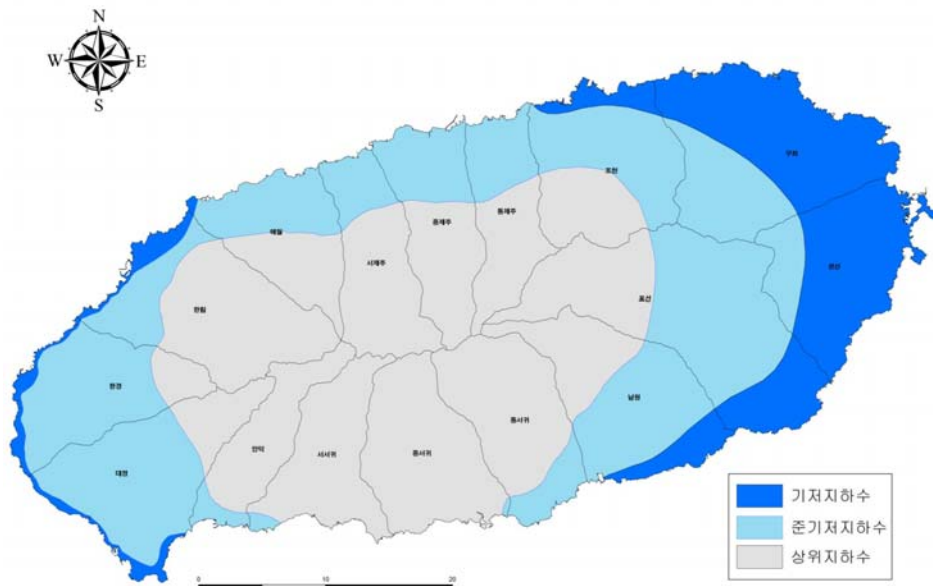
기저지하수는 염수와 담수의 비중차이에 의해 담수가 염수 상부에 렌즈형태로, Ghyben-Herzberg 원리에 의해 부존하는 지하수이다. 기저지하수체와 준기저지하수체의 수평적인 부존경계의 구획은 지하수위 수리경사의 분포와 불투수층인 G-H 비에 의한 경계 기준으로 구획한다.





출처) 제주특별자치도 수자원관리종합계획(2013-2022)

Fig. II-2. Mimetic diagram for endowment of groundwater



출처) 제주특별자치도 수자원관리종합계획(2013-2022)

Fig. II-3. Endowment diagram of underground water in Jeju-do

### Ⅲ. 연구대상유역 및 유역현황

#### 1. 연구대상 유역 선정

제주도는 약 160만 년 전부터 2만 년 전까지 지속적인 화산활동을 통해 형성된 순상화산체(shield volcano)로서 우리나라에서 가장 큰 화산섬이다(Ko와 Park, 2011). 화산체의 두께는 약 2,100m(해수면기준 상부 1,950m, 하부 -150m)이며, 면적은 1,849.18km<sup>2</sup>로 동경 126° 08' 38" ~ 126° 58' 22", 북위 33° 06' 36" ~ 34° 00' 46" 에 위치한다. 섬 중앙부에는 해발고도 1,950m 한라산 백록담을 정점으로 동·서 사면은 대체로 완만한 경사를 나타내며, 남·북 사면은 비교적경사가 급한 지형을 이루고 있다. 또한 분출유희 종말기에 형성된 360개의 소규모 오름이 발달되어 있으며, 한라산을 중심으로 73개의 대·소하천이 발달되어 있다. 제주의 하천은 대부분 강우 시 일시적 유출을 보이는 건천의 특성을 보이며, 하천형태는 남류천의 경우 분석구의 영향을 많이 받아 굴곡이 심하고, 북류천은 남류천에 비해 대체적으로 직선형의 굴곡 형태를 보인다.

본 연구의 대상지역은 ‘제주도 수문지질 및 지하수 자원 종합조사(Ⅲ)(2003.제주도)’에서 지형, 하천, 지표 분수령 등을 기준으로 분류한 16개유역중 성산유역에 해당된다(Fig. Ⅲ-1).

성산유역은 제주도의 동부지역으로 점성이 낮은 파호이호이용암과 화산 쇄설물이 누층을 이루면서 완만한 대지상의 지형을 이루고, 다른 유역에 비해 비포화대가 얇은 특성으로 함양에 따른 지하수위 변동이 즉각적으로 나타난다. 또한, 지하수위 및 해수침투를 관측하는 지하수 관측소가 8개소로 유역 내 일정하게 산재되어 있어 지하수위 확인 등 자료수집이 용이하다.

연구대상유역의 유역특성을 분석하기위해 현지답사 및 자료조사를 통해 지하수 관련 자료를 수집하였으며, 대상지역의 자연환경과 실태를 면밀히 파악하였다.

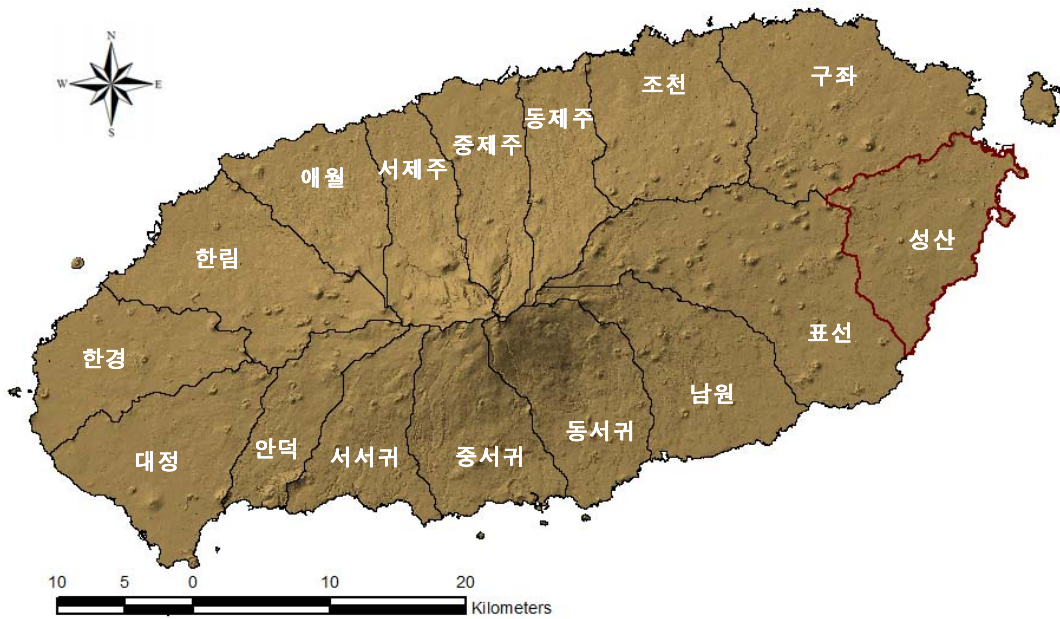


Fig. III-1. Classification of 16 water basins of the target region

## 2. 연구대상 유역 특성

### 2.1 지형 특성

제주도는 지형고도에 따라 표고 200m 이하를 해안 저지대로 구분하고, 표고 200 ~ 600m 간을 중산간 지대, 표고 600m 이상을 산악지대로 구분한다. 제주도 해안저지대의 전체면적은 1,004.9km<sup>2</sup>(54.6%)로 대부분 주거지 및 농경지가 분포하고, 중산간지대는 전체면적 대비 589.0km<sup>2</sup>(32.0%), 산악지대는 전체면적의 246.1km<sup>2</sup>(13.4%)를 차지한다(제주특별자치도 수자원관리종합계획 2013 -2022).

연구대상 지역인 성산유역은 해발고도가 0~355m로 해안저지대 및 중산간 지대로 구분되고, 대부분 농경지가 분포하고 있으며, 성산유역의 전체면적은 114.9km<sup>2</sup>로 0~50m는 42.30km<sup>2</sup>(36.82%), 50~100m는 28.68km<sup>2</sup>(24.96%), 100~150m는 11.40km<sup>2</sup>(9.

92%)로 해안저지대지역(0~200m)이 108.77km<sup>2</sup>(94.67%)를 차지하고 있다(Table III-1, Fig. III-2).

Table III-1. Altitude analysis of Sung-san Basin

표고(m)	면적(km <sup>2</sup> )	구성비(%)	비고
0 - 50	42.30	36.82	
50 - 100	28.68	24.96	
100 - 150	26.39	22.97	
150 - 200	11.40	9.92	
200 - 250	4.98	4.33	
250 - 300	0.95	0.82	
300 - 350	0.19	0.17	
350 - 400	0.01	0.01	
합계	114.90	100.00	

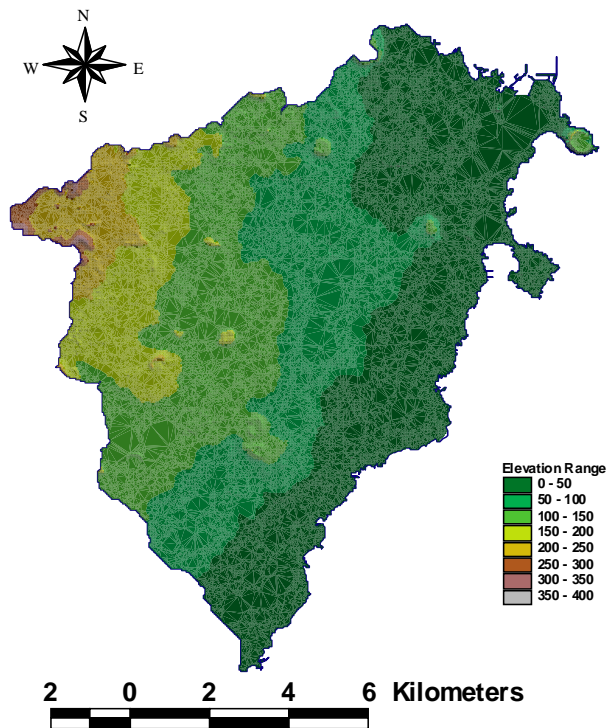


Fig. III-2. Altitude analysis of Sung-san Basin

제주도의 경사도에 따른 지형은 지형경사가 1~4°의 완경사지가 전체면적대비 670.8km<sup>2</sup>(36.5%)로 가장 넓고, 4~8°의 경사지가 403.0km<sup>2</sup>(21.9%), 1°이하의 평탄지가 380.3km<sup>2</sup>(20.7%)를 차지한다(제주특별자치도 수자원관리종합계획2013-2022).

성산유역은 북부 및 남부지역에 비해 평탄지 및 완경사지가 상대적으로 많으며. 성산유역의 경사도는 0~4° 구간이 95.64km<sup>2</sup>(83.24%), 4~8°는 12.40km<sup>2</sup>(10.80%)로 대부분 평탄한 지형경사를 보이는 것으로 조사되었다(Table III-2, Fig. III-3).

Table III-2. Slope analysis of Sung-san Basin

경사(°)	면적(km <sup>2</sup> )	구성비(%)	비고
0-4	95.64	83.24	
4-8	12.40	10.80	
8-12	2.55	2.22	
12-16	1.41	1.22	
16-20	0.95	0.83	
20-24	0.81	0.71	
24-28	0.59	0.51	
28-32	0.26	0.22	
32이상	0.29	0.25	
합계	114.90	100.00	

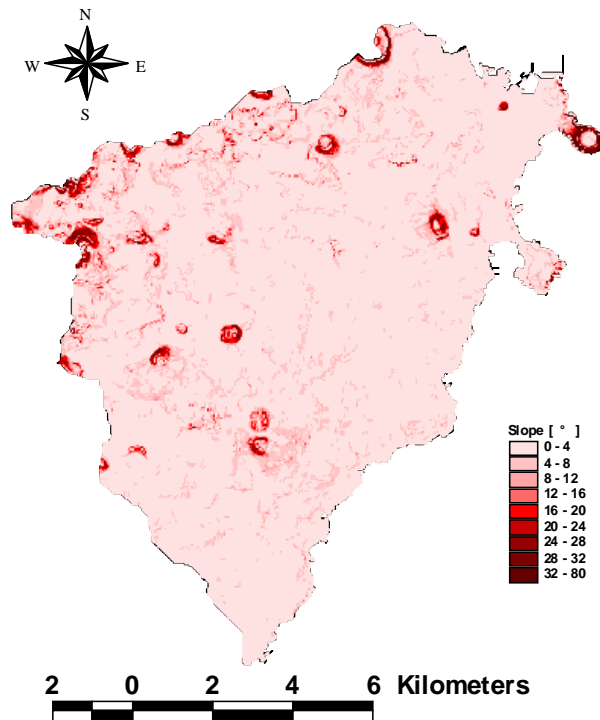


Fig. III-3. Slope analysis of Sung-san Basin

## 2.2 지질 특성

제주도의 지질 조사 및 연구는 일제강점기인 1920년대 초부터 일본 지질학자들(Yokoyama 1921, 1923; Nakamura, 1925; Haraguchi 1928, 1930, 1931등)에 의해 시작되었다. 1945년 광복 후에는 제주도 남부와 남동부 지역의 지하수원조사에 착수한 것을 시작으로 국내의 조사·연구가 진행되었다(제주상수도50년, 2012).

제주도의 상부지층은 신생대 제 3기말 플라이오세 중기~제4기 플라이스토세 후기 까지 계속된 화산활동에 따른 화산분출물로 이루어져있다(제주(백아도, 진남포)지질도폭 설명서, 2000). 상부는 90%이상 현무암층으로 구성되어 있으며, 현무암층과 미고결 퇴적층의 경계 부분은 클링커 및 사력층이 발달되어 있다. 상부 현무암층에는 균열 및 절리, 기공, 클링커 용암터널 등의 투수성 요소들이 포

함하고 있어 투수성이 높은 제주도의 주 대수층으로 알려져 있다(Ko, 1997). 제주도에 분포하는 화산암은 암석화학적으로 볼 때, 알카리계열의 현무암, 조면현무암, 현무암질 조면안산암, 전이질 현무암, 솔리아이트질 현무암, 솔리아이트질 안산암, 조면암질 안산암, 조면암 등으로 다양하다.

지하수 함양과 부존특성을 결정짓는 가장 중요한 요인은 지표 및 지하지질이 며, 지질구조에 따라 지하수의 부존과 산출특성은 달라진다. 지하 층서는 크게 기반암, U층, 서귀포층, 현무암층으로 구분될 수 있으며, 기반암의 분포 깊이는 지역별로 편차가 있지만 해수면 기준 -155m~-312m범위이다. U층은 지표에 분포하고 있지않아 지명을 사용하여 명명할 수 없기 때문에 고기원(1997)에 의해 U층으로 명명되었으며, 서귀포층과 기반암 사이에 점토와 모래로 이루어진 굳지않은 퇴적층으로 분포깊이는 해수면 기준 -44m~-258m이다(Ko, 1997). 서귀포층은 천지연폭포 서쪽 해안 절벽을 따라 지상에 노출되어 있으나 지하에도 광범위하게 분포하고 있다. 분포깊이는 지역에 따라 큰차이를 나타내며 해수면기준 62m~-135m범위로 제주도의 화산층서에 있어 서귀포층을 최하위 퇴적층으로 간주하였다(농어촌진흥공사, 1971. Won, 1975. Lee, 1982).

성산유역의 지표 지질 분포를 파악하기 위해 문헌자료 제주(백아도, 진남포) 지질도폭 설명서(한국자원연구소)를 참조하였으며, Fig. III-4.는 성산유역의 지표 지질 분포를 나타낸 것으로 공천포현무암(53.48%) 및 어도리 현무암(26.01%)이 주를 이루고 있다(Table III-3, Fig. III-4).

Table III-3. Geological classification of Sung-san Basin

지질명	면적(km <sup>2</sup> )	구성비(%)	비고
공천포현무암	61.45	53.48	
어도리현무암	29.89	26.01	
물장울조면현무암	7.15	6.22	
이호동현무암	3.34	2.91	
선흘리현무암질안산암	3.06	2.66	
어도리현무암분석구	2.20	1.92	
물장울조면현무암분석구	1.45	1.26	
공천포현무암분석구	1.20	1.05	
기타	5.16	4.49	
합계	114.90	100.00	

출처) 1:250,000 제주(백아도, 진남포) 지질도폭 설명서, 2000

※ 기타: 도남동데부리퇴적층, 도남동조면현무암, 도남동조면현무암분석구, 사구층, 선흘리분석구, 소록산분석구데부리퇴적층, 소록산조면현무암응회암, 신례리조면현무암, 신례리조면현무암분석구, 영평동현무암분석구, 이호동현무암분석구, 해빈사

※ 면적(km<sup>2</sup>): GIS 분석에 의거



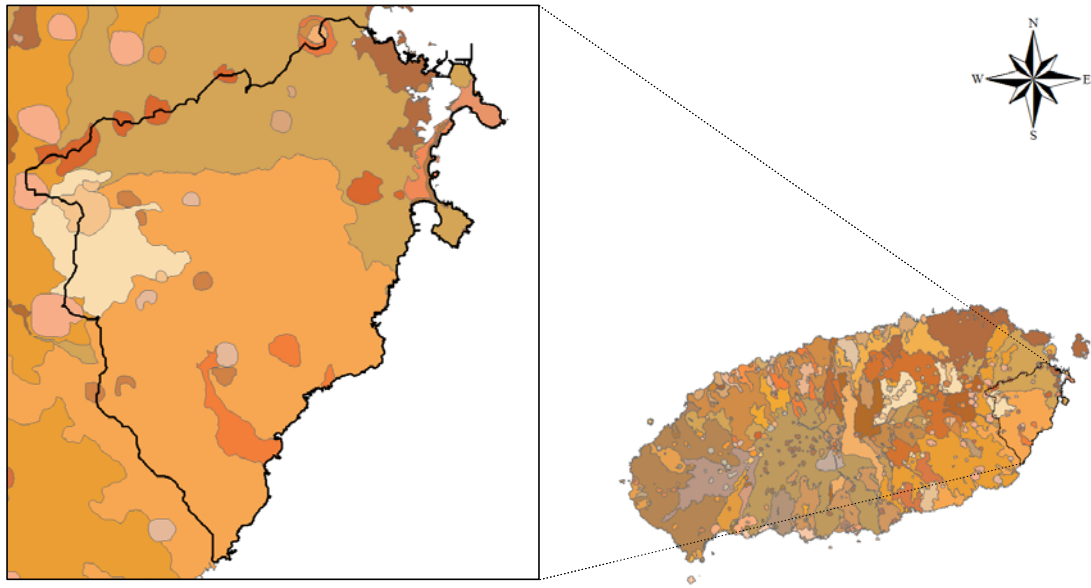


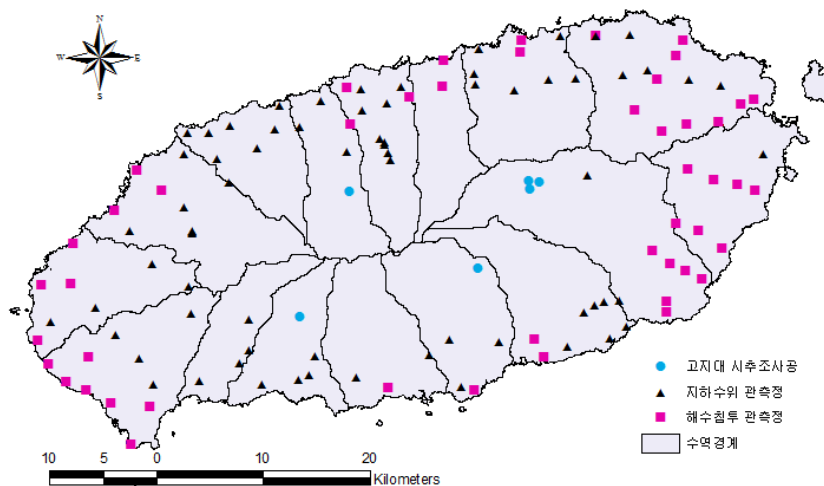
Fig. III-4. Geological distribution of Sung-san Basin

## VI. 지하수 관측자료 및 해석모형

### 1. 지하수 관측자료

지하수위의 변동은 지하수 양수, 인공함양 등 인간의 활동에 의한 인위적인 영향과 강수량, 대기압, 지진, 해양조석 등 자연적인 영향이 포함된 다양한 수문학적 현상에 지배를 받는다(Bredehoeft, 1967. Todd, 1980).

지하수위 관측정은 지하수위·수질 변동을 파악하여 지하수위 하강, 오염 등 지하수 장애로부터 지하수를 보전·관리 하고 대책을 수립하기위해 정기적이고 지속적으로 관측·감시하는 시설이다. 제주도의 경우 강수량과 해양조석에 가장 큰 영향을 미치며, 이에 따라 지하수의 효율적인 관리를 위하여 제주특별자치도 수자원본부에서 관측 목적별로 고지대 시추조사공(6공), 광역상수도 감시정(13공), 국가지하수 관측망(4공), 인공함양연구 조사공(8공), 지하수위 관측공(50공), 해수 침투감시 관측공(50공) 총 131개소(2011년 기준)의 지하수위 모니터링 관측시설이 설치·운영되고 있다(Fig. IV-1).



출처) 제주특별자치도 수자원관리종합계획(2013-2022)

Fig. IV-1. Status of observation holes for each purpose in Jeju-do

지하수 관측망은 기상 및 지표수문과 지하수문의 상관관계, 지하수 부존특성 규명 등 수문학적 기초자료를 축적하고, 제공하며, 지하수자원의 고갈, 오염, 지반침하, 염수침입 등 지하수 장애를 감시하고, 지하수 장애 발생시 원인분석 및 대책 수립에 필요한 관측자료 제공과 지하수 개발·이용 및 보전·관리 대책수립에 필요한 자료를 제공한다.

본 연구 대상지역인 성산유역에는 지하수위 관측정 1개소(JW-GS), 해수침투 관측공 7개소(JD-SS1~SS4, JD-SD1~SD3) 총 8개소의 관측공이 일정하게 산재되어 있으며, 제주특별자치도 수자원본부 홈페이지를 통해 2013년 연평균 수위를 확인 하였다(Fig. IV-2, Table IV-1).

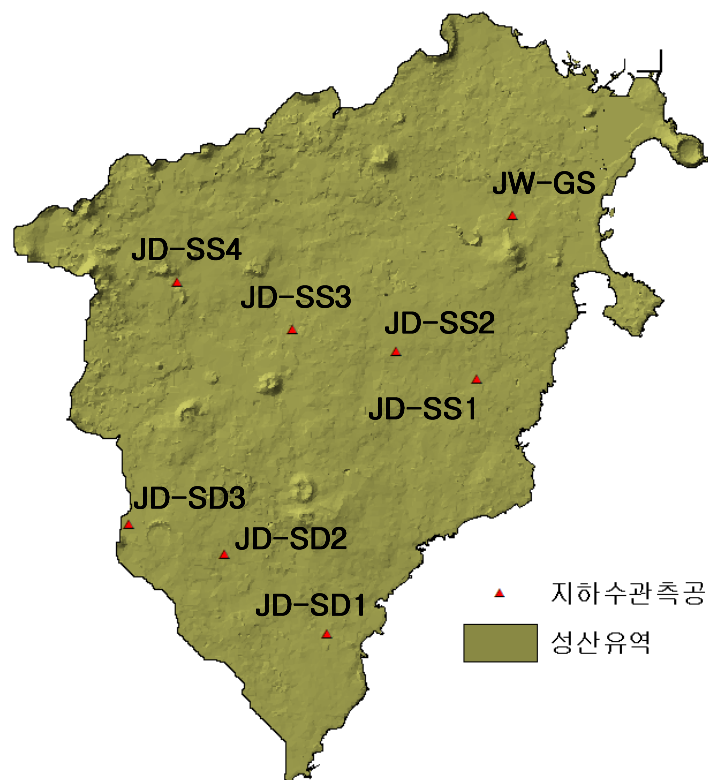


Fig. IV-2. Groundwater Observation Point

Table IV-1. Status of observation holes of the target region

NO.	Name	x	y	표고 (m)	심도 (m)	해안거리 (m)	지하수위 (GL.m)
1	JW-GS	183337	55033	28.24	41	1.633	0.990
2	JD-SS1	182664	53540	33.80	156	1.375	0.710
3	JD-SS2	180905	51386	70.60	200	3.090	0.950
4	JD-SS3	178703	48515	115.50	252	5.261	1.770
5	JD-SS4	189905	49454	176.60	330	7.547	2.180
6	JD-SD1	188747	49073	27.90	170	0.722	1.110
7	JD-SD2	186571	47403	90.20	200	3.361	1.780
8	JD-SD3	183574	47150	126.10	250	5.473	2.440

\* 지하수위 : 2013년 연평균 지하수위

## 2. 지하수 해석모형

현재 전세계적으로 이용되고 있는 3차원 지하수 유동 수치모델은 MODFLOW, FELOW, PM, MS-VMS, GW-VISTAS, ARGUS 등 여러 연구기관에서 개발된 다양한 프로그램이 있으나, 각 지역의 수리구조 및 현장의 특수여건에 따라 개발되었기 때문에 프로그램 분석 기능상 장·단점을 가지고 있다. 이중 가장 범용되는 프로그램은 MODFLOW로 이론의 과학적 타당성과 현장 적용성이 높은 것으로 인정되어 전 세계적으로 많이 사용되고 있다.

MODFLOW는 다공질 포화매체 내에서 지하수 흐름을 모의하기 위해 개발된 프로그램으로 편미분 방정식을 유한 차분법으로 이용하여 격자중심에 대하여 해석하며, 자유지하수면 및 피압지하수의 유동도 해석이 가능하고, 3차원 흐름해석이 가능하여 연직방향으로 여러개의 지층으로 구분할수 있다. 그러나 다공질 매체내에서 유동하는 유체는 온도와 밀도가 항상 일정한 것으로 가정하고, 해안지역에서 지하수의 과잉채수로 인한 염수의 침입현상을 모사하는 밀도류해석이나, 관정에 의해 오염된 지하수와 같은 다상유동체, 불연속성이 큰 파쇄매체 및 방향성이 일정하지 않은 지하수환경에 모형을 적용하기는 어려운 점이 있다.

MODFLOEW는 1983년 미국 지질조사국의 Michael Mcdonald와 Arlen Harbough에 의해 개발되었고, 1988년 최종 문서화 되었으며, 여러 연구자들을 통해 하천(Stream), 수직차수벽(HFB), 저투수성 세립 협재지층의 저유(Interbed Storage, IBS), BDF2와 PCG2의 여러종류의 Package를 개발하여 개선되었다. 이후 1997년 미국지질조사국에서는 MODFLOW프로그램을 수정하여 현재 MODFLOW모형으로 개발 보급되고 있다.

본 프로그램은 3차원 유한차분법을 통한 지하수 유동 모형으로 다양한 수리 지질학적 구조를 손쉽게 구현하여 모의할 수 있으며, 결과 또한 해석하기 간편하여 전 세계적으로 많은 연구자들이 사용하는 프로그램이다. 또한 지하수 흐름을 분석하기위해 개발된 프로그램으로 지하수 유체는 온도와 밀도가 항상 일정한 것으로 가정하고 있으며, 지하수 흐름 분석에 있어 우물, 강, 배수, 증발, 대수층 등 복잡한 경계조건의 영향을 고려할 수 있다. 특히, 지하수 펌핑, 물의 정화, 광산에서의 배수 등에 많이 이용되며, 법률적 문제 발생 시 신뢰성 높게 사용되는 모델이다. 본 모델은 포화대에서 지하수 유동을 모의하고, 지배방정식은 다음과 같은 3개의 가정으로부터 도출된다.

- 1) 모의 영역은 포화대이며 대수층은 다공성 매질로 변형되지 않는다.
- 2) 유체는 비압축(incompressible) 상태이다.
- 3) 지하수 시스템은 등은 조건아래 있다.

이에 따라, 연속방정식과 Darcy's의 법칙을 통하여 지하수의 유동방정식이 유도되고, 유한차분화하여 지하수 유동을 모의 한다.(식. 1.1)

$$\frac{S}{b} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} (K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j}) \pm Q \quad (1.1)$$

$K_{ij}$  : 수리전도도

$h$  : 동수두

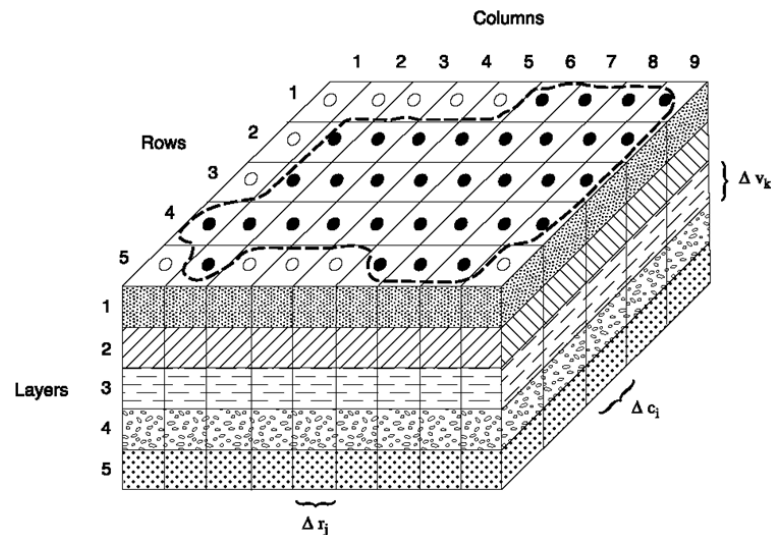
$Q$  : source&sink

$S$  : 저류계수

$b$  : 대수층 두께

시각적으로 판단하기 어려운 대수층 내의 유동시스템은 조건에 따라 시·공간적으로 변동 폭이 매우 심하고, 지하수 유동에 나타나는 특성인자들은 매우 다양하여 지하수 유동해석 시스템에 전체적으로 반영하기에는 매우 어렵다.

이에 따라 수치 해석적 방법으로 유한차분법을 이용할 수 있는데, 유한차분법은 지배방정식으로 부터 직접적으로 유한차분식을 유도하고 격자점과 격자점 사이의 관계에 pointwise approximation에 의한 방법으로 대수층 시스템을 cell block에 의해 공간적으로 도시한다(Fig. IV-3.).



- 대수층 경계 (Aquifer Boundary)
- 활성화 셀 (Active Cells)
- 비활성화 셀 (Inactive Cells)
- $\Delta r_j$  횡방향으로 배열된 셀의 크기 (j는 종방향 Cell 수)
- $\Delta c_i$  종방향으로 배열된 셀의 크기 (I는 횡방향 Cell 수)
- $\Delta v_k$  수직방향으로 배열된 셀의 크기 (k는 layer 수)

Fig. IV-3. Mimetic diagram of virtual aquifer

MODFLOW모형은 유한차분법을 근거로한 모델로 실제유역에서의 지하수 유동계를 파악하기 위해 사용되었으며, 일정한 밀도를 가지는 다공성매질을 통해

흐르는 3차원 지하수 유동은 불균질, 비등방성 매질에서의 비평형 상태하에서 지하수 흐름에 관한 편미분 방정식으로 나타낼 수 있다.(식. 1.2)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1.2)$$

$K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$  :  $x, y, z$  좌표축에 따른 투수계수

$h$  : 수두 (piezometric head)

$W$  : 단위체적당 유동으로서 시·공간 함수( $W = W(x, y, z, t)$ )

$S_s$  : 비저류율(specific storage)

$t$  : 시간

식 (1.2)로 표현되는 연속지하수 흐름시스템은 시·공간에 불연속점들의 유한집합에 의하여 교체되고 부분 도함수들은 이러한 점들의 수두차로 부터 계산된 항으로 교체되므로 해석적 값을 얻기가 거의 불가능하다. 본 연구에서는 지하수 유동에 대한 근사값을 얻기 위해 다양한 수치적 기법이 적용되므로 유한차분법을 이용하였다. 식 (1.2)의 경우 연속적인 선형 대수 차분방정식의 시스템으로 도입하게 되며, 그 해는 특정 시간과정에서의 수두를 제공한다. 이러한 값들은 흐름의 편미분 방정식의 해석적 해에 의해 주어지게 되는 시변계적인 수두분포에 대하여 근사치를 구성한다.

유한차분의 지하수 흐름방정식은 각 셀에 유입 및 유출에 대한 모든 흐름의 합은 셀의 내부에서 저울변화율에 대하여 같아야 한다는 연속 방정식으로 정의할 수 있으며, 지하수 밀도가 일정하다는 가정 하에 셀에 대한 흐름 평형은 연속 방정식으로 나타낼 수 있다.(식. 1.3)

$$\sum Q_i = SS \frac{\Delta h}{\Delta V} \quad (1.3)$$

$Q$  : 셀 유입 흐름율 (L<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>)

$SS$  : 유한차분 형태의 비저류율(L<sup>-1</sup>)

$V$  : 셀 체적 (L<sup>3</sup>)

$h$  : 수두변화량

Fig. IV-4은 Block과 Point의 중심격자 시스템의 차이를 도시한 것이며, Fig. IV-5는  $i, j, k$ 셀과 인접한 6개의 셀( $i-1, j, k-1, j, k+1$ )로 나타내었다.

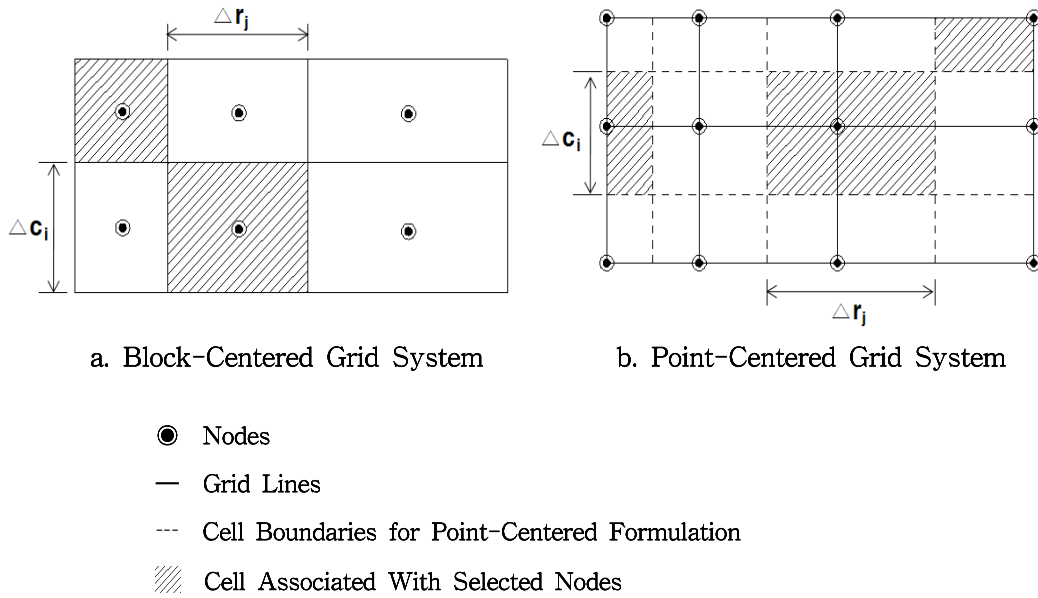


Fig. IV-4. Block-centered grid and point-centered grid system

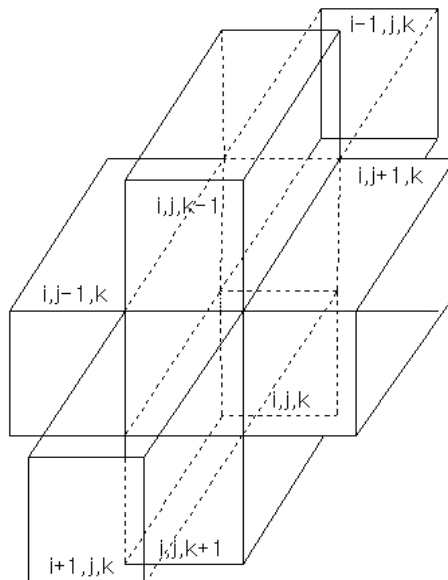


Fig. IV-5. Isometric drawing of core  $i, j, k$  cell and 6 nearby cells



$i, j, k$ 의 셀로부터 수평적인 셀( $i, j-1, k$ )로 이동하는 지하수흐름은 Darcy의 법칙에 의하여 식 (1.4)으로 나타낼 수 있으며, Fig. IV-6로 표현될 수 있다.

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta C_i \Delta V_k \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-1/2}} \quad (1.4)$$

$h_{i,j,k}$  : 절점  $i, j, k$ 에서의 수두

$h_{i,j-1,k}$  : 절점  $i, j-1, k$ 에서의 수두

$q_{i,j-1/2,k}$  :  $i, j, k$ 와  $i, j-1, k$ 사이 면을 통과하는 유출량

$KR_{i,j-1/2,k}$  : 절점  $i, j, k$ 와  $i, j-1, k$ 사이의 수평투수계수

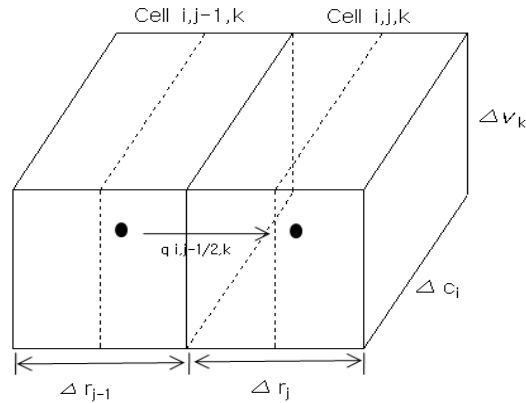


Fig. IV-6. Groundwater flow from ( $i, j, k$ ) cell to ( $i, j-1, k$ ) cell

$i, j, k$ 셀과  $i, j+1, k$ 셀 사이의 수평적 흐름, 연직방향에 대한 전면과 후면 통한 Block으로의 흐름, 연직방향에 대한 상부와 하단면을 통한 흐름은 다음과 같다.(식. 1.5~1.9)

$$q_{i+1/2,j,k} = KR_{i+1/2,j,k} \Delta C_i \Delta V_k \frac{(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{i+1/2}} \quad (1.5)$$

$$q_{i+1/2,j,k} = KC_{i+1/2,j,k} \Delta r_j \Delta V_k \frac{(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta C_{i+1/2}} \quad (1.6)$$

$$q_{i-1/2,j,k} = KC_{i-1/2,j,k} \Delta r_j \Delta V_k \frac{(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta C_{i-1/2}} \quad (1.7)$$

$$q_{i,j,k+1/2} = KV_{i,j,k+1/2} \Delta r_j \Delta V_k \frac{(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k})}{\Delta V_{k+1/2}} \quad (1.8)$$

$$q_{i,j,k-1/2} = KV_{i,j,k-1/2} \Delta r_j \Delta C_i \frac{(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k})}{\Delta V_{k-1/2}} \quad (1.9)$$

식 (1.5~1.9)은 수두와 격자차원 및 투수계수의 항에 셀  $i, j, k$ 의 면으로 통하는 흐름을 나타냄으로 격자차원과 투수계수를 하나의 상수로 표현할 수 있다. (식. 1.10)

$$CR_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta C_i \Delta V_k / \Delta r_{j-1/2} \quad (1.10)$$

$CR_{i,j-1/2,k}$ 는 절점  $i, j-1, k$ 와  $i, j, k$ 사이의 열( $i$ )과 층( $k$ )의 투수량으로, 식 (1.10)을 식 (1.4)로 치환하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.(식. 1.11)

$$q_{i,j-1/2,k} = CR_{i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) \quad (1.11)$$

이에 따라 식 (1.5~1.9)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.(식. 1.12~1.16)

$$q_{i,j+1/2,k} = CR_{i,j+1/2,k} (h_{i,j+1,k} + h_{i,j,k}) \quad (1.12)$$

$$q_{i-1/2,j,k} = CR_{i-1/2,j,k} (h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \quad (1.13)$$

$$q_{i+1/2,j,k} = CR_{i+1/2,j,k} (h_{i+1,j,k} + h_{i,j,k}) \quad (1.14)$$

$$q_{i,j,k-1/2} = CR_{i,j,k-1/2} (h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) \quad (1.15)$$

$$q_{i,j,k+1/2} = CR_{i,j,k+1/2} (h_{i,j,k+1} + h_{i,j,k}) \quad (1.16)$$

여기서, 투수량은 식(1.10)의  $CR_{i,j-1/2,k}$ 을 사용할 수 있으며, 식 (1.12~1.16)은 6개의 인접한 셀에서 부터 셀  $i, j, k$ 로 흐름을 나타낸다. 증발산이나 우물,

배수구 지역함량 등 외부에서 대수층으로 유입되는 흐름에 대해 형상에서 과정까지 밝히기 위해서 부가적인 항들이 요구된다. 이러한 흐름은 유입 셀의 수두에 의존하고, 대수층의 다른 모든 수두에 대해서는 독립적이거나 전적으로 유입 셀의 수두에 대해 독립적일 수 있으며, 외부로부터 대수층의 흐름은 다음과 같다. (식. 1.17)

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + q_{i,j,k,n} \quad (1.17)$$

$a_{i,j,k,n}$ 는 셀  $i, j, k$ 로 유입되는  $n$ 번째 외부수원으로부터 흐름을 나타내고,  $p_{i,j,k,n}$ 와  $q_{i,j,k,n}$ 는 각각 상수로 나타낼 수 있으며, 하나의 셀이 우물과 하천을 통해 함양되면 우물로부터의 흐름은 수두에 의존하지 않는 것으로 가정하여  $p_{i,j,k,n}$ 는 0으로  $q_{i,j,k,n}$ 는 우물에 대한 함양률이 된다.(식. 1.18)

$$a_{i,j,k,1} = q_{i,j,k,1} \quad (1.18)$$

하천과 대수층이 연결된 경우 침투( $n=2$ )에 대한 함양은 다음의 식으로 해석한다.(식. 1.19)

$$a_{i,j,k,2} = CRIV_{i,j,k,2} (R_{i,j,k} - h_{i,j,k}) \quad (1.19)$$

$R_{i,j,k}$  : 하천의 수위

$CRIV_{i,j,k,2}$  : 하천으로부터  $i, j, k$ 셀에 유입되는 하상의 수리전도도계수

$CRIV$ 는 하상의 수직적 수리전도도로 식(1.19)는 다음과 같이 정리된다.(식. 1.20)

$$a_{i,j,k,2} = -CRIV_{i,j,k,2} h_{i,j,k} + CRIV_{i,j,k,2} R_{i,j,k} \quad (1.20)$$

여기서, 하나의 셀에 영향을 미치는 N개의 외부 유원이나 응력이 있다면 조합과 흐름(combined flow)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.(식. 1.21)

$$QS_{i,j,k} = \sum_{n=1}^n a_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^n p_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + \sum_{n=1}^n q_{i,j,k,n} \quad (1.21)$$

여기서,  $P_{i,j,k} = \sum_{n=1}^n p_{i,j,k,n}$  이고,  $Q_{i,j,k} = \sum_{n=1}^n q_{i,j,k,n}$  이다. 셀  $i, j, k$ 에 대한 외부의 흐름은 다음과 같이 정리할 수 있다.(식. 1.22)

$$QS_{i,j,k} = p_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} \quad (1.22)$$

외부 흐름을 QS와 6개의 인접한 셀 흐름으로부터 식(2.15)을 셀  $i, j, k$ 에 적용하면 지하수 유동은 다음과 같다.(식. 1.23)

$$\begin{aligned} q_{i,j-1,k} + q_{i,j+1/2,k} + q_{i-1/2,j,k} + q_{i+1/2,j,k} + q_{i,j,k-1/2} + q_{i,j,k+1/2} + QS_{i,j,k} \\ = SS_{i,j,k} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \end{aligned} \quad (1.23)$$

여기서,  $\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}$ 는 수두 도함수에 대한 유한차분근사를 나타내고 있으며,  $SS_{i,j,k}$ 는 셀  $i, j, k$ 의 비저류계수를 나타내고  $\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$ 는 셀  $i, j, k$ 의 체적으로 나타낸다. 식(1.12~1.16) 및 (1.23)은 셀  $i, j, k$ 에 대한 유한차분근사를 위해 다음과 같이 나타낼 수 있다.(식. 1.24)

$$\begin{aligned} CR_{i,j-1/2,k}(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) + CR_{i,j+1/2,k}(h_{i,j+1,k} + h_{i,j,k}) \\ + CC_{i-1/2,j,k}(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) + CC_{i+1/2,j,k}(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) \\ + CV_{i,j,k-1/2}(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k+1/2}(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \\ + P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \Delta h_{i,j,k} / \Delta t \end{aligned} \quad (1.24)$$

$t_m$ 은 식(1.24)의 흐름항에서 구해지는 시간으로, 시간에서의 수두의 시간도합 수에 대한 근사는 수두차  $h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}$ 를 시간간격  $t_m - t_{m-1}$ 로 나누어 주면 다음과 같이 나타난다.(식 1.25)

$$\left(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}\right)^m = \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \quad (1.25)$$

여기서, 지하수 흐름에 대한 편미분 방정식을 후방차분 방정식으로 사용하여 지하수 유동식을 나타내면 다음과 같다.(식. 1.26)

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k}(h^{m_{i,j-1,k}} - h^{m_{i,j,k}}) + CR_{i,j+1/2,k}(h^{m_{i,j+1,k}} - h^{m_{i,j,k}}) \\ & + CC_{i-1/2,j,k}(h^{m_{i-1,j,k}} - h^{m_{i,j,k}}) + CC_{i+1/2,j,k}(h^{m_{i+1,j,k}} - h^{m_{i,j,k}}) \\ & + CV_{i,j,k-1/2}(h^{m_{i,j,k-1}} - h^{m_{i,j,k}}) + CV_{i,j,k+1/2}(h^{m_{i,j,k+1}} - h^{m_{i,j,k}}) \\ & + P_{i,j,k}h^{m_{i,j,k}} + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k}(\Delta r \Delta c \Delta v_k) \frac{(h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1})}{t_m - t_{m-1}} \end{aligned} \quad (1.26)$$

현 시간단계의 끝에서 수두를 포함하는 모든 조건들(terms)을 방정식의 좌측항 그리고 현 시간단계의 끝에서 수두에 독립하는 모든 항을 우측항으로 분류하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.(식. 1.27)

$$\begin{aligned} & CV_{i,j,k-1/2}h_{i,j,k-1}^m + CC_{i-1/2,j,k}h_{i-1,j,k}^m + CR_{i,j-1/2,k}h_{i,j-1,k}^m \\ & + (-CV_{i,j,k-1/2} - CC_{i-1/2,j,k} - CR_{i,j-1/2,k} - CR_{i,j+1/2,k} \\ & - CC_{i+1/2,j,k} - CV_{i,j,k+1/2} + HCOF_{i,j,k})h_{i,j,k}^m + CR_{i,j+1/2,k}h_{i,j+1,k}^m \\ & + CC_{i+1/2,j,k}h_{i+1,j,k}^m + CV_{i,j,k+1/2}h_{i,j,k+1}^m = RHS_{i,j,k} \end{aligned} \quad (1.27)$$

$$HCOF_{i,j,k} = P_{i,j,k} - SCI_{i,j,k} / (t_m - t_{m-1})$$

$$RHS_{i,j,k} = -Q_{i,j,k} - SCI_{i,j,k} h_{i,j,k}^{m-1} / (t_m - t_{m-1}); \text{ and } (L^3 t^{-1})$$

$$SCI_{i,j,k} = SS_{i,j,k} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$$

식 (1.4)을 완전 음해법으로 차분화하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & K_{xx} \text{ }_{i, h+1/2, k} \cdot (h_{i, j+l, k} - h_{i, j, k}) / \Delta x_j^2 - K_{xx} \text{ }_{i, j-1/2, k} \cdot (h_{i, j, k} - h_{i, j-l, k}) / \Delta x_j^2 \\ & - K_{yy} \text{ }_{i+1/2, j, k} \cdot (h_{i+l, j, k} - h_{i, j, k}) / \Delta y_i^2 - K_{yy} \text{ }_{i-1/2, j, k} \cdot (h_{i, j, k} - h_{i-l, j, k}) / \Delta y_i^2 \\ & - K_{zz} \text{ }_{i, j, k+1/2} \cdot (h_{i, j, k+1} - h_{i, j, k}) / \Delta z_k^2 - K_{zz} \text{ }_{i, j, k-1/2} \cdot (h_{i, j, k} - h_{i, j, k-1}) / \Delta z_k^2 \\ & - W_{i, j, k} = S_{si, j, k} \cdot (h_{i, j, k} - h_{i, j, k}) / \Delta t \end{aligned} \quad (1.28)$$

$\Delta x_j \Delta y_i \Delta z_k$  :  $x(j), y(i), z(k)$  격자점 간의 간격

$h_{ijk}$  : 수리수두의 계산치

$h_{i,j,k}$  : 한 단계 전의 수리수두

$\Delta t$  : 시간간격

$i, j, k$  :  $x, y, z$  좌표의 지수

이에 따라, 식(1.10)을 정리하여 재배열하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & Z_{i,j,k} h_{i,j,k-1} + B_{i,j,k} h_{i-l,j,k} + D_{i,j,k} h_{i,j-l,k} + E_{i,j,k} h_{i,j,k} + F_{i,j,k} h_{i,j+l,k} \\ & + H_{i,j,k} h_{l,j,k} + S_{i,j,k} h_{i,j,k+1} = Q_{i,j,k} \end{aligned} \quad (1.29)$$

$$\text{여기서, } Z_{i,j,k} = 2K_{zzi,j,k} \cdot k_{zzi,j,k-1} / (k_{zzi,j,k} \Delta Z_{k-1} + k_{zzi,j,k-1} \Delta z_k) / \Delta z_k$$

$$B_{i,j,k} = 2k_{zzi,j,k} \cdot K_{yyi-l,j,k} / (K_{yyi,j,k} \Delta Y_{i-1} + K_{yyi-l,j,k} \Delta y_i) / \Delta y_i$$

$$D_{i,j,k} = 2K_{xxi,j,k} \cdot K_{xxi,j-l,k} / (K_{xxi,j,k} \Delta x_{j-1} + K_{xxi,j-l,k} \Delta x_j) / \Delta x_j$$

$$F_{i,j,k} = 2K_{xxi,j,k} \cdot K_{xxi,j-l,k} / (K_{xxi,j,k} \Delta Z_{j+1} + K_{xxi,j-l,k} \Delta x_j) / \Delta x_j$$

$$H_{i,j,k} = 2K_{yyi,j,k} \cdot K_{yyi-i,j,k} / (K_{yyi,j,k} \Delta y_{i+1} + K_{yyi+l,j,k} \Delta y_i) / \Delta y_i$$

$$S_{i,j,k} = 2K_{zzi,j,k+1} \cdot K_{zzi,j,k} / (K_{zzi,j,k} \Delta z_{k+1} + K_{zzi,j,k} \Delta z_k) / \Delta z_k$$

$$E_{i,j,k} = -(B_{i,j,k} + D_{i,j,k} + F_{i,j,k} + H_{i,j,k} + S_{i,j,k} + Z_{i,j,k} + S_{si,j,k} / \Delta t)$$

$Q_{i,j,k} = W_{i,j,k} - (S_{si,j,k}/\Delta t)h_{i,j,k}$  로 격자 내 각 변의 수두 셀(cell)에 대한 식을 매트릭스 형태로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[A]\{h\} = \{q\} \quad (1.30)$$

$[A]$  : 격자내 수두계수에 대한 매트릭스

$\{h\}$  : 격자내 모든 교점에 대해 시간간격  $m$ 의 마지막 수두벡터값

$\{q\}$  : 격자의 모든 교점에 대한 현 조건들의 벡터값

계산의 가속화를 위해 조정행렬  $[M]$ 을 고려하여 양변에  $[M]\{h\}$ 를 더하면 식 (1.30)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[A+M]\{h\} = \{q\} + [M]\{h\} \quad (1.31)$$

이때  $[A+M]$ 의 인자가 구해져 있으므로 식 (1.31)에서 우변의 기지이면 해를 얻을 수 있고, 식 (1.31)을 반복적으로 나타내면 다음과 같다.

$$[A+M]\{h\}^n = \{q\} + [M]^n \quad (1.32)$$

이 식에서  $n$ 은 반복지수로, 계산중의 반올림 오차를 줄여 정도를 유지하기 위하여 식 (1.32)의 우변에  $[A+M]\{h\}^{n1}$ 을 +하고, -하여 잉여형으로 표시하면 다음과 같이 나타낸다.

$$[A+M]\{\xi\}^n = \{R\}^{n1} \quad (1.33)$$

$\{\xi\} = \{h\}^{n1}$ ,  $\{R\}^{n1} = \{q\} - [A]\{h\}^{n1}$ 로, 수속판별계수( $\epsilon$ )보다  $\xi^{n \max}$ 가 적을 때 해가 얻어지며, 지하수유동해석에 있어 가장 빠른 수렴을 가져오는 기법 중의 하나인 Strongly Implicit procedure(SIP)의 기본방정식이다.

본 연구에 사용된 MODFLOW모형은 사용하기 간편하여 규모가 수리지질학적 문제를 해결하기 위해 처리 분석 및 유지하는데 매우 유용하다. 또한 주프로그램과 여러 가지의 모듈(서브루틴-subroutine)을 갖추고 있으며, 이 모듈들은 패키지로 (Package) 구성된다. 각각의 Package는 하천이나 배수등과 같은 특정한 수리지질학적 특성인자를 PCG(Preconditioned Conjugate Gradient), SIP (Strongly Implicit Procedure), SOR(Successive Over Relaxation)등과 같은 방법을 통해 지하수 유동을 선형방정식으로 다루고 있다. 유동성분의 Package는 BAS(basic), BCF(Block-Centered Flow), 우물(Well), 함양(Recharge), 강(River), 배수(Drain), 증발산(Evapotranspiration)등의 Package로 구성되어 있다.

BCF package는 대수층의 수리매개변수를 파악하여 어떠한 성질의 대수층인지 지정하고, 다공질매체 내에서 지하수 유동 지배방정식을 계산하며, cell × cell의 유동, storage에의 유동을 계산한다. Well package는 지하수관정에 대한 위치, 양수량 등을 입력하고 유동 상황을 모의하며, 지하수 관정의 영향을 유한차분식에 하나의 항으로 입력하여 계산된다. 격자내부에 위치한 지하수 관정은 항상 격자중앙에서 양수가 이루어지는 것으로 계산된다. RCH package는 지하수 함양량에 대한 자료를 입력하고, 실제 입력하는 것은 함양율(recharge rate)이다. 이는 각 격자에 함양되는 양은 함양율에 넓이를 곱한 값이 할당되며, 이 또한 유한차분식에 하나의 항으로 추가시킨다. PCG2 package는 선형 및 비선형의 미분방정식으로 나타나는 유동방정식을 계산하는데 사용되며, 두 개의 preconditioning 조건을 갖춘다. 하나는 다항식을 이용하고, 하나는 불완전한 Cholesky방법을 이용하며 비선형 문제의 경우에 Picard반복법을 이용한다. 이외 BAS package는 layer수, 격자수, 시간단위 등 모형의 전반적인 구조를 취급하고, River package는 하천경계조건, Drain package는 배수관, Evapotranspiration package는 증발산을 모의하는데 사용된다. 흐름성분의 package는 각 cell에 대해 유한차분의 계수를 계산하는 역할을 하며, 각각의 스트레스 package는 특정한 경계 흐름을 설명하는 계수를 공식화한다.



Table IV-2. MODFLOW Main Package

구분	약어	목적	분류
Basic	BAS	Handles those tasks that are part of the model as a whole. Among those tasks are specification of boundaries, determination of time- step length, establishment of initial conditions, and printing of results.	Flow Component Packages
Block-centered flow	BCF	Calculates terms of finite- difference equations which represent flow within porous medium: specifically, flow from cell to cell and flow into storage.	
Well	WEL	Adds terms representing flow to wells to the finite-difference equations.	
Recharge	RCH	Adds terms representing areally distributed recharge to the finite-difference equation.	
River	RIV	Adds terms representing flow to rivers to the finite-difference equations.	
Drain	DRN	Adds terms representing flow to drains to the finite-difference equations.	
Ecapotran-spiration	EVT	Adds terms representing flow to ET to the finite-difference equations	

## V. 결과 및 고찰

### 1. 지하수 해석 모형구축

지하수문체계는 매우 복잡한 구조와 특성을 갖고 있다. 지하수의 함양량 및 대수층 수리특성 등은 불확실적인 요소로 여러 연구방법을 통하여 관측지점의 값과 모델의 계산 값을 서로 비교하며 적절한 범위 내에서 산정되어야 한다.

본 연구에서는 지하수 모형구축을 위해 MODFLOW모형을 사용하였으며, 지층, 관측공, 함양량, 수리전도도 등 기초자료를 파악하여 입력하였다.

모의 영역의 1층은 투수성이 매우 양호한 화산암층으로 제주도의 총 16개 구역 중 연구대상지역이 위치한 성산유역의 지층구조를 파악하기위해 수치지형도를 이용하여 제주도 전체 현무암층의 수치고도자료(DEM)로 보간(interpolation)하여 Fig. V-1과 같이 실제 수직적인 층을 재현하였다.

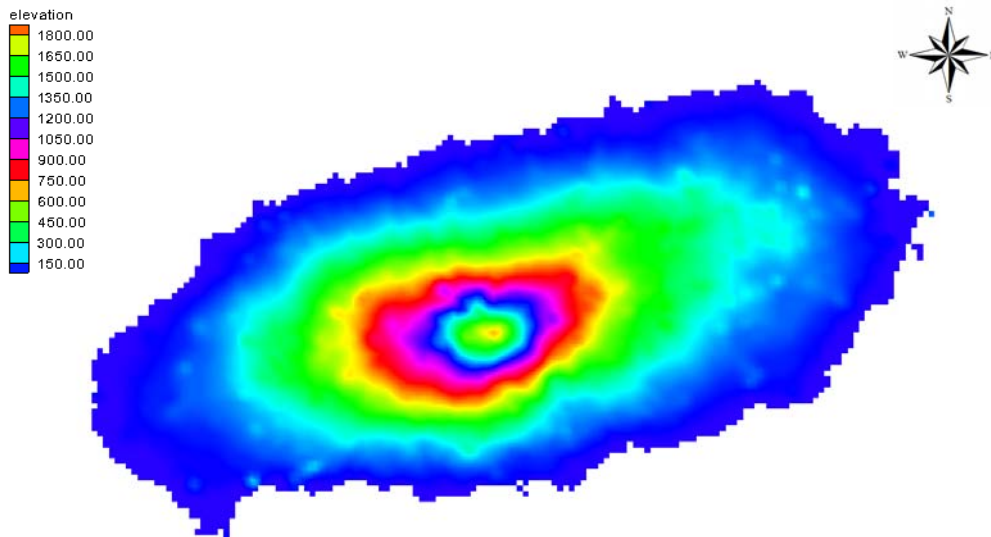


Fig. V-1. Digital elevation model for the top part (volcanic rock layer) of Jeju-do

모의 영역의 2층은 투수성 및 공극이 저조한 기반암, U층 및 서귀포층을 저투수층으로 포착심도를 고려하여 설정하였다. 기존 제주도 하부 지층에 대하여 연구 및 발표된 Ko(1997, 2005, 2013)와 Park(2008)등의 자료를 참고하였으나 본 연구에서는 저투수층을 하나의 단일층으로 단순화하기위해 ‘제주화산암층 수리지질학적 특성연구’(Kim, 2011) 논문과 ‘2012지질주상도 자료집(제주특별자치도 수자원본부)’의 지질주상도 자료를 참고하여 제주도 하부 지층의 저투수층 출현심도에 대하여 파악 하였다(Fig. V-2).

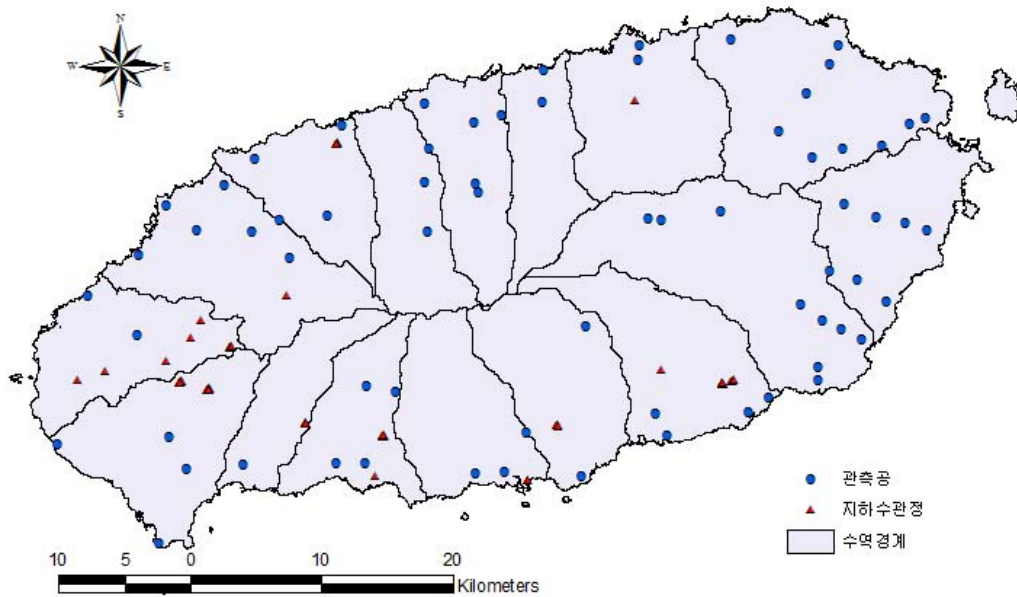


Fig. V-2. Low Permeability Depth Check Point

총 141개소(관측공 68개소, 지하수관정 73개소)관정에서 저투수층 심도 확인이 가능하였고, 해수면기준 180m~-140m로 조사되었으며, 기존 Ko(2013)등이 연구한 서귀포층 출현 심도와 대체적으로 유사하게 파악되었으나, Tuff층 및 U층이 확인 되는 지점에는 부분적으로 다르게 파악되었다(Fig. V-3, Table V-1).

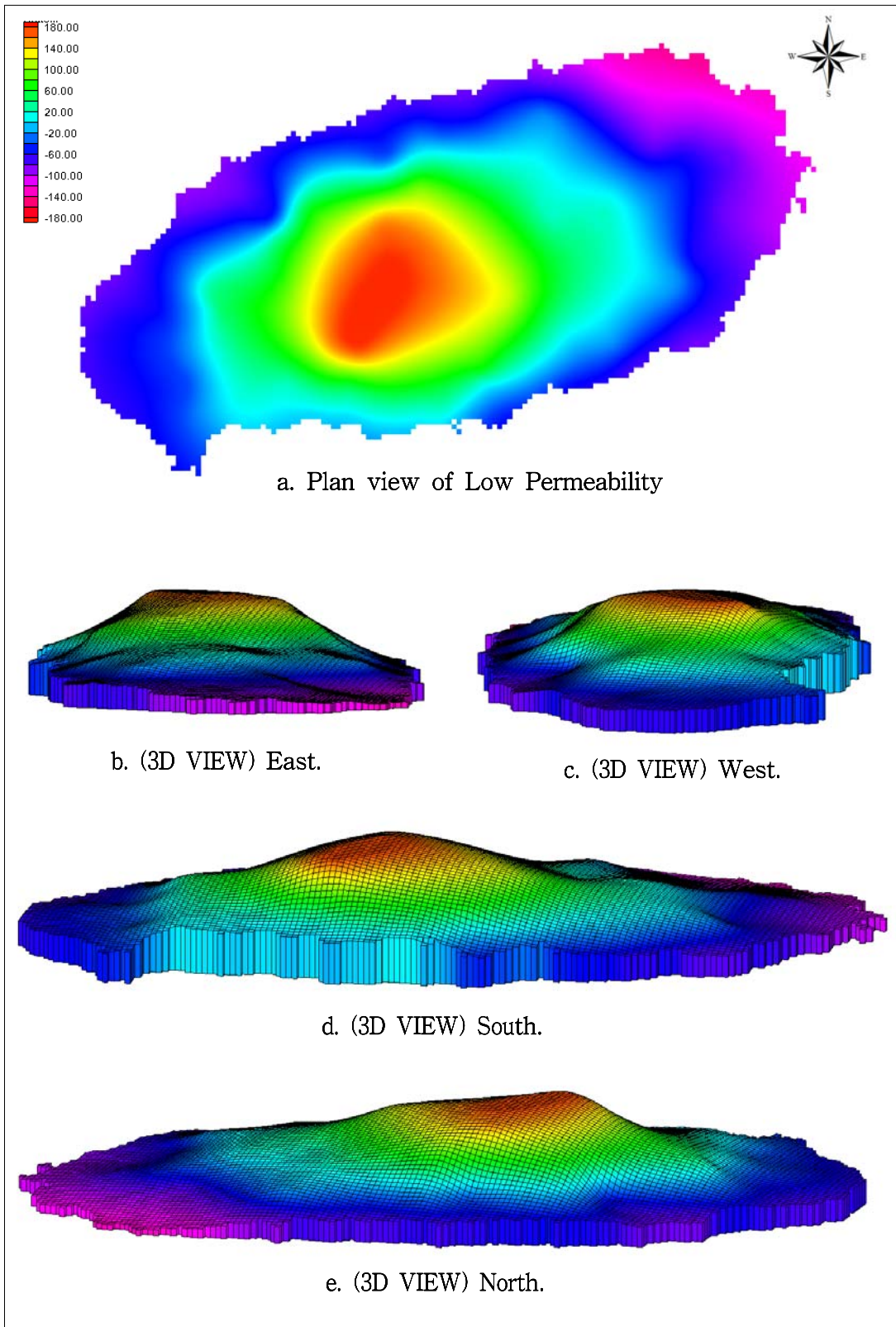


Fig. V-3. Jeju-do Plan View of Low Permeability and 3D Grid

Table V-1. Depth of low permeable layer and groundwater wells for observation

NO.	Name	x	y	Level(m)	Low Permeability (GL.m)	Low Permeability (EL.m)
1	JD-HD1	183337	55033	15.10	153.50	-138.4
2	JD-HD2	182664	53540	42.30	161.00	-118.7
3	JD-HD3	180905	51386	112.40	217.60	-105.2
4	JD-HD4	178703	48515	190.50	281.00	-90.5
5	JD-JD1	189905	49454	14.40	123.50	-109.1
6	JD-JD2	188747	49073	52.70	167.00	-114.3
7	JD-JD3	186571	47403	100.40	179.00	-78.6
8	JD-JD4	183574	47150	167.50	240.00	-72.5
9	JD-JD5	181309	46491	201.30	246.00	-44.7
10	JD-SS1	190057	40931	33.80	134.70	-100.9
11	JD-SS2	188355	41502	70.60	160.80	-90.2
12	JD-SS3	186143	41964	115.50	201.20	-85.7
13	JD-SS4	183688	42964	176.60	245.20	-68.6
14	JD-SD1	186886	35516	27.90	100.00	-72.1
15	JD-SD2	184690	37202	90.20	157.00	-66.8
16	JD-SD3	182673	37829	126.10	194.00	-67.9
17	JD-HC1	185063	32652	25.70	91.00	-65.3
18	JD-HC2	183480	33475	58.80	119.50	-60.7
19	JD-HC3	182073	34175	87.40	126.00	-38.6
20	JD-HC4	180387	35310	117.90	123.50	-5.6
21	NM-JC	174337	42416	342.60	323.00	19.6
22	GA1*	137009	32158	310.80	253.70	57.1
23	GA2*	136974	32111	311.30	254.30	57
24	GA3*	136934	32066	311.70	253.40	58.3
25	GA4*	136984	32005	312.20	264.00	48.2
26	GA5*	137016	32056	311.50	261.00	50.5
27	GA6*	137044	32110	311.30	258.00	53.3
28	JE1*	133052	29343	153.50	166.00	-12.5
29	JE2*	133120	29364	153.72	156.00	-2.28
30	JE3*	133159	29349	153.77	166.50	-12.73
31	JE4*	133205	29381	154.41	166.50	-12.09
32	JE5*	133247	29425	155.25	170.10	-14.85
33	JE6*	133288	29467	155.50	164.00	-8.5
34	JE7*	133233	29488	155.50	166.20	-10.7
35	JE8*	133178	29470	155.50	168.00	-12.5
36	JE9*	133142	29422	154.30	167.30	-13
37	JE10*	133094	29384	153.50	168.50	-15
38	SE1*	135358	28862	183.70	165.50	18.2
39	SE2*	135376	28912	186.70	174.00	12.7
40	SE3*	135380	28956	187.40	170.00	17.4

표 계속

NO.	Name	x	y	Level(m)	Low Permeability (GL.m)	Low Permeability (EL.m)
41	SE4*	135331	28960	188.90	174.00	14.9
42	SE5*	135287	28959	188.90	176.00	12.9
43	SE6*	135278	28906	185.70	178.00	7.7
44	SE7*	135271	28852	184.90	167.50	17.4
45	SE8*	135218	28840	178.00	166.00	12
46	SE9*	135312	28779	181.80	168.00	13.8
47	SE10*	135333	28819	181.80	176.00	5.8
48	BB2*	125349	29589	43.00	101.50	-58.5
49	BB3*	127387	30235	76.10	127.00	-50.9
50	BB5*	132032	31080	138.20	170.20	-32
51	BB6*	134000	32845	210.00	213.00	-3
52	BB7*	134722	34090	242.00	203.00	39
53	ELCC5*	141231	36023	482.00	425.00	57
54	SY1*	142672	26254	249.50	226.00	23.5
55	SY2*	142731	26256	251.10	215.00	36.1
56	SY3*	142751	26312	251.40	215.00	36.4
57	SY4*	142702	26347	251.00	213.00	38
58	SY5*	142653	26311	250.10	212.00	38.1
59	SY6*	142702	26300	250.80	208.00	42.8
60	HS1*	148575	25325	218.48	157.00	61.48
61	HS2*	148639	25290	217.28	172.60	44.68
62	HS3*	148691	25309	220.24	174.10	46.14
63	HS4*	148703	25360	224.29	168.00	56.29
64	HS5*	148646	25347	222.23	150.00	72.23
65	HS6*	148598	25372	221.82	179.00	42.82
66	JG1*	159617	21937	13.43	29.00	-15.57
67	JG2*	159626	21948	13.31	30.50	-17.19
68	JG3*	159637	21960	13.90	30.00	-16.1
69	JG4*	159646	21970	15.17	31.00	-15.83
70	TP1*	161902	26197	164.90	106.00	58.9
71	TP2*	161840	26195	165.50	117.00	48.5
72	TP3*	161857	26129	162.33	127.00	35.33
73	TP4*	161920	26101	161.90	145.00	16.9
74	EK(1)1*	175242	29466	68.80	99.00	-30.2
75	EK(1)2*	175188	29444	69.36	99.50	-30.14
76	EK(1)3*	175162	29496	71.65	98.00	-26.35
77	EK(1)4*	175233	29528	70.08	105.00	-34.92
78	EK(1)5*	175334	29548	68.59	91.00	-22.41
79	EK(1)6*	175280	29554	69.45	104.00	-34.55
80	EK(2)1*	174455	29382	73.49	84.00	-10.51

표 계속

NO.	Name	x	y	Level(m)	Low Permeability (GL.m)	Low Permeability (EL.m)
81	EK(2)2*	174500	29308	74.00	89.50	-15.5
82	EK(2)3*	174449	29283	74.30	90.00	-15.7
83	EK(2)4*	174407	29309	74.17	88.00	-13.83
84	EK(2)5*	174405	29361	74.13	90.00	-15.87
85	EK(2)6*	174457	29332	73.75	88.00	-14.25
86	JH중문3	147319	29157	550.00	380.00	170
87	JH신례2	164098	33663	595.00	470.00	125
88	JD위미1	170257	25405	22.20	78.00	-55.8
89	JD위미2	169325	27086	76.70	94.50	-17.8
90	F-116*	148011	22328	68.00	73.00	-5
91	F-388*	169804	30414	193.00	183.50	9.5
92	MW1*	149554	28708	582.00	400.00	182
93	SK1*	145099	47591	49.74	88.00	-38.26
94	SK2*	145146	47596	54.75	96.00	-41.25
95	SK3*	145144	47546	56.42	95.00	-38.58
96	SK4*	145115	47501	56.88	94.00	-37.12
97	SK5*	145069	47504	55.46	95.00	-39.54
98	SK6*	145078	47550	50.95	87.00	-36.05
99	JD용담1	151760	50627	38.20	101.00	-62.8
100	JD용담2	152131	47165	161.90	210.00	-48.1
101	NM노형	151786	44577	271.17	226.00	45.17
102	JH어승생	152031	40908	615.15	452.00	163.15
103	JD삼양1	160824	53112	10.20	90.00	-79.8
104	JD삼양2	160760	50658	75.10	132.00	-56.9
105	JD함덕1	168171	54978	21.10	113.00	-91.9
106	JD함덕2	167976	53922	17.00	95.00	-78
107	F-165	167831	50784	140.00	151.00	-11
108	JM안성	133608	22819	42.20	64.00	-21.8
109	JR신흥1	177952	28256	15.69	86.00	-70.31
110	JR태흥1	176443	27133	15.93	88.50	-72.57
111	JR하귀1	145468	48942	12.98	78.00	-65.02
112	NM동홍	159565	25578	188.00	143.00	45
113	JD한림1	132128	42825	14.00	104.00	-90
114	JD한림2	134461	41014	57.00	125.00	-68
115	JH교래2	169791	41758	429.46	410.00	19.46
116	JH교래1	168797	41823	430.00	421.00	9
117	JD판포1	126104	35998	12.00	92.00	-80
118	JR어음1	136502	44355	60.00	150.00	-90
119	JR장전2	144366	42128	312.50	250.00	62.5
120	JR상가1	138840	46395	50.00	114.00	-64

표 계속



NO.	Name	x	y	Level(m)	Low Permeability (GL.m)	Low Permeability (EL.m)
121	JM도남2	155552	49138	87.00	112.00	-25
122	JD하모	131516	17187	8.00	66.00	-58
123	JD신도	123775	24684	10.00	80.20	-70.2
124	JR서광1	132286	25295	60.00	107.00	-47
125	JR어음2	138634	40885	189.00	237.40	-48.4
126	JR상가3	140756	41717	250.00	329.00	-79
127	JR어음3	141520	38875	415.00	370.00	45
128	JD협재	129945	39118	12.50	75.00	-62.5
129	JD김녕2	175136	55416	36.40	162.00	-125.6
130	JD간드락	157684	49744	112.10	159.00	-46.9
131	JIo등4	155600	44475	330.00	235.00	95
132	JIo등5	155888	43882	370.00	268.00	102
133	JD하효	163735	22280	11.00	65.00	-54
134	JD세화1	181774	29550	22.69	102.00	-79.31
135	JD세화2	181760	30614	57.46	131.00	-73.54
136	JD서호	155598	22524	68.95	61.00	7.95
137	JD판포2	129916	33042	105.00	165.00	-60
138	JW중문2	144976	23327	100.08	95.50	4.58
139	JW하논	157910	22605	56.48	40.00	16.477
140	JW중문1	147251	23276	113.17	101.00	12.17
141	JW화순2	137960	23163	67.30	51.00	16.3

\*. 자료참고: 제주도 화산암층의 수리지질학적 특성연구 (Kim, 2011)



제주도의 지층을 2개의 층으로 단순화 하여 파악한 결과를 통해 본 연구대상 지역인 성산유역을 수치고도자료(DEM)로 보간하여 실제 수직적인 층을 재현하였다(Fig. V-4).

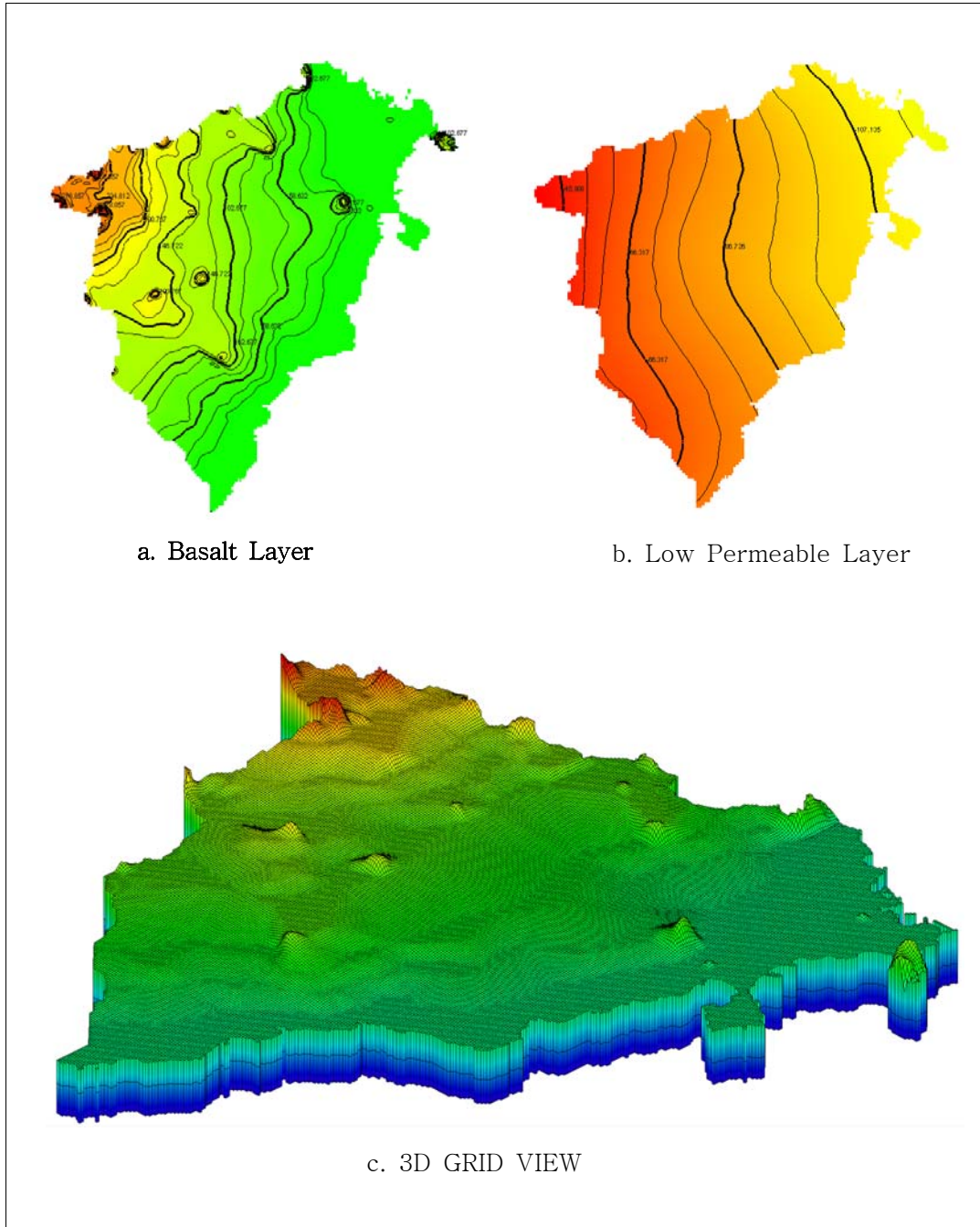


Fig. V-4. Basalt and Low Permeable Layer in Sung-san Basin

성산유역내 격자망 구성은 50m X 50m로 설정하였고, 대상유역을 제외한 지역은 비활성화 셀(Inactive Cells)로 구분하였으며, 활성화 셀(Active Cells)은 2개의 layer를 포함하여 93,236개의 셀격자망으로 구성되었다(Fig. V-5).

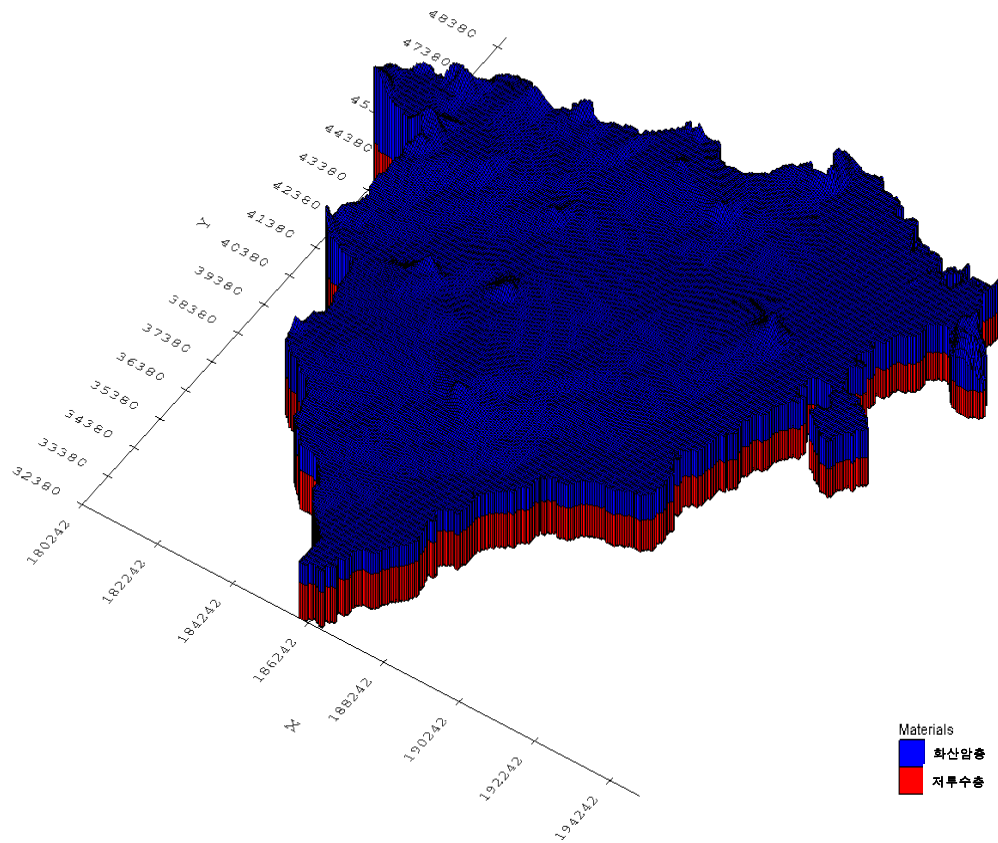


Fig. V-5. Vertical Layers Boundary

유역과 인접한 유역경계면은 지하수 흐름이 없는 NO-FLOW로 설정하였으며, 해안경계는 일정수두경계(Constant Head Boundary)로 설정하였다(Fig. V-6).

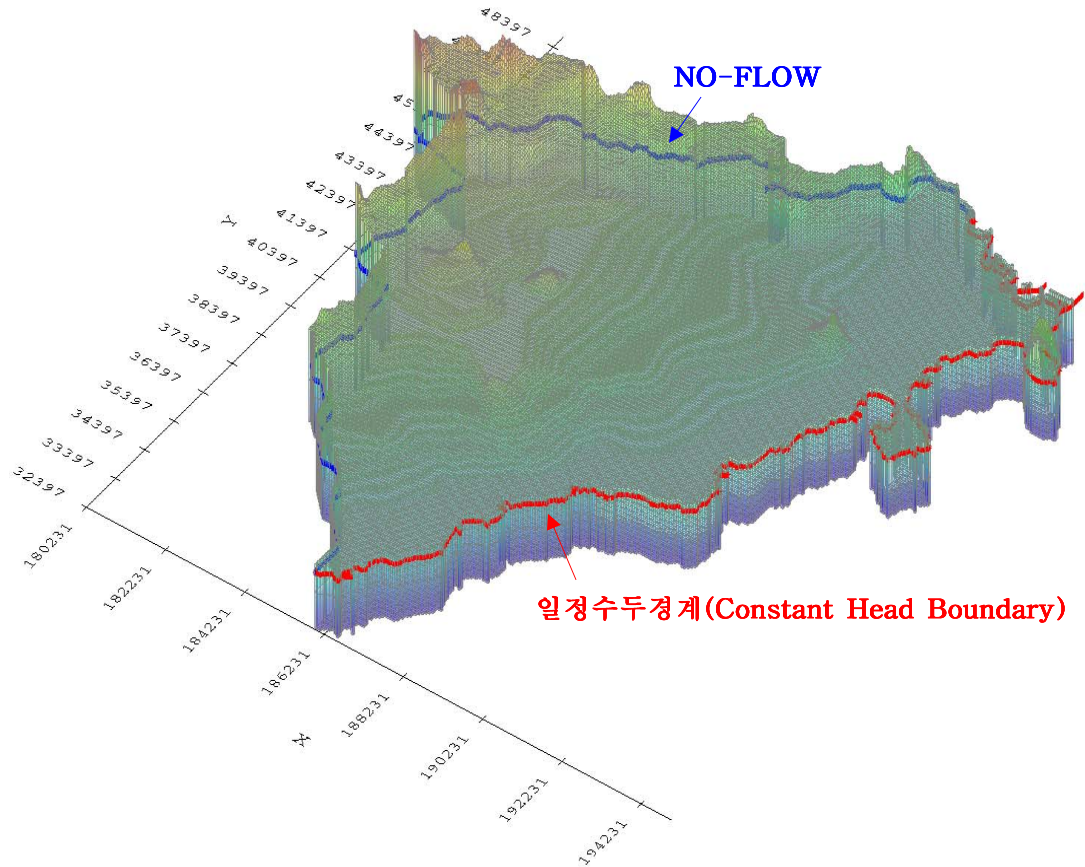


Fig. V-6. Boundary and Flow Conditions

지하수 함양량은 제주특별자치도 수자원관리종합계획 2013-2022 성산유역의 물수지 분석을 통해 산정된 함양량을 이용하였고, 수리전도도는 제주도 수문 지질 및 지하수자원 종합조사Ⅲ(제주특별자치도 한국수자원공사, 2003) 제주도 광역상수도 및 해수침투 감시관측점 자료의 동부유역 평균 수리전도도에 제시된 범위 내에서 참고하여 분석하였다. 공극률은 화산분출암의 공극률 14%~40% (Fetter, 1994)범위 내에서 적용하였다(Table V-2).

Table V-2. Model Input Data

구분	Recharge rate (m/d)		Horizontal K (m/sec)	Vertical K (m/sec)	Porosity
	200m(EL. ↓)	200m(EL. ↑)			
Layer1	$3.1 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-3}$	$4.63 \times 10^{-3}$	$4.63 \times 10^{-4}$	0.3
Layer2	-	-	$1.15 \times 10^{-4}$	$1.15 \times 10^{-5}$	0.01

지하수 모델을 통하여 실제 상황을 예측하기 위해서는 실제 대수층의 거동에 가깝게 시뮬레이션이 될 수 있도록 모델보정 과정을 거쳐야 한다. 모델보정이란 계산된 수두와 관측된 수두를 비교하며 함양이나, 수리전도도 등 인자들을 규칙적인 패턴 내에서 수정되고 계산된 수두가 관측된 수두값에 부합될 때까지 모델을 반복적으로 실행하는 과정이다.

본 연구에 사용되는 지하수 관측수위는 제주특별자치도 수자원본부 홈페이지에 공개된 자료를 참고하였으며, 통계적으로 일관성을 유지하기 위하여 2013년 전체 평균수위를 입력하였고, 파악된 등수위선도를 기준으로 모의 값이 관측치와 근사치를 보이도록 시행착오를 반복적으로 수행하여 보정하였다.

## 2. 정상류 상태에 따른 지하수 흐름분석

정상류 흐름에서의 모의결과 전반적인 지하수 흐름은 지형도를 반영하여 성산 유역은 한라산방향에서 동남쪽으로 이동하는 것으로 나타났다. 계산된 수두와 관측된 수두는 투수성 지질구조 등을 고려하여 관측수위에 최대한 근접시키도록 수행하였다.

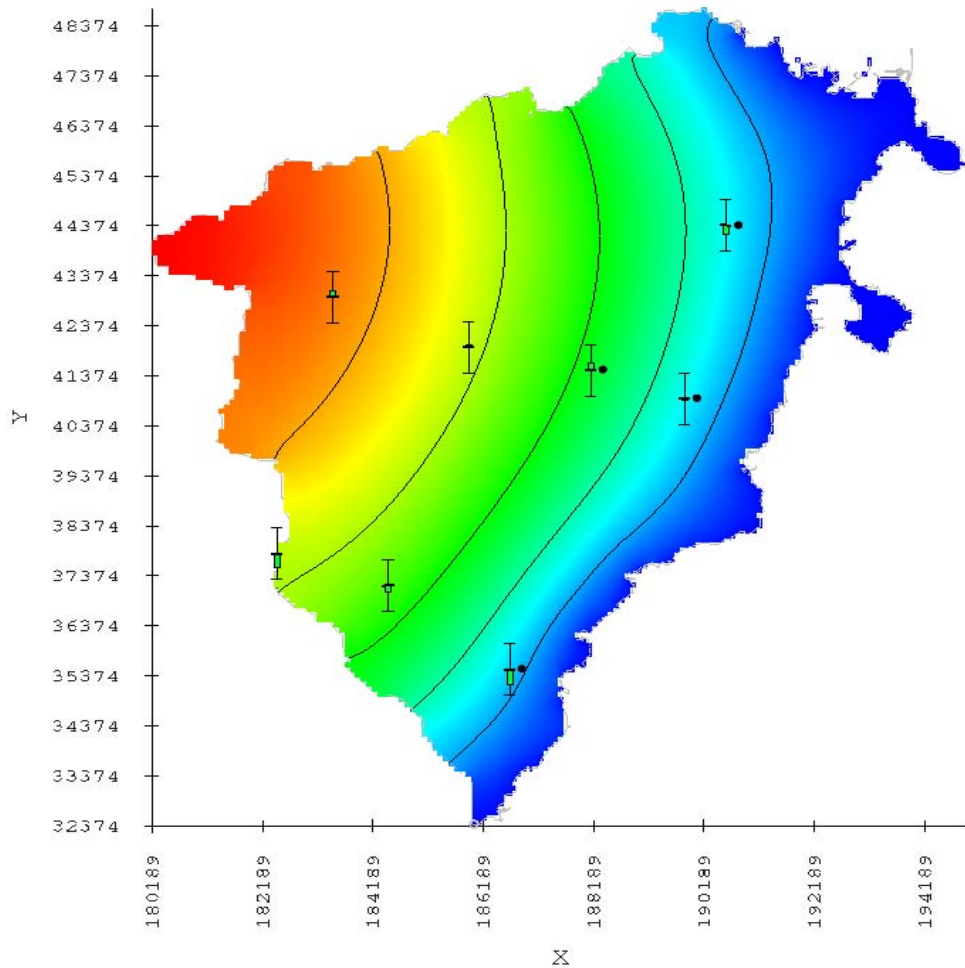


Fig. V-7. Steady Flow Analysis

정상류 상태의 모의결과 시행착오 과정을 거쳐 보정을 실시하였으며, 제주도 수문 지질 및 지하수자원 종합조사Ⅲ에 제시된 수리전도도  $2.003 \times 10^{-3} \sim 2.622 \times 10^{-2}$  (m/sec)의 범위 내에서 최대한 관측수위와 일치될 수 있도록 최적의 수리전도도를 산출하였다. 수리전도도는  $4.63 \times 10^{-3}$ (m/sec)으로, 관측수위 및 계산수위 오차는  $-0.260 \sim 0.620$ m으로 계산되었다(Table V-3, Fig. V-8).  $R^2$ (R-Squared)는 0.773으로 분석되었고, 일반적으로 모델링 보정 시 최소가 되도록 하는 Root mean Square(RMS) (Han, 1999)는 모의 결과 0.352로 나타났다.

Table V-3. Observation and Computed Water Level with Comparison

Observation	Observation Head (EL.m)	Computed Head (EL.m)	Residual Head(m)
JW-GS	0.990	0.640	-0.350
JD-SS1	0.710	0.620	-0.090
JD-SS2	0.950	1.210	0.260
JD-SS3	1.770	1.870	0.100
JD-SS4	2.180	2.40	0.220
JD-SD1	1.110	0.490	-0.620
JD-SD2	1.780	1.520	-0.260
JD-SD3	2.440	1.90	-0.540

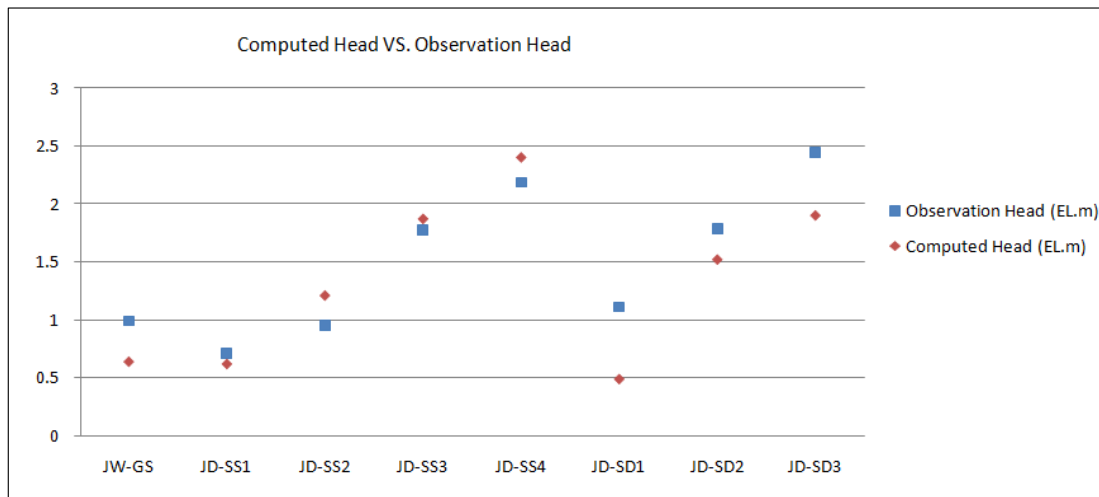


Fig. V-8. Graphical Comparison between Observation and Computed Water Level

모의 결과를 통한 성산유역의 지하수 흐름은 표고가 가장 높은 서북지역에서 해수면 지역으로 낮아지는 성산유역의 표고 분포와 비슷한 경향을 보이는 것으로 확인 할 수 있었다(Fig. V-9).

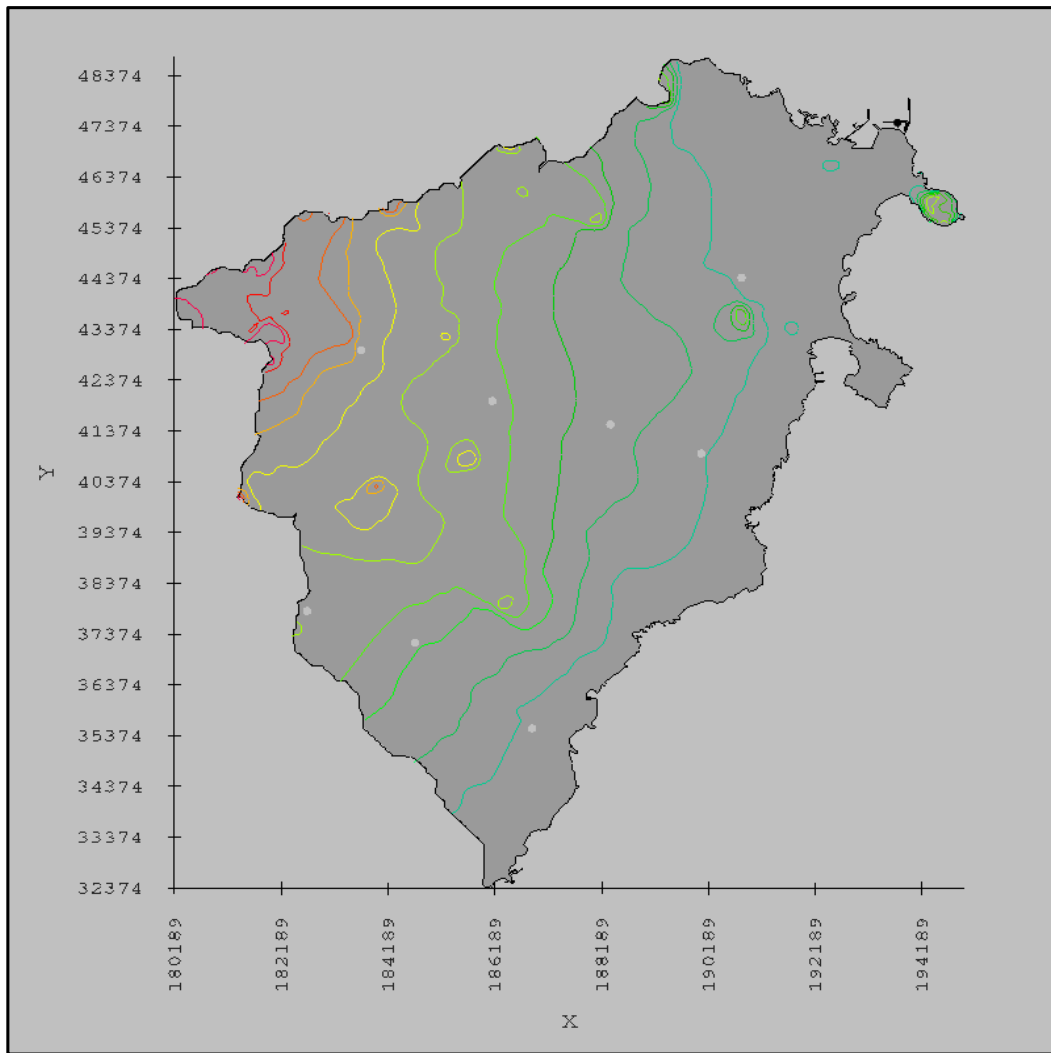


Fig. V-9. Elevation of Sung-san Basin



그러나 성산유역에 위치한 관측공의 표고분포와 지하수위를 비교한 결과 JD-SS1~ JD-SS4, JD-SD1~ JD-SD3과 같이 유역 내 일직선으로 분포하고 있는 관측소를 단일적으로 비교하면 표고가 높아짐에 지하수위가 상승하는 것으로 확인되나 8개소의 관측공을 전체적으로 비교할 경우 동일 표고에 위치한 관측공의 지하수위 차이가 크게 나타는 것을 파악할 수 있었다. 특히, JD-SS4관측공의 경우 표고가 176.6m로 가장 높게 위치하나 지하수위는 2.18로 JD-SD3관측공(표고,126.1m)에 비해 낮은 수위를 나타내는 것을 확인할 수 있었다(Fig. V-10).

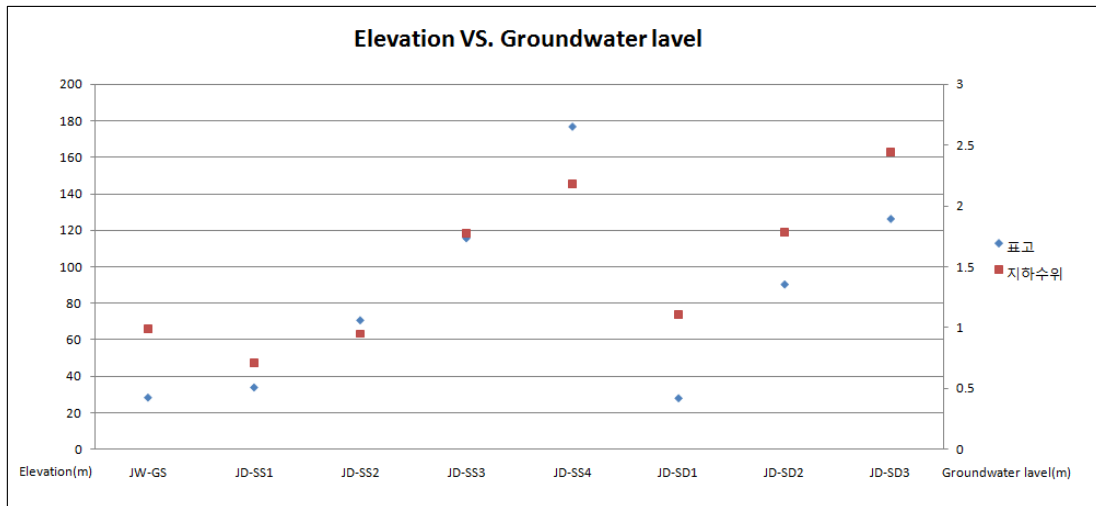


Fig. V-10. Elevation and Groundwater Level

또한, 실제 2013년 연평균 지하수위 분포 특성을 파악한 결과 지하수의 흐름은 해수면에 근접할수록 지하수위는 낮아지나 표고가 가장 높은 서북지역에서 동쪽방향으로 진행 되는 것을 확인할 수 있었다(Fig. V-11).



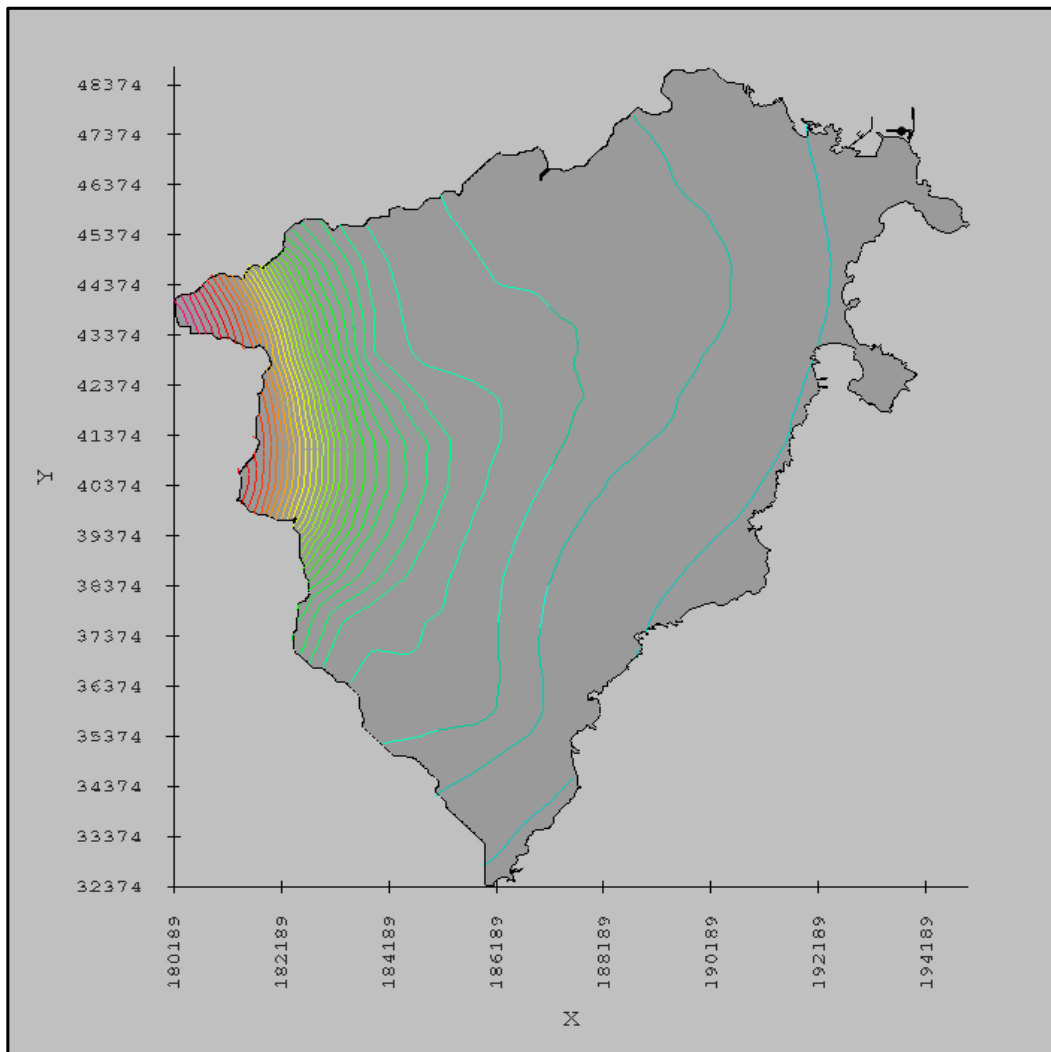


Fig. V-11. Groundwater in 2013

초기모델 설정 시 성산유역과 인접한 유역경계면은 지하수 흐름이 없는 NO-FLOW로 설정 하였다. 그러나 제주도 지하의 저투수층 분포특성을 조사한 결과 그림 V-3. b와 같이 성산유역의 퇴적층 분포는 남에서 북으로 낮아지는 것을 파악할 수 있었으며, 물은 지구 중심으로부터 중력을 받기 때문에 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르는 성질을 바탕으로 유역의 북쪽지역으로 물의 흐름을 설정하여 모의하였다(Fig. V-12).

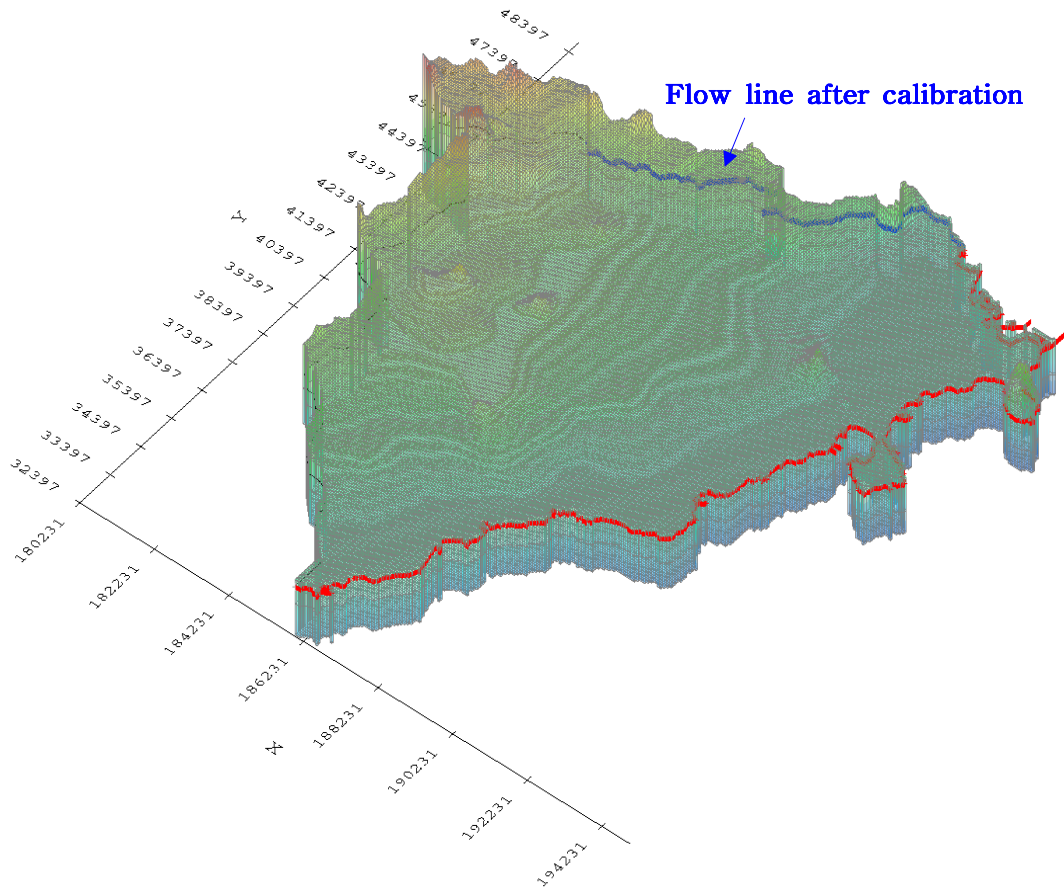


Fig. V-12. Boundary Condition (Flow)

북쪽방향으로 진행되는 흐름은 2013년 연평균 등수위선과 비교하여 적용하였으며,  $4.05 \times 10^{-5} \sim 8.68 \times 10^{-5} (\text{m}^2/\text{sec})/\text{m}$ 으로 산출되었다. 모의 결과 지하수위 분포가 2013년 평균 등수위선과 유사한 것으로 파악되었고, 관측수위와 계산수위의 오차는  $-0.290 \sim 0.365$ 로 감소되었다(Table V-4).  $R^2$ 와 Root mean Square (RMS)는 각각 0.903과 0.195로 유역경계의 NO-FLOW로 설정한 모의 결과에 비해 근사한 값을 나타내었다.

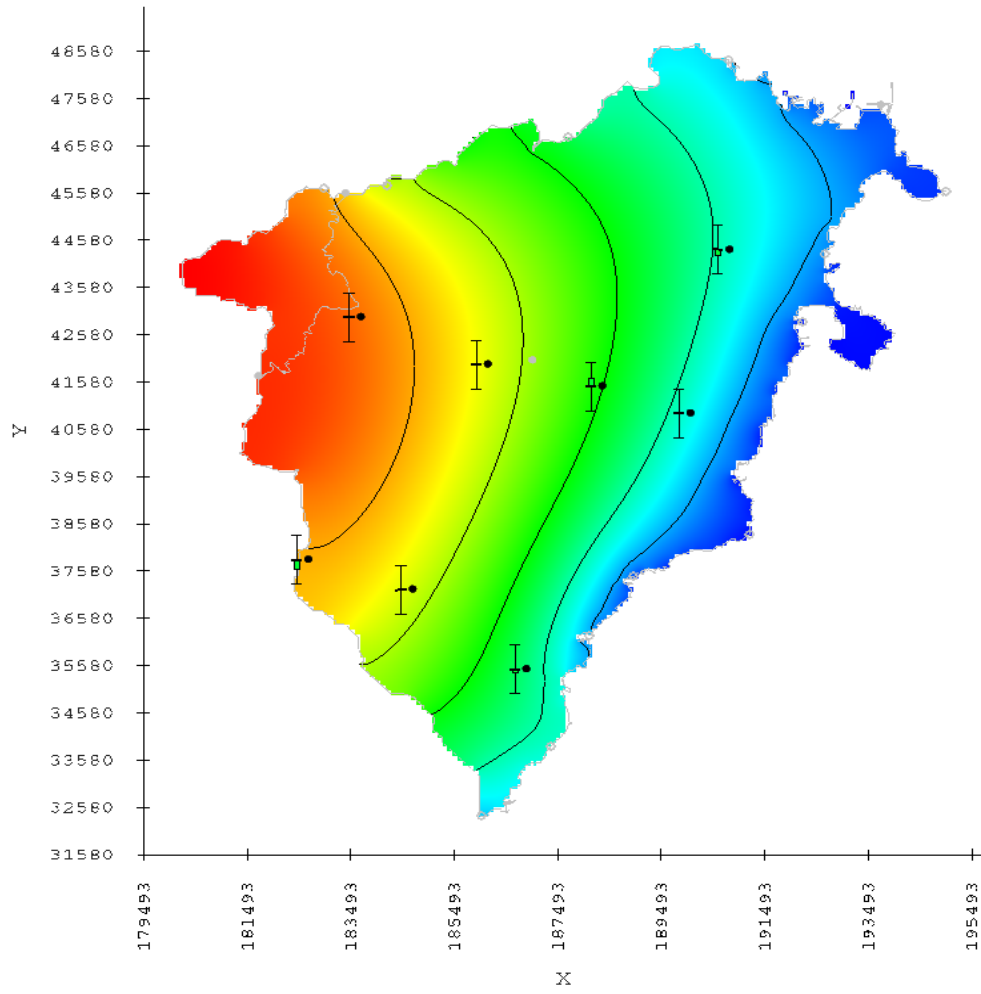


Fig. V-13. Steady Flow Analysis (Flow)

Table V-4. Observation and Computed Water Level with Comparison (Flow)

Observation	Observation Head (EL.m)	Computed Head (EL.m)	Residual Head (m)
JW-GS	0.990	0.774	-0.216
JD-SS1	0.710	0.693	-0.017
JD-SS2	0.950	1.24	0.290
JD-SS3	1.770	1.829	0.059
JD-SS4	2.180	2.22	0.040
JD-SD1	1.110	0.961	-0.149
JD-SD2	1.780	1.76	-0.020
JD-SD3	2.440	2.075	-0.365

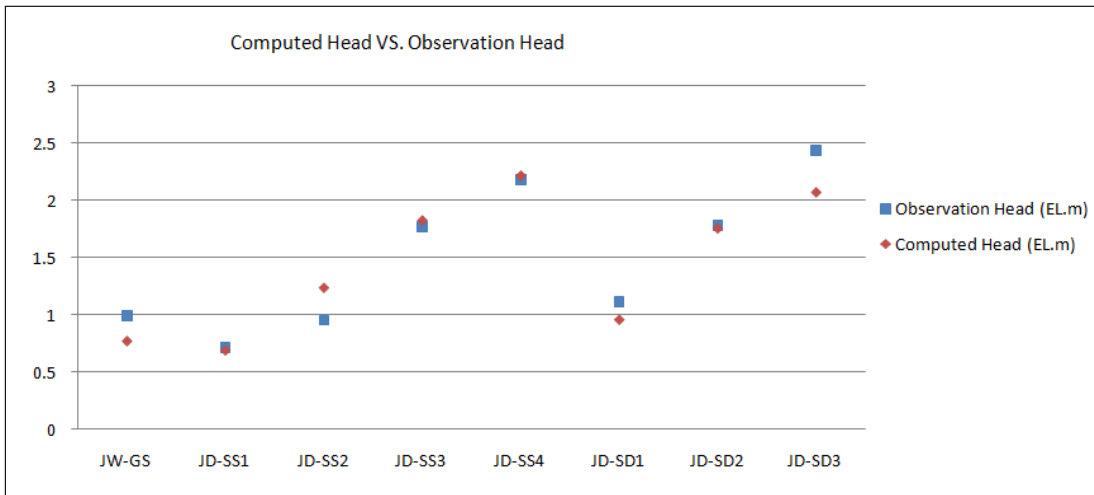


Fig. V-14. Graphical Comparison between Observation and Computed Water Level (Flow)

### 3. 지하수 함양량에 따른 지하수위 변동특성

정상류 상태의 분석을 이용하여 2003년~2009년의 함양변화에 따른 지하수 수위 변동 분석을 실시하였으며, 지하수 함양량은 2011한국지질자원 연구원에서 물수지 분석을 통해 조사된 지하수 함양량자료를 활용하였다(Table V-5).

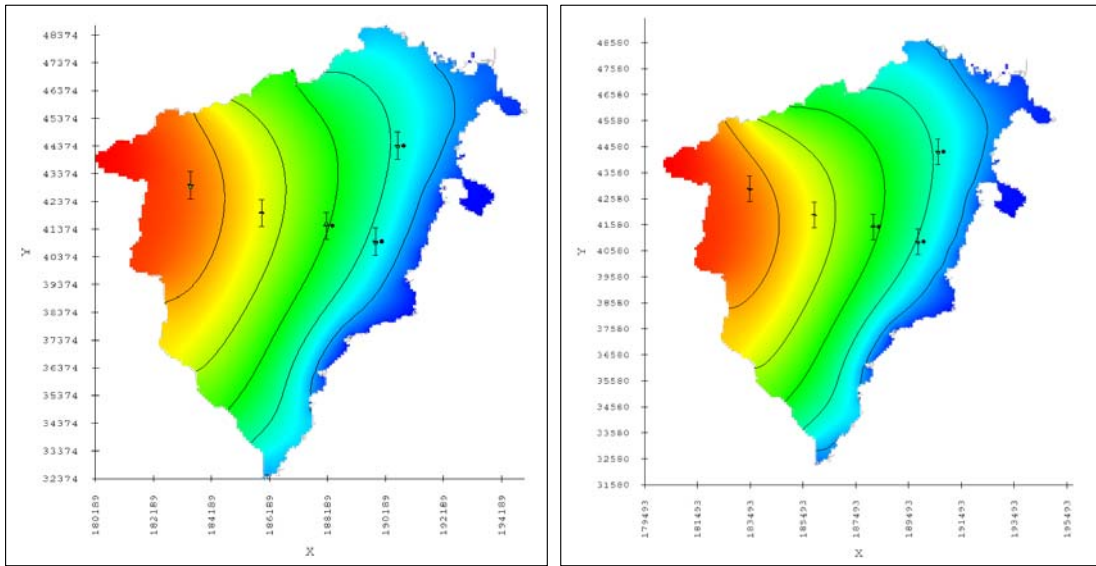
Table V-5. Groundwater recharge input data

구분	Recharge rate (m/d)		구분	Recharge rate (m/d)	
2003년	200이하	$3.5 \times 10^{-3}$	2007년	200이하	$2.2 \times 10^{-3}$
	200이상	$2.5 \times 10^{-3}$		200이상	$1.7 \times 10^{-3}$
2004년	200이하	$1.8 \times 10^{-3}$	2008년	200이하	$1.6 \times 10^{-3}$
	200이상	$1.7 \times 10^{-3}$		200이상	$0.8 \times 10^{-3}$
2005년	200이하	$1.7 \times 10^{-3}$	2009년	200이하	$2.0 \times 10^{-3}$
	200이상	$0.8 \times 10^{-3}$		200이상	$1.7 \times 10^{-3}$
2006년	200이하	$2.4 \times 10^{-3}$	-	-	-
	200이상	$1.7 \times 10^{-3}$			

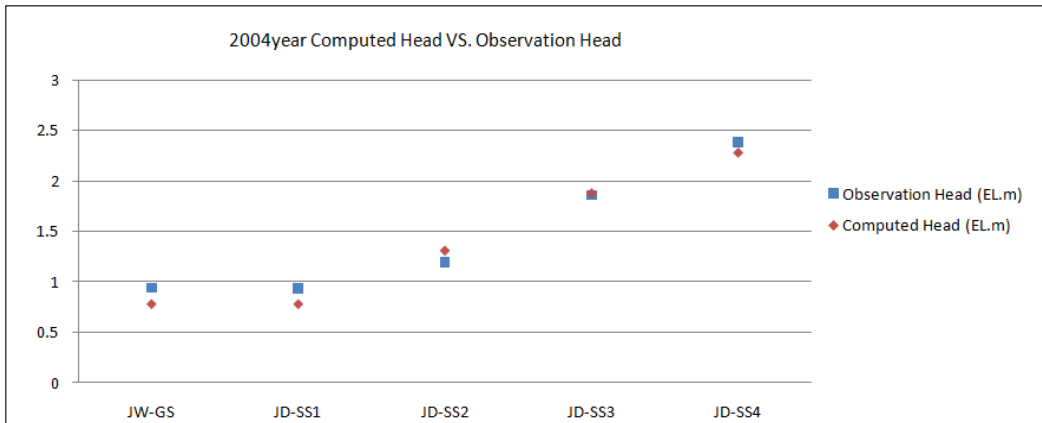
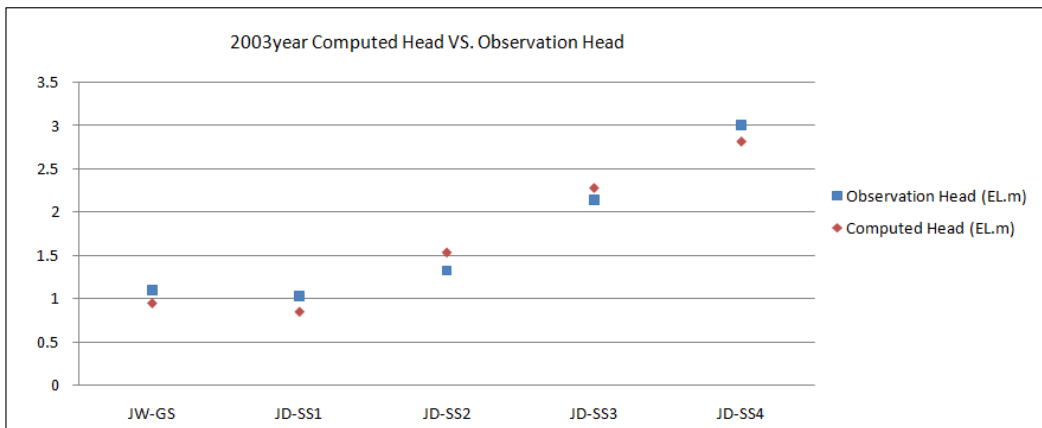
수리전도도는 제주도 수문 지질 및 지하수자원 종합조사Ⅲ(제주특별자치도 한국수자원공사)에 제시된 자료를 참고하였으며, 2003년~2009년의 관측수위를 바탕으로 함양량에 따른 수리전도도를 산출하였다(Table V-6).

Table V-6. Computed Hydraulic conductivity value

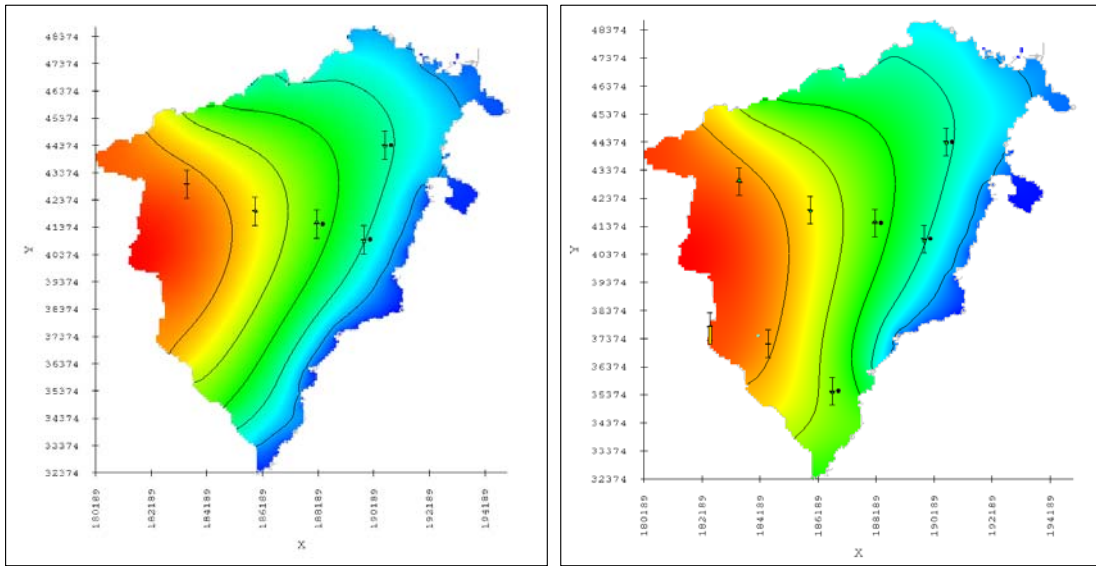
구분	2003년	2004년	2005년	2006년	2007년	2008년	2009년
Horizontal K (m/sec)	$4.63 \times 10^{-3}$	$2.60 \times 10^{-3}$	$2.59 \times 10^{-3}$	$4.05 \times 10^{-3}$	$3.47 \times 10^{-3}$	$2.58 \times 10^{-3}$	$3.47 \times 10^{-3}$
Vertical K (m/sec)	$4.63 \times 10^{-4}$	$2.60 \times 10^{-4}$	$2.59 \times 10^{-4}$	$4.05 \times 10^{-4}$	$3.47 \times 10^{-4}$	$2.58 \times 10^{-4}$	$3.47 \times 10^{-4}$



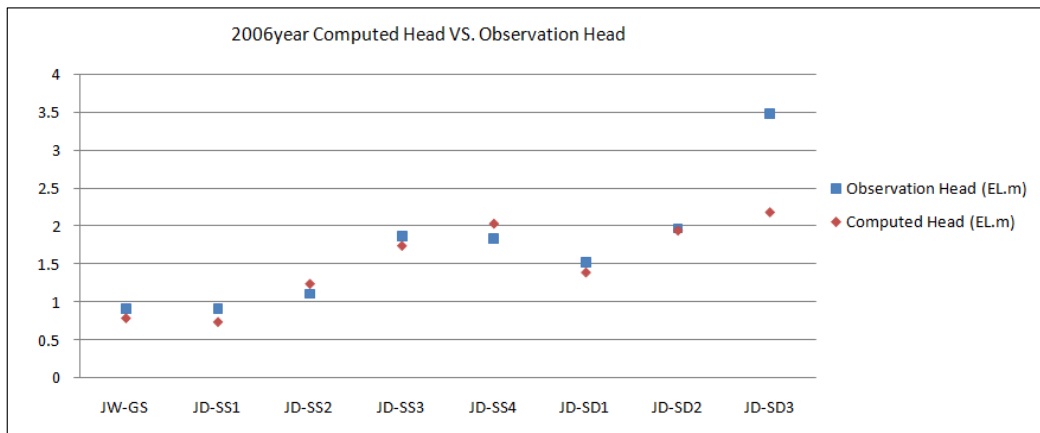
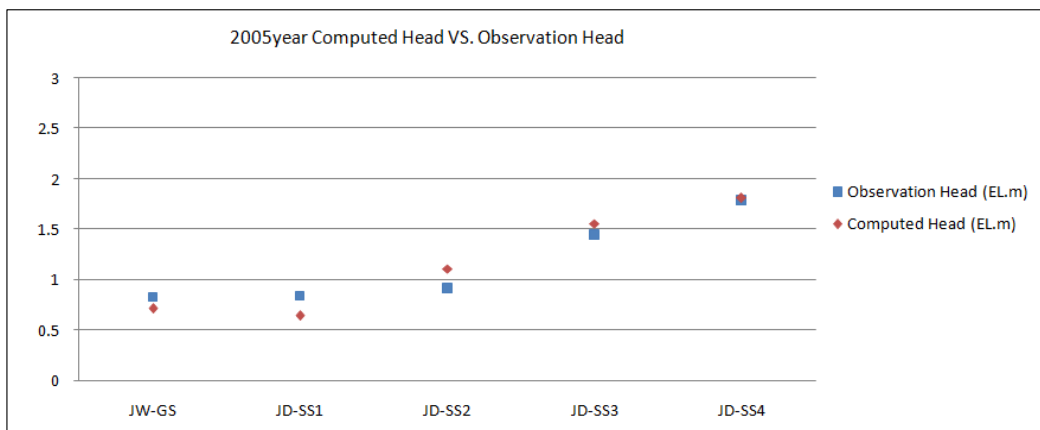
A. 2003년, 2004년 함양량에 따른 수위분포



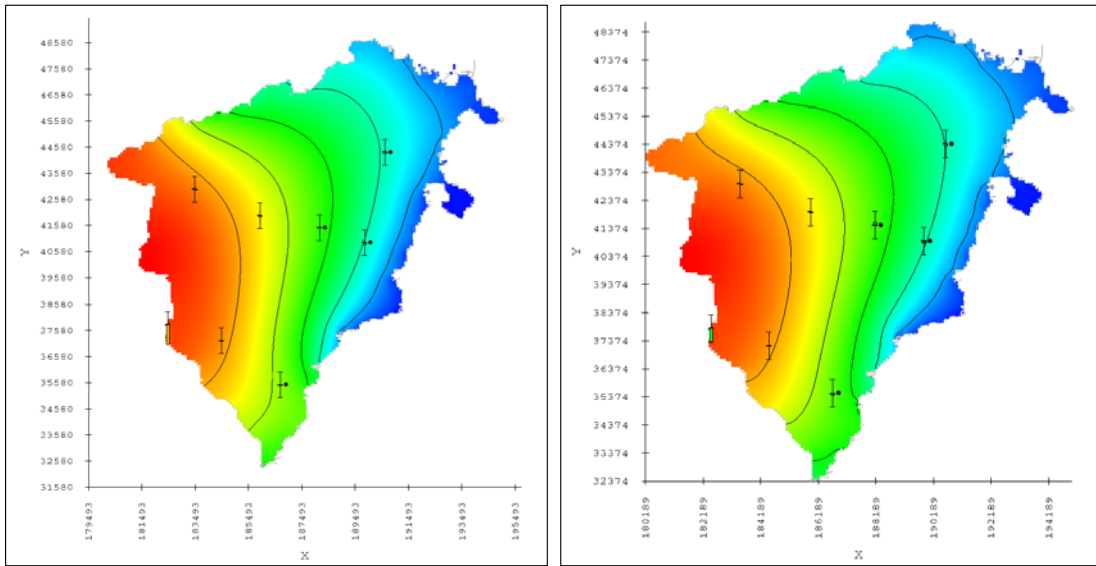
A'. 2003년, 2004년 관측수위 및 계산수위 비교



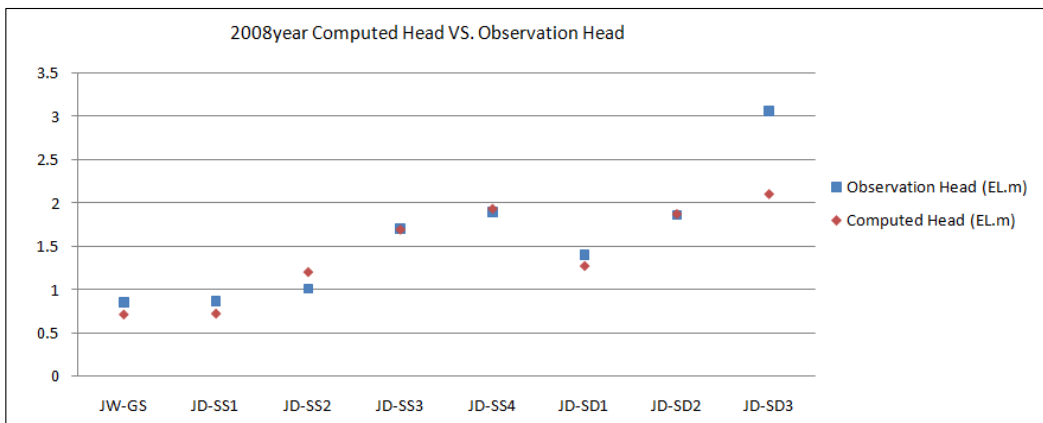
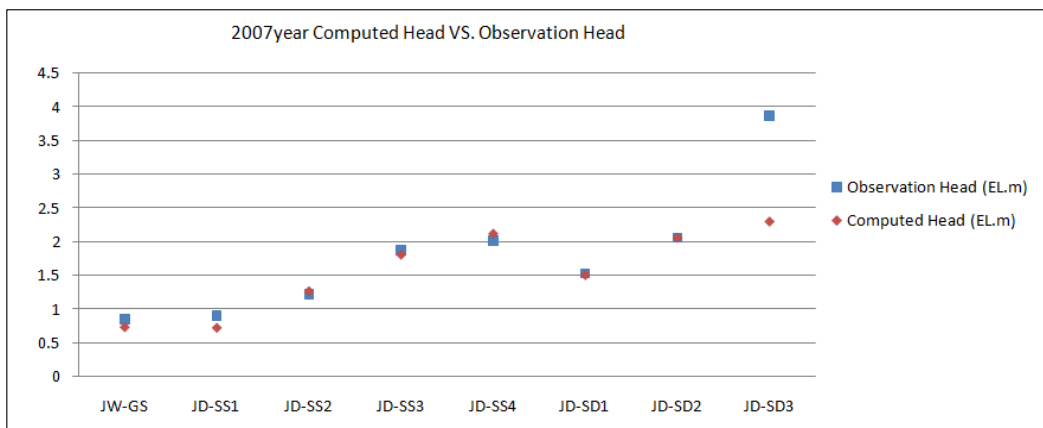
B. 2005년, 2006년 함양량에 따른 수위분포



B'. 2005년, 2006년 관측수위 및 계산수위 비교

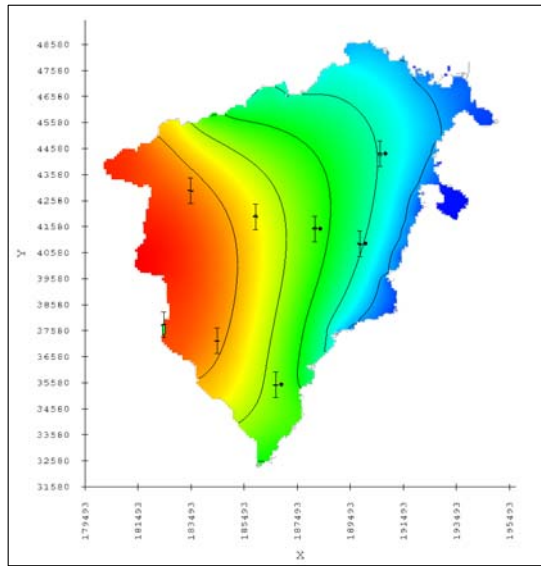


C. 2007년, 2008년 함양량에 따른 수위분포

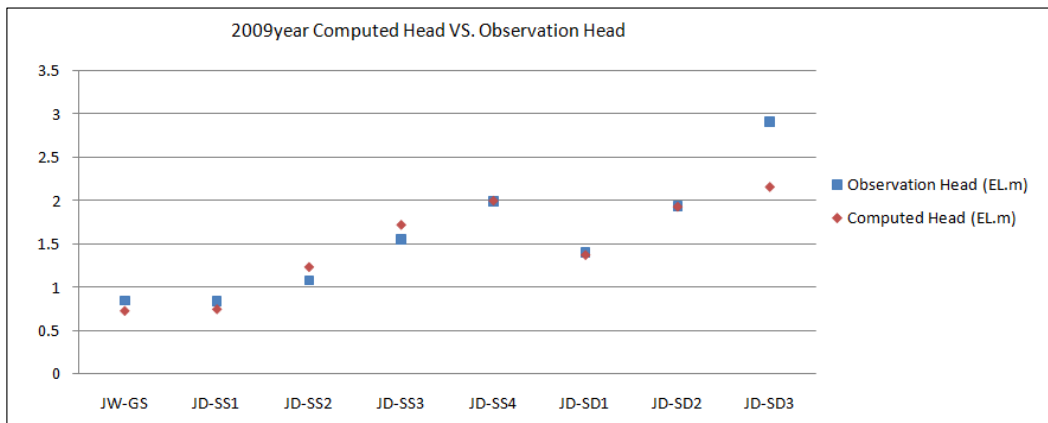


C'. 2007년, 2008년 관측수위 및 계산수위 비교





D. 2009년 함양량에 따른 수위분포



D'. 2009년 함양량에 따른 수위분포

Fig. V-15. Water level distribution according to recharge rate of Groundwater (2003~2009)

모의 결과 8개소의 관측수위와 계산수위의 오차는 -1.57m~0.21(59.45%~116.32%)로 분석되었으며, 대부분 관측자료와 유사한 수두값이 산출되었으나, JD-SD3 관정에서 오차가 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. JD-SD3의 수두차는 0.75~1.57m로 관측수위보다 전체적으로 25.89%~40.55% 낮은 값이 산출되었다(Table V-7).

이러한 현상은 정상류상태 보정 시 지하수 흐름을 저투수층 심도가 낮은 성산구역의 북동쪽으로 진행하여 관측수위와 높은 상관성을 도출한 결과를 토대로 JD-SD3 관정은 표선구역과 인접한 관정으로 표선구역과 성산구역의 저투수층 고도에 따라 성산구역으로 유입되는 지하수 흐름에 영향을 받는 것으로 판단된다.

Table V-7. Comparison of observed and calculated water levels for 2003~2009

Year	Observation	Observation Head (EL.m)	Computed Head (EL.m)	Residual Head(m)	accuracy(%)
2003	JW-GS	1.09	0.94	-0.15	86.43
	JD-SS1	1.02	0.84	-0.18	82.48
	JD-SS2	1.32	1.53	0.21	116.32
	JD-SS3	2.14	2.28	0.14	106.35
	JD-SS4	3.01	2.82	-0.19	93.83
2004	JW-GS	0.94	0.78	-0.16	83.12
	JD-SS1	0.93	0.78	-0.15	83.97
	JD-SS2	1.19	1.31	0.12	109.63
	JD-SS3	1.86	1.88	0.02	101.24
	JD-SS4	2.39	2.28	-0.11	95.57
2005	JW-GS	0.83	0.72	-0.11	86.75
	JD-SS1	0.84	0.65	-0.19	77.74
	JD-SS2	0.92	1.11	0.19	120.65
	JD-SS3	1.45	1.56	0.11	107.58
	JD-SS4	1.79	1.81	0.02	101.11

\*2003~2005년 (JD-SD1~SD3): 미개발로 인한 관측수위 확인불가.

표 계속

Year	Observation	Observation Head (EL.m)	Computed Head (EL.m)	Residual Head(m)	accuracy(%)
2006	JW-GS	0.91	0.79	-0.12	86.88
	JD-SS1	0.91	0.74	-0.17	81.05
	JD-SS2	1.11	1.24	0.13	111.92
	JD-SS3	1.87	1.74	-0.13	93.08
	JD-SS4	1.84	2.03	0.19	110.62
	JD-SD1	1.53	1.39	-0.14	91.08
	JD-SD2	1.97	1.94	-0.03	98.56
	JD-SD3	3.49	2.18	-1.31	62.44
2007	JW-GS	0.85	0.74	-0.11	86.88
	JD-SS1	0.90	0.73	-0.17	81.14
	JD-SS2	1.22	1.27	0.05	104.00
	JD-SS3	1.88	1.81	-0.07	96.29
	JD-SS4	2.02	2.12	0.10	104.84
	JD-SD1	1.53	1.51	-0.02	98.69
	JD-SD2	2.06	2.06	0.00	100.00
	JD-SD3	3.87	2.3	-1.57	59.45
2008	JW-GS	0.85	0.71	-0.14	83.52
	JD-SS1	0.87	0.72	-0.15	82.75
	JD-SS2	1.01	1.20	0.19	118.81
	JD-SS3	1.70	1.69	-0.01	99.41
	JD-SS4	1.89	1.93	0.04	102.11
	JD-SD1	1.40	1.27	-0.13	90.71
	JD-SD2	1.86	1.87	0.01	100.53
	JD-SD3	3.06	2.10	-0.96	68.62
2009	JW-GS	0.85	0.72	-0.13	85.15
	JD-SS1	0.84	0.74	-0.10	88.07
	JD-SS2	1.08	1.23	0.15	114.15
	JD-SS3	1.55	1.72	0.17	110.91
	JD-SS4	1.99	2	0.01	100.60
	JD-SD1	1.40	1.37	-0.03	97.73
	JD-SD2	1.94	1.93	-0.01	99.40
	JD-SD3	2.91	2.16	-0.75	74.11

지하수 함양에 따라 관측수위와 계산수위의 비교결과 결정계수  $R^2$ 는 0.721~0.967로 나타났으며, RMS를 분석한결과 0.118~0.558로 산출되었다. JD-SD3의 수위가 적용된 2006년~2009년에는 결정계수 및 RMS가 비교적 낮게 분석되었으며, 표선유역에 영향을 받는 JD-SD3을 제외한 7개의 관측공으로 비교한 결과 지하수위 오차는 -0.19m~0.21,  $R^2$ 는0.918~0.984, RMS는 0.09~0.176로 분석되어 관측수위와의 높은 상관성을 나타냄을 확인할 수 있었다(Table V-8).

Table V-8.  $R^2$ , RMS and  $R^2$  and RMS excluding JD-SD3 for 2003~2009

구분	2003년	2004년	2005년	2006년	2007년	2008년	2009년
$R^2$	0.949	0.967	0.918	0.726	0.721	0.797	0.844
$R^2$ SD3 excl.	-	-	-	0.929	0.984	0.945	0.957
RMS	0.176	0.118	0.146	0.481	0.558	0.355	0.284
RMS SD3 excl.	-	-	-	0.139	0.09	0.121	0.107

또한 보정과정에 따른 오차가 발생될 수 있으나, 보정과정을 통해 2003년~2009년에 대한 수리전도도 산출결과  $2.58 \times 10^{-3} \text{m/sec} \sim 4.63 \times 10^{-3} \text{m/sec}$ 로 평균  $3.34 \times 10^{-3} \text{m/sec}$ 의 수리전도도를 산출할 수 있었다(Table V-9).

Table V-9. Hydraulic conductivity according to recharge rate

Year	Recharge rate (m/d)		Hydraulic Conductivity (m/sec)	
	2003	200이하	$3.5 \times 10^{-3}$	Horizontal K
200이상		$2.5 \times 10^{-3}$	Vertical K	$4.63 \times 10^{-4}$
2004	200이하	$1.8 \times 10^{-3}$	Horizontal K	$2.60 \times 10^{-3}$
	200이상	$1.7 \times 10^{-3}$	Vertical K	$2.60 \times 10^{-4}$
2005	200이하	$1.7 \times 10^{-3}$	Horizontal K	$2.59 \times 10^{-3}$
	200이상	$0.8 \times 10^{-3}$	Vertical K	$2.59 \times 10^{-4}$
2006	200이하	$2.4 \times 10^{-3}$	Horizontal K	$4.05 \times 10^{-3}$
	200이상	$1.7 \times 10^{-3}$	Vertical K	$4.05 \times 10^{-4}$
2007	200이하	$2.2 \times 10^{-3}$	Horizontal K	$3.47 \times 10^{-3}$
	200이상	$1.7 \times 10^{-3}$	Vertical K	$3.47 \times 10^{-4}$
2008	200이하	$1.6 \times 10^{-3}$	Horizontal K	$2.58 \times 10^{-3}$
	200이상	$0.8 \times 10^{-3}$	Vertical K	$2.58 \times 10^{-4}$
2009	200이하	$2.0 \times 10^{-3}$	Horizontal K	$3.47 \times 10^{-3}$
	200이상	$1.7 \times 10^{-3}$	Vertical K	$3.47 \times 10^{-4}$

## V. 결론

제주도 성산유역의 지하수 유동 및 함양에 따른 수리 특성을 조사하기 위하여 지하수 지질주상도 자료에 의한 화산암층 하부의 저투수층(퇴적층) 구조를 확인한 후 수치해석 모형 MODFLOW프로그램을 사용하여 성산유역의 지하수 흐름특성을 모의하였고, 기존 물수지 분석을 통해 산출된 함양량(2003년~2009년) 자료를 적용하여 성산유역의 지하수위 특성 및 수리특성을 분석하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1) 지하 저투수층 분포 특성을 파악하기 위해 관측공 68개소, 지하수관정 73개소의 지질주상도에 의한 저투수층 심도를 조사하였다. 제주도 저투수층 심도는 해수면기준 약 180.0m~-140.0m로 조사되었으며, 성산유역의 저투수층 출현 심도는 -43.8m~-117.5m으로 확인 되었다. 이는 한라산 중심부로 진행될수록 높은 분포특성을 가지고, 제주도 동북 측으로 진행될수록 매우 낮은 분포특성을 나타내었다.

2) MODFLOW모델 적용 시 성산유역과 인접한 유역경계면을 지하수 흐름이 없는 NO-FLOW로 모의한 결과 관측수위와 계산수위의 오차는 -0.26~0.62m로,  $R^2$ (R-Squared)는 0.773, Root mean Square(RMS)는 0.352로 나타났다. 그러나 물의 흐름 특성을 적용하여 성산유역의 북쪽지역으로 유동을 설정한 결과 오차는 -0.29~0.36m,  $R^2$ 는 0.903, RMS는 0.195로 감소되었으며, 2013년 평균 등수위선분포와도 유사하게 나타났다.

3) 연구대상지역의 2003년~2009년 지하수 함양량에 따른 지하수위 산출 결과 8개소의 관측수위와 계산수위의 오차는 -1.57m~0.21(59.45%~116.32%) 로 JD-SD3 관정에서 오차가 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있었으며, JD-SD3의 수두차는 0.75~ 1.57m로 관측수위보다 25.89%~40.55%로 낮은 수위값이 산출되었다.

4) 성산유역 내 JD-SD3 관정은 표선유역의 지하수 흐름에 영향을 받는 것으로 판단되며, JD-SD3을 제외한 7개 관측공과 산출값의 수위 비교결과  $-0.19 \sim 0.21\text{m}$  (77.74%~ 116.32%)로 분석되었고,  $R^2$ 은0.924~0.984, RMS는 0.09~0.176으로 분석되었다.

5) 지하수 함양에 따라 관측정이 없는 지역의 수위분포를 확인할 수 있었으며, 보정과정을 통해 2003년~2009년에 대한 수리전도도 산출결과 평균  $3.34 \times 10^{-3} \text{ m/sec}$ 로 산출되었다.

상부의 투수성이 좋은 현무암층 구조는 지하수위 및 지하수 흐름에 중요한 요소이다. 이 연구를 통하여 하부의 저투수층 구조 또한 지하수 흐름에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 이에 따라 지형, 하천, 지표 분수량 등을 기준으로 분류한 16개 소유역을 지하수 해석프로그램에 적용할 경우 유역경계에 인접한 지하수위에 대한 정확한 값을 도출해 내기에는 한계가 있다. 따라서 상부의 수치지형도를 토대로 분류된 유역과 하부의 저투수층 구조특성을 파악하여 프로그램에 적용하면 제주의 지하수 흐름 및 유동특성에 대하여 보다 신뢰도 높은 결과가 도출될 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- 제주특별자치도, 2013~2022 수자원관리종합계획
- 한국자원연구소, 2000, 제주(백아도, 진남포) 지질도폭 설명서
- 국토지리정보, 2005, 1:25,000 지형도. 제주도
- 제주발전연구원, 2012, 제주 상수도 50년
- 한국지질자원연구원, 2011 제주위터 지속이용 가능량 평가 및 기능성 지하수 발굴
- 제주특별자치도, 2013, 지하수 조사연보, pp. 5~17.
- 김봉상, 2011, 제주도 화산암층의 수리지질학적 특성 연구, pp. 41~112.
- 고기원, 1997, 제주도의 지하수 부존특성과 서귀포층의 수분지질학적 관련성, pp. 39~47, pp. 125~128.
- 정우열, 양성기, 이준호, 2013, 제주도 도심하천 유역의 유출특성 해석, 한국환경과학회지, 22(5), pp. 555~562.
- 고기원, 박준범, 강봉래, 김기표, 문덕철, 2013, 제주도의 화산활동, 지질학회지, 49(2), pp. 209~230.
- 이병철, 2009, 화산도서유역에서의 수치모형을 이용한 지하수 유동해석, 경일대학교 박사학위논문, pp. 70~83.
- 한정상 저, 1998, 지하수 환경과 오염
- 정우열, 양성기, 2009, SWAT 모형을 이용한 제주도 하천의 유출량 모의, 한국환경과학회지, 18(9), pp. 1045~1055.
- 오승태, 2011, 제주도 동부지역 염지하수 관정의 수리지질학적 특성, 제주대학교 석사학위논문, pp. 48~53.
- 정수일, 2003, MODFLOW 모형을 이용한 지표수와 지하수사이의 유동에 관한 연구, 경희대학교 대학원 석사학위논문, pp. 31~34.
- 안승섭, 이병철, 정도준, 서명준(2007), 수치모형을 이용한 도서지방의 지하수 유동해석, 한국환경과학회 학술발표회 논문집, 16(1), pp.264-268.
- 고기원, 박준범, 2009, 제주도 형성 초기 용암 분출 기록, 대한지질학회 학술대회.



- 안승섭, 정도준, 이병철, 이증석(2007), 화산도서에서 지하수 양수기간에 따른 지하수 변동에 관한 연구, 한국환경과학회 학술발표회 논문집, 16(2), pp. 152-156.
- 이남훈, 2010, 도서지역의 지하수 유동특성에 관한연구: 지하수 함양특성을 중심으로, 경일대학교 석사학위 논문, pp. 101~111.
- 한정상, 1995, 지하수개발과 관리대책, 수자원개발과 보존대책, 한국수자원공사, pp. 39~103.
- 박기화, 하규철 1997 제주도 지하수 흐름을 지배하는 저투수성 암석의 분포 양상, 대한지질학회 학술대회.
- 고병련, 1998, 지하수 수질 및 오염예측에 모델에 관한 연구, 영남대학교 박사학위논문.
- 김남원, 나한나, 정일문, 2013, 통합수문모형을 이용한 제주 한천유역의 지하수 변동 특성모의, 한국환경과학회지, 22(5) pp. 515~522.
- 김남원, 정일문, 유상연, 이정우, 양성기, 2009, 제주지역 지표수-지하수 연계 해석, 환경과학회지, 18(9), pp. 1017~1026.
- Freeze, R. A. and Witherspoon, P. A., 1966. Theoretical analysis of regional groundwater flow: 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model, Water. Res., 2, 641-656
- Davis, G. H., Lee, C. K., 1970. Bradley, E. and Payne, B. R., Geohydrologic interpretation of a volcanic island from environmental isotopes, Water Resour. Res., 6, 99-109
- 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
- Gupta, S. K. and Tanji, K. K., 1977. Computer program for solution of large, sparse, unsymmetric systems of linear equations, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 11, 1251-1259
- Gupta, S. K., Cole, C. R. and Pinder, G. F., 1984. A finite element three-dimensional groundwater model for a multiaquifer system, Water

Resour. Res., 20, 553-563

- Hjelmfelt, A. T., 1980, "Curve number procedures as infiltration method" Journal of Hydraulic Div. ASCE, Vol. 106 No. HY6, pp. 1107 ~1111.
- Hurley, D. G., 1985. Pantelis, Unsaturated and Saturated Flow through a Thin Porous Layer on a Hillslope, Water Resources Research, Vol21, No. 6, pp 821-824

## 감사의 글

지난 시간 저는 공부와 가까워질 수 없는 사이라 생각을 해왔으나, 지금 이 순간, “배움에는 끝이 없다”라는 말을 실감해봅니다. 앞으로의 배움에 있어 첫 단추가 되어줄 이 논문이 나오기까지 도움주신 많은 분들께 감사의 말을 전하고자 합니다.

부족함이 많은 저를 가르치고 이끌어주신 양성기 교수님, 교수님의 아낌없는 지도와 격려는 항상 마음속 깊이 새겨두겠습니다. 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 바쁘신 가운데 논문을 세심하게 검토하여주신 김남형 교수님, 김상진 교수님께 감사의 말씀 드립니다. 아울러, 많은 관심과 가르침을 주신 박상렬 교수님, 이병걸 교수님, 이동욱 교수님, 해양학과 윤석훈 교수님께 감사의 말씀을 드립니다.

힘들 때 마다 진심으로 걱정해 주고, 많은 힘이 되어준 너무나도 소중한 연구실 식구들, 우열이형, 준호형, 용석이형, 보성이 그리고 김지영 쌤에게 고마운 마음을 전합니다. 논문을 쓰면서 얻은 수많은 격려와, 위로는 너무나도 큰 힘이 되었고 무엇보다 인생에 있어 고맙고 소중한 사람들이라 생각해봅니다.

자식처럼 아껴주시고 많은 지원과 관심을 가져주신 주식회사 진산 김봉상 사장님께 진심으로 감사말씀을 드립니다. 대학원 생활을 하기 전부터 적극적인 가르침과 관심을 갖고 언제나 아낌없는 칭찬과 응원을 해 주신 오승태 부장님을 비롯하여 이병철 사장님, 고택균 이사님, 고수연 이사님, 운동훈 과장님께 고마운 마음을 전합니다.

항상 곁에서 응원해주는 사랑하는 나의 친구들 석창, 은별, 광현, 희석, 우식, 병호, 영수, 혁진, 선구, 보란이를 비롯하여 많은 친구들.....바쁘고 힘들기도 했지만 너희들이 있어 힘을 낼 수 있었다. 그리고 우석이와 창성이, 너희들과 함께 고민하고 걱정하던 시절은 좋은 추억으로 간직될 것 같다.

마지막으로, 너무나도 사랑하는 어머니, 아버지, 장모님과 하늘에 계신 장인어른께 표현할 수 없을 만큼 사랑하고 감사한 마음을 전합니다. 그리고 좋은 말씀으로 조언을 해주시는 셋아버지와 작은아버지, 못난 동생을 항상 챙겨주는 형, 잔소리만 하지만 오빠라고 잘 따라주는 동생 은혜, 나를 아껴주는 효정누나, 항상 나를 반겨주는 우석이와 현승이에게 고마운 마음을 전합니다. 바쁘다며 많이 놀아주지 못해도 건강하게 잘 자라주고 볼 때마다 웃어주는 우리 딸 지우와 언제나 바쁘고 정신없다는 말만하는 남편을 이해해주고 걱정하지 말라며 오히려 힘을 실어주던 아내 유정에게 항상 고마운 마음과 사랑한다는 말을 전하며 이 논문으로나마 보답하고 싶습니다.

비록 저의 이름으로 취득하는 학위논문이지만 혼자만이 아닌 모든 분들과 기쁨을 함께 나누고 싶고, 많은 도움을 주신 모든 분들의 기대에 저버리지 않게 앞으로 열심히 노력하겠습니다. 감사합니다.

2014 년 6 월  
김 민 철 배상