



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 지하수의 수리학적  
유역설정과 유동특성 해석

濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

金 玟 哲

2018年 8月



# 제주도 지하수의 수리학적 유역설정과 유동특성 해석






指導教授 楊 城 基

金 玟 哲

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함

2018年 6月

金玟哲의 工學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長	김	상	지	
委 員	김	남	경	
委 員	곽	원	래	
委 員	이	재	욱	
委 員	양	성	기	

濟州大學校 大學院

2018年 8月

# Hydraulic Watershed Classification and Flow Characteristics Analysis of Groundwater in Jeju Island

Min-Chul Kim

(Supervised by professor Sung-Kee Yang)

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

2018. 6.

This dissertation has been examined and approved by

## Doctoral Committee

Professor	Sang-Jin Kim
Professor	Nam-Hyeong Kim
Doctor	Won-Bae Park
Doctor	Jae-Wook Ko
Professor	Sung-Kee Yang

August, 2018

DEPARTMENT OF CIVIL & OCEAN ENGINEERING  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

## 目 次

目 次 .....	i
LIST OF FIGURES .....	V
LIST OF TABLES .....	IX
Summary .....	XI
<b>I . 서 론 .....</b>	<b>1</b>
1. 연구배경 .....	1
3. 연구동향 .....	3
2. 연구목적 .....	6
4. 연구 자료 및 방법 .....	8
<b>II . 이론적 배경 .....</b>	<b>10</b>
1. 지하수위 측정의 공간보간법(Spatial Interpolation) .....	10
1.1 Kriging .....	11
1.1.1 Simple Kriging(SK) .....	12
1.1.2 Ordinary Kriging(OK) .....	13
1.1.3 Universal Kriging(UK) .....	13
1.1.4 Cokriging(CK) .....	14
1.1.5 Empirical Bayesian Kriging(EBK) .....	15
1.2 Inverse Distance Weighted(IDW) .....	16
1.3 Spline .....	17
2. 지하수 유동해석 모형 .....	19
2.1 MODFLOW 모형의 개요 .....	19
2.2 MODFLOW 모형의 방정식 .....	20
2.3 MODFLOW 모형의 구성요소 .....	31
2.4 MODFLOW 모형의 Package .....	31

<b>III. 연구대상 지역 및 지하수 개발·이용 현황</b> .....	<b>33</b>
1. 연구대상 지역 .....	33
1.1 강수특성 .....	34
1.2 하천특성 .....	38
1.3 표고분석 .....	39
1.4 경사분석 .....	40
1.5 지질특성 .....	42
1.6 지하수 부존형태 .....	44
2. 지하수 개발·이용 시설 및 관측정 현황 .....	47
2.1 지하수 개발·이용 시설 .....	47
2.2 지하수 관측정 현황 .....	50
<b>IV. 결과 및 고찰</b> .....	<b>52</b>
1. 지하수의 관정 분류 및 관측자료 분석 .....	52
1.1 지하수 개발·이용 시설 분류 .....	52
1.1.1 연도별 지하수 개발 .....	52
1.1.2 월별 지하수 개발 .....	53
1.1.3 굴착심도별 분류 .....	54
1.1.4 지하수위 분류 .....	56
1.2 관측정 지하수위 변동분석 .....	58
1.2.1 연평균 지하수위 변동분석 .....	58
1.2.2 월평균 지하수위 변동분석 .....	62
1.2.3 누적평균 지하수위 분석 .....	65
1.3 지하수위 자료 분석 및 활용성 .....	67
2. 지하수위와 표고 및 해안거리와의 상관분석 .....	69
2.1 해안거리와 표고와의 상관분석 .....	70
2.2 지하수위와 해안거리와의 상관분석 .....	72
2.3 지하수위와 표고와의 상관분석 .....	74
2.4 지역별 표고와 지하수위 관계 비교·분석 .....	77

2.4.1	동부지역 표고와 지하수위 비교·분석 .....	77
2.4.2	서부지역 표고와 지하수위 비교·분석 .....	78
2.4.3	남부지역 표고와 지하수위 비교·분석 .....	80
2.4.4	북부지역 표고와 지하수위 비교·분석 .....	81
3.	지하수 등수위선 구축과 지하수 유역경계 설정 .....	83
3.1	지하수 등수위선 구축 .....	83
3.2	지하수 등수위선의 검정 .....	85
3.2.1	교차 타당성 검정 .....	85
3.2.2	그래프 검정 .....	87
3.3	지하수 유역경계 설정 .....	88
3.3.1	지하수 유역의 정의 .....	88
3.3.2	제주도의 기존 지하수 유역 .....	89
3.3.3	기존 지하수 유역의 문제점 .....	90
3.3.4	제주도 지하수 유역 설정 .....	92
4.	지하수 유동특성과 수리전도도 해석 .....	95
4.1	MODFLOW 입력자료 분석 .....	95
4.1.1	Boundary Coverage .....	95
4.1.2	Hydraulic Conductivity Coverage .....	96
4.1.3	Recharge Coverage .....	98
4.1.4	Observation Coverage .....	101
4.1.5	지층구조 .....	103
4.1.6	격자망 설정 및 모델의 구축 .....	104
4.2	지하수 유역별 유동 특성 해석 .....	110
4.2.1	표선-성산유역 .....	110
4.2.2	구좌유역 .....	114
4.2.3	대정-안덕유역 .....	118
4.2.4	한림-한경유역 .....	122
4.2.5	남원유역 .....	126
4.2.6	서귀유역 .....	130
4.2.7	동제주유역 .....	134

4.2.8 서제주유역 .....	138
4.3 제주도 수리전도도 특성 .....	142
4.3.1 수리전도도 분포 특성 .....	142
4.3.2 지하수 부존형태 및 등수위선 분포와의 비교·검토 .....	144
4.3.3 양수시험의 수리전도도 결과와 비교·검토 .....	146
<b>V. 결 론 .....</b>	<b>148</b>



## List of Figures

Fig. 1.1 Flow chart on the study .....	9
Fig. 2.1 Conceptual diagram of Kriking .....	12
Fig. 2.2 Conceptual diagram of IDW .....	17
Fig. 2.3 Conceptual diagram of Spline .....	18
Fig. 2.4 Mimetic diagram of virtual aquifer .....	22
Fig. 2.5 Block-centered grid and point-centered grid system .....	23
Fig. 2.6 Isometric drawing of core $i, j, k$ cell and 6 nearby cells .....	24
Fig. 2.7 Groundwater flow from $(i, j, k)$ cell to $(i, j-1, k)$ cell .....	25
Fig. 3.1 Study area in Jejudo .....	33
Fig. 3.2 Annual precipitation characteristics .....	36
Fig. 3.3 Monthly precipitation characteristics .....	37
Fig. 3.4 Stream distribution in Jejudo .....	38
Fig. 3.5 The altitude of Jejudo .....	39
Fig. 3.6 The slope of Jejudo .....	41
Fig. 3.7 Geological maps of Jejudo .....	44
Fig. 3.8 Mimetic diagram for endowment of groundwater .....	46
Fig. 3.9 Groundwater Occurrence in Jejudo .....	46
Fig. 3.10 Groundwater status by developing subject in Jejudo .....	48
Fig. 3.11 Groundwater status by usage in Jejudo .....	48
Fig. 3.12 Groundwater development by elevation .....	49
Fig. 3.13 Groundwater observation location map .....	51
Fig. 4.1 Graph of groundwater development by year .....	53
Fig. 4.2 Monthly groundwater development status graph .....	54
Fig. 4.3 Classification by depth of groundwater .....	56
Fig. 4.4 Classification by groundwater level .....	57
Fig. 4.5 Annual average difference in groundwater level .....	59
Fig. 4.6 Maximum groundwater level ratio by year .....	61

Fig. 4.7 minimum groundwater level ratio by year .....	62
Fig. 4.8 Monthly precipitation and maximum groundwater level .....	63
Fig. 4.9 Monthly precipitation and minimum groundwater level .....	64
Fig. 4.10 Average groundwater level comparison(5year, 10year, 16year) .....	66
Fig. 4.11 Regional coastal distance-elevation correlation analysis .....	71
Fig. 4.12 Regional coastal distance-groundwater correlation analysis .....	73
Fig. 4.13 Elevation-groundwater correlation analysis by elevation .....	75
Fig. 4.14 Regional elevation-groundwater correlation analysis .....	76
Fig. 4.15 Relation between elevation and groundwater level in eastern (60m or less) .....	77
Fig. 4.16 Relation between elevation and groundwater level in eastern (60~250m) .....	78
Fig. 4.17 Relation between elevation and groundwater level in Western (60m or less) .....	79
Fig. 4.18 Relation between elevation and groundwater level in Western (60~450m) .....	79
Fig. 4.19 Relation between elevation and groundwater level in Southern (80m or less) .....	80
Fig. 4.20 Relation between elevation and groundwater level in Southern (80~650m) .....	81
Fig. 4.21 Relation between elevation and groundwater level in Northern (90m or less) .....	82
Fig. 4.22 Relation between elevation and groundwater level in Northern (90~650m) .....	82
Fig. 4.23 Groundwater table contour map in Jeju-do .....	84
Fig. 4.24 Groundwater level slope by region .....	85
Fig. 4.25 Graph test of kriging results and observations .....	88
Fig. 4.26 Groundwater basin of jeju-do .....	90
Fig. 4.27 Analysis of groundwater flow in Sung-san basin(Kim, 2015) .....	91
Fig. 4.28 Analysis of groundwater flow in Dae-jeong basin(Park, 2016) .....	91

Fig. 4.29 Groundwater basin of jejudo .....	94
Fig. 4.30 Subwatershed classification of jejudo .....	96
Fig. 4.31 Pilot point for hydraulic conductivity .....	97
Fig. 4.32 Rainfall observation station in Jejudo .....	98
Fig. 4.33 Isohyetal map of Jejudo (2012~2016year) .....	99
Fig. 4.34 Groundwater recharge area by subwatershed .....	100
Fig. 4.35 Random points in subwatershed .....	103
Fig. 4.36 Plan view of low permeability layer depth .....	104
Fig. 4.37 Elevation analysis of layers(Pyoseon-Seongsan watershed) .....	106
Fig. 4.38 Elevation analysis of layers(Kujwa watershed) .....	106
Fig. 4.39 Elevation analysis of layers(Deajeong-Andeok watershed) .....	107
Fig. 4.40 Elevation analysis of layers(Hanrim-Hankyeong watershed) .....	107
Fig. 4.41 Elevation analysis of layers(Namwon watershed) .....	108
Fig. 4.42 Elevation analysis of layers(Seogwi watershed) .....	108
Fig. 4.43 Elevation analysis of layers(East Jeju watershed) .....	109
Fig. 4.44 Elevation analysis of layers(West Jeju watershed) .....	109
Fig. 4.45 Elevation of Pyoseon-Seongsan watershed .....	111
Fig. 4.46 Groundwater flow of Pyoseon-Seongsan watershed .....	112
Fig. 4.47 Groundwater flow analysis results of Pyoseon-Seongsan watershed .....	112
Fig. 4.48 Computed vs. Observed Values (Pyoseon-Seongsan watershed) .....	114
Fig. 4.49 Elevation of Kujwa watershed .....	115
Fig. 4.50 Groundwater flow of Kujwa watershed .....	115
Fig. 4.51 Groundwater flow analysis results of Kujwa watershed .....	116
Fig. 4.52 Computed vs. Observed Values (Kujwa watershed) .....	118
Fig. 4.53 Elevation of Deajeong-Andeok watershed .....	119
Fig. 4.54 Groundwater flow of Deajeong-Andeok watershed .....	119
Fig. 4.55 Groundwater flow analysis results of Deajeong-Andeok watershed .....	120
Fig. 4.56 Computed vs. Observed Values (Deajeong-Andeok watershed) .....	122
Fig. 4.57 Elevation of Hanrim-Hankyeong watershed .....	123
Fig. 4.58 Groundwater flow of Hanrim-Hankyeong watershed .....	123

Fig. 4.59 Groundwater flow analysis results of Hanrim–Hankyeong watershed	124
Fig. 4.60 Computed vs. Observed Values	125
Fig. 4.61 Elevation of Namwon watershed	126
Fig. 4.62 Groundwater flow of Namwon watershed	127
Fig. 4.63 Groundwater flow analysis results of Namwon watershed	127
Fig. 4.64 Computed vs. Observed Values	129
Fig. 4.65 Elevation of Seogwi watershed	130
Fig. 4.66 Groundwater flow of Seogwi watershed	131
Fig. 4.67 Groundwater flow analysis results of Seogwi watershed	131
Fig. 4.68 Computed vs. Observed Values (Seogwi watershed)	133
Fig. 4.69 Elevation of East Jeju watershed	134
Fig. 4.70 Groundwater flow of East Jeju watershed	135
Fig. 4.71 Groundwater flow analysis results of East Jeju watershed	135
Fig. 4.72 Computed vs. Observed Values (East Jeju watershed)	137
Fig. 4.73 Elevation of West Jeju watershed	138
Fig. 4.74 Groundwater flow of West Jeju watershed	139
Fig. 4.75 Groundwater flow analysis results of West Jeju watershed	139
Fig. 4.76 Computed vs. Observed Values	141
Fig. 4.77 Hydraulic conductivity distribution map of Jejudo	143
Fig. 4.78 Groundwater Occurrence and Groundwater table contour map in Jejudo	145

## List of Tables

Table 3.1 Subwatershed areas .....	34
Table 3.2 Annual precipitation characteristics .....	35
Table 3.3 Monthly precipitation characteristics .....	37
Table 3.4 The altitude analysis result of Jejudo .....	40
Table 3.5 The slope analysis result of Jejudo .....	41
Table 3.6 Geological system of Jejudo .....	43
Table 3.7 Groundwater status by developing subject and usage .....	47
Table 3.8 Groundwater development by elevation .....	49
Table 3.9 Development status of groundwater observations by year .....	50
Table 4.1 Status of groundwater development by year .....	52
Table 4.2 Monthly groundwater development .....	54
Table 4.3 Classification by depth of groundwater .....	55
Table 4.4 Classification by groundwater level .....	57
Table 4.5 The ratio of the annual average groundwater level difference .....	59
Table 4.6 Maximum groundwater level by year .....	60
Table 4.7 Minimum groundwater level by year .....	61
Table 4.8 Monthly precipitation and maximum groundwater level .....	63
Table 4.9 Monthly precipitation and minimum groundwater level .....	64
Table 4.10 Coastal distance-elevation correlation analysis .....	70
Table 4.11 Coastal distance-Groundwater correlation analysis .....	72
Table 4.12 Elevation-groundwater correlation analysis .....	74
Table 4.13 Regional elevation-groundwater correlation analysis .....	76
Table 4.14 Cross validation of kriging results and observations .....	87
Table 4.15 Groundwater basin of jejudo .....	93
Table 4.16 Groundwater recharge by subwatershed .....	101
Table 4.17 Grid network configuration .....	105
Table 4.18 Grid network configuration .....	110

Table 4.19 Comparison results between observation and computed water level of Pyoseon-Seongsan watershed .....	113
Table 4.20 Comparison results between observation and computed water level of Kujwa watershed .....	116
Table 4.21 Comparison results between observation and computed water level of Deajeong-Andeok watershed .....	120
Table 4.22 Comparison results between observation and computed water level of Hanrim-Hankyeong watershed .....	124
Table 4.23 Comparison results between observation and computed water level of Namwon watershed .....	128
Table 4.24 Comparison results between observation and computed water level of Seogwi watershed .....	132
Table 4.25 Comparison results between observation and computed water level of East Jeju watershed .....	136
Table 4.26 Comparison results between observation and computed water level of West Jeju watershed .....	140
Table 4.27 Hydraulic conductivity results by subwatershed .....	143
Table 4.28 Hydraulic conductivity results by pumping test .....	147
Table 4.29 Hydraulic conductivity results by modeling .....	147

## Summary

The correlation between groundwater level data of Jeju Island and altitude was analyzed. The hydraulic watershed was established based on groundwater surface of the equipotential lines. The 3D numerical analysis model was used to interpret flow characteristics of the watershed, and the results of analyzing hydraulic conductivity computed from the model are as follows.

The range of average annual fluctuation of ground water level in Jeju Island was 0.16 ~ 48.84m. The basal groundwater distribution area was changed to 0.16 ~ 2.73m, the parabasal groundwater area was changed to 0.47 ~ 12.56m and the high level groundwater area was changed to 0.62 ~ 48.84m.

Based on analysis of the correlation between altitude and groundwater level for every 100m of altitude, the value of  $R^2$  was 0.1653 ~ 0.8011. There was no clear correlation between altitude and groundwater level. Especially, the eastern and western areas showed an inversely proportional relationship between altitude and groundwater level. Only a portion of the southern and northern areas showed the inversely proportional relationship.

The Kriging technique was used to analyze underground water level data and construct the equipotential lines for all areas of Jeju Island. Eight groundwater watersheds were established by considering the direction of groundwater flow, positions of groundwater level observation wells and long and short axes of the watersheds.

Groundwater recharge considering rainfall characteristics, hydraulic conductivity of each spot and observation data were supplemented for the groundwater watersheds to perform 3D numerical analysis. The groundwater flow simulation showed RMSE of 0.554 ~ 6.177 and the direction of groundwater flow was similar to the equipotential lines, increasing reliability of flow analysis.

Based on analysis of hydraulic conductivity distribution according to the results of the groundwater flow simulation in all areas of Jeju Island, hydraulic

conductivity was 100m/d or above in the coastal area and 1 ~ 45m/d in the upstream area. Especially, hydraulic conductivity was 500m/d or above in the lowlands of the eastern area, and it was relatively high in some northern and southern areas. Such characteristics were found to be related to distribution of the equipotential lines and type of groundwater occurrence.



# I. 서론

## 1. 연구배경

제주도는 해양성 기후의 영향과 지형적인 강우특성으로 인해 연평균 강수량은 2,061mm로서 우리나라 최다우지역이지만 대부분의 하천은 건천의 형태로 유지되어 지표수를 활용한 수자원 확보는 매우 어렵다(Jung과 Yang, 2009). 그러나 화산활동으로 투수성이 높은 지질특성을 가지고 있어 강수발생 시 대수층으로 유입되는 지하수 함양량은 약 44.5%로서 제주도의 주요한 수자원으로 이용된다(제주특별자치도, 2013).

제주도의 수자원 개발은 1953년에 용천수를 이용하는 금산수원 개발을 시작으로 하여 1961년에는 도내 최초로 지하수 심정굴착에 의한 지하수를 이용하였으며 1967년 약 10만 $m^3$ 의 어승생 수원지를 건설하였다. 1970년부터는 용천수를 활용한 상수원을 본격적으로 개발하였으며, 지하수 관정개발 사업 또한 활발하게 추진되었다. 2000년에는 동부(조천-구좌-성산-표선-남원-서귀포)지역의 광역상수도 1단계사업과 2008년에 서부(애월-한림-한경-대정-안덕-서귀포)지역을 급수대상으로 하는 광역상수도 2단계 사업이 완료되어 오늘에 이르고 있다(제주특별자치도와 제주연구원, 2017).

2016년 말 기준 제주도의 지하수 개발·이용 관정은 4,865개소이며, 전체 수자원의 97% 이상을 지하수로 이용하고 있다. 제주도에서는 지하수를 체계적으로 관리하기 위해 1991년 제주도개발특별법을 제정하고, 지하수 굴착 및 이용허가제 도입, 지하수 원수대금 부과·징수제 도입 등 우리나라 최초로 지하수 개발·이용허가 제도를 도입하였다. 1993년에는 이미 개발된 지하수관정에 대하여 양성화를 통해 지하수의 이용을 허가하였으며, 1995년에는 지하수 영향조사 제도를 도입하였다. 2000년에는 제주도개발특별법 개정에 따라 지하수 이용기간 연장허가제를 도입하고, 지하수 개발·이용허가제한 확대, 지하수자원보전지구, 지하수자원특별관리구역 지정제도 등을 도입하였다. 2006년에는 제주특별자치도 설치 및 국제자유도시 조성을 위한 특별법

을 제정하면서, 지하수를 공공의 자원으로 규정하고, 지하수 관측정 설치·운영 및 단계별 조치사항을 도입하였다(제주특별자치도, 2013).

최근 제주도는 인구와 관광객의 급증으로 주택건설 및 관광단지 등의 개발 사업에 의해 물수요량이 급증하여 지속적으로 신규 지하수가 개발되고 있다. 2017년의 인구는 678,772명으로 2013년 대비 12.25%가 증가되었고, 2016년 관광객 수는 15,852,980명으로 2013년 대비 46.09%증가하였으며, 2016년의 건축물 허가 건수는 21,596건으로 2013년 대비 342.3%증가하였다(제주특별자치도, 2017; 2018).

신규 지하수를 개발하기 위해서는 주변 환경에 미치는 영향을 평가하는 지하수 영향조사서를 작성하여 지하수관리위원회의 심의를 받도록 하고 있다. 보고서에는 지형 및 지질 등 일반현황 뿐만 아니라 수리모형을 기반으로 영향분석을 실시하도록 하고 있다. 지하수는 흐름과 함양량 등이 외부로 노출되지 않아 시각적으로 확인이 불가능한 현상으로 대수층 및 수리특성, 부존 특성 등을 정확하게 파악하기에는 한계가 있다. 따라서 2013년부터는 지하수 개발에 의한 주변 환경에 미치는 영향을 평가하기 위해 3차원 수치해석 모형을 적용하여 지하수 개발에 따른 영향분석을 권고하고 있다(Park 등, 2016). 2013년부터 2017년까지 지하수개발·이용 허가를 위해 작성된 지하수 영향조사보고서는 100건 이상으로 지하수 모형을 이용하여 개발예정지의 수위변동과 유동분석, 포획범위 분석 등 부정류 해석이 수행되었다.

지하수 해석을 위해서는 기본적으로 분석지역의 경계, 수리전도도, 함양조건, 관측자료 등 다양한 인자들을 고려하고, 이러한 요소들을 모델에 매개변수로 입력(Input)하여 개념모델(conceptual model)을 구축한다(Ko, 2015). 특히, 개념모델 수립 단계에서 분석지역의 경계조건의 설정은 가장 중요한 요소이며, 수리전도도는 지층의 투수성 정도를 나타내는 계수로 지하지질구조에 따라 달라지는 인자이다(Feanke et al., 1987; Franke and Reily, 1987).

제주지역의 지하수 해석을 위한 유역경계는 지표유역으로 구분된 16개의 소유역으로 적용되고 있다(제주특별자치도, 2003). 그러나 제주지역은 지역별 표고와 지하수위간의 일정한 관계를 찾기 어려울 정도로 대수층의 수리적 차이가 크게 발생하고(Choi, 1999), 일부지역에서는 표고와 지하수위가 반비례적인 경향을 보이므로 표고에 따른 지하수위 분포에 대한 관계해석이 필요하다. 또한 수리전도도의 경우 분석결과의 신뢰성 확보를 위해 양수시험을 통해 산출된 결과를 이용하여 유역의 대표값으로 적용되고 있다. 제주지역의 수리전도도는 공간적으로 비균질적인

(heterogeneity) 특성이 나타나지만, 소수의 결과를 면적단위로 적용되기 때문에 분석 결과에 대한 신뢰성이 낮아지는 문제가 발생하고 있다(Park 등, 2016).

### 3. 연구동향

제주도는 주요 수자원을 대부분 지하수를 이용하고 있어 지하수에 관한 연구는 비교적 많은 전문가들에 의해 진행되었다. 지하수를 효율적으로 보전·관리하고, 지속가능한 자원으로 이용하기 위해서는 지하수의 수리특성과 자연 현상에 대한 정확한 이해가 필요하다. 제주지역의 지하수위특성과 수리특성 연구, 지하수위 예측 및 지하수 유동 해석 등의 정확성·적용성을 향상시키기 위한 다양한 연구가 수행되었다(Choi, 1999; Na 등, 2007; Park 등, 2011; Song 등, 2013; Ahn 등, 2016; Park 등, 2016).

지하수위 변동 및 예측에 대해 Yun 등(2006, 1994)은 제주도 서귀포층의 지하분포특성에 따른 지하수위와 지하수 부존특성과의 관계를 분석하였으며, Kim 등(2011)은 지하수 관측정 및 지하수관정 등 203개소의 지하수공의 수위자료를 이용하여 제주도의 저투수층 출현고도와 지하수위 상관성을 분석한 바 있다. Park 등(1994)은 제주도의 지하수위 변동특성이 자연적인 요인으로 강우량과 해양조석에 의한 지배적 영향으로, 강우지배형, 조석지배형, 강우와 조석의 혼합형으로 분류·해석하였다.

Song 등(2012, 2013)은 제주도에서 운영 중인 지하수위 관측정의 시계열자료를 활용하여 강수에 의한 영향, 강수와 양수에 의한 영향, 특별한 요인이 없는 경우로 구분하였고, 강수량과 조석변동에 의한 상관성을 통해 계절별 수위 변동특성을 분석하였다. 또한 Song 등(2014)은 강수에 의한 영향을 받는 관측정의 지하수위 자료를 이용하여 지하수계의 가뭄 영향 평가를 수행하였다. Park 등(2011)은 강수에 의한 지하수위 변동분석을 통해 지하수의 함양부피를 산정하였으며, Jung 등(2016)은 제주도 지하수위 관측정 61개소를 대상으로 인공신경망 알고리즘을 이용하여 강수

량 변화에 따른 지하수위 장기예측을 하였다.

지하수위 분포의 예측에 대한 연구로 Park 등(2002)은 터널구간의 지하수 유동분석을 위해 지구통계학적 기법인 Kriging기법을 이용하여 지하수위 분포를 추정하였고, Oh 등(2016)과 Ahn 등(2016)은 제주지역 지하수위 미계측 지점에 수위분포를 추정하기 위하여 지하수 관측정의 지하수위를 Cokriging기법에 적용하여 산출하였다. 제주도(2003)는 풍수기와 갈수기의 지하수위 분포도를 파악하기 위해 Kriging기법과 Cokriging기법을 적용하였으며, 지하수위 관측정이 많은 지역의 경우 두 가지 방법이 큰 차이를 나타내지 않았으나, 동부지역의 경우 Cokriging을 적용하여 등수위선을 작성하였을 경우 지형에 의한 영향이 과다하게 고려되어 수위분포가 왜곡되어 나타난다고 제시하였다. Kim 등(2016)은 제주도 대정유역을 대상으로 Kriging기법을 적용하여 등수위선을 구축하고, 지점별 지하수위를 추정하여 지하수 모델링의 검증자료로 활용하였다.

지하수 유동해석에 관련된 연구는 국내외 많은 연구자들에 의해 활발히 진행되고 있다. Hubbert(1940)의 지하수 유동 이론은 지하수 유동모델의 이론적 접근의 시초이며, Toth(1963)는 지하수 유동의 이론적인 해석을 소유역의 배수유역을 대상으로 수행하였다. Freeze and Witherspoon(1963)은 비균질적이고, 이방등성 현상이 나타나는 유역을 대상으로 수학적 모형을 적용하여 정상류상태의 지하수흐름을 연구한 바 있다. Freeze(1971)는 소규모의 가상유역을 대상으로 지표의 경계조건을 포함하여 3차원 유한차분 모형을 개발하였고, Gupta et al(1976)은 3차원 유한요소 모형을 개발하기 위해 유역의 규모가 크고, 다층구조의 대수층을 적용하는 연구를 수행하였으며, Dreher and Gunathilaka(1996)는 Austria Vienna의 Danube river에 설치된 Freudenua 보의 지하수위 조절 등 관리에 관한 연구를 수행하였다.

국내 연구로는 Kim(1976)의 반야월층의 지하수 운동에 관한 연구를 진행한 바 있으며, Ahn과 Kim(1982)은 동위원소를 이용한 한강 유역 내 지하수와 지표수의 연관성에 대하여 연구를 수행하였다. Ko(1985)는 제주지역의 지하수 부존형태 특성과 지하수위의 변동에 관한 연구, 지하수 수질오염 예측에 관한 연구를 하였으며, Bae(1992)는 대구지역 대상 하천수와 지하수의 연계에 따른 지하수의 변동을 유한차분법으로 해석하였고, Kim(2001)은 2차원 지하수 유동해석모형인 Winflow모델에 유한요소법을 포함시 청하면 유역에 적용하였다. Yung(2003)은 유한요소법을 이용하여 부정류상태의 1차원 피압대수층 모델을 가정하고 급변하는 수두변화에 의한

수위변화를 모의하였으며, Jung(2003)은 MODFOLW모형을 이용하여 Grid-Cell Size에 따른 지표수와 지하수 간의 유동특성을 연구하였다. Kim 등(2006)은 준분포형 장기유출모형의 SWAT과 3차원 지하수 모형의 MODFLOW를 결합한 SWAT-MODFLOW 모형을 개발하였고, 지표수와 지하수를 통합적으로 연계·해석하였다. Yun(2007)은 내륙지역 유역의 지형특성을 고려하여 장기적으로 모의가 가능한 SWAT-MODFLOW 모형의 개발과 짧은 시간 간격에 대한 연속분석이 가능하도록 모형의 적용성을 확장하였다.

Jung(2008)은 제주도 서귀포시를 대상으로 WMS와 GMS 모델을 이용하여 양수 기간에 따른 지하수위 변동특성을 분석하고 유동특성을 해석한 바 있으며, Choi(2008)는 제주도 천미천을 연구유역으로 유한차분법을 이용하여 지하수 양수량에 따른 지하수위의 거동에 대하여 연구하였다. Lee(2009)는 제주도 표선유역의 지하수 유동특성을 해석하기 위해 SWAT과 연계하여 함양량을 산정하고, 양수 기간에 따른 지하수위 분포 및 지하수 유동해석을 수행하였으며, Lee(2011)는 서귀포시 대상 지하수 유동해석, Choi(2011)는 해안 저지대 지역의 지형 특성을 고려한 유동을 해석한 바 있다. Kim(2009, 2013)은 SWAT-MODFLOW 연계모형을 이용하여 제주도심지 및 표선유역을 대상으로 지표수와 지하수를 연계하여 통합적으로 해석하였으며, Ahn 등(2013)은 제주도 해안지역과 중산간지역을 대상으로 양수량에 따른 지하수 유동 및 포획구간의 특성변화를 연구한 바 있다. Kim(2014, 2015)은 성산유역을 대상으로 지하수의 유동특성과 지하수 함양에 따른 수리특성을 연구하였으며, Song 등(2015)은 표선유역을 대상으로 지하수 모델링을 적용하여 유출특성을 고려한 물수지 평가를 수행하였다. Ko(2016)는 제주도 중서귀 유역을 대상으로 관측자료 기반 유출특성을 파악하고, 함양량 산정을 통해 지하수 유동특성을 해석하였으며, Park 등(2016)은 제주도 대정유역을 대상으로 수리전도도 적용방법에 따른 지하수 유동결과 평가를 수행한 바 있다.

제주지역의 지하수 유동해석에서는 전체적으로 지표유역을 지하수 유역으로 적용하여 지하수 유동분석을 수행하였다. 그러나 Na 등(2007)은 제주도의 지하수 해석을 위해 적용되는 유역설정은 지표유역을 기준으로 분석되고 있어, 지하수 모델분석의 검·보정 과정과 결과에 대해 면밀한 검토가 필요하다고 제시하였다. 또한 Kim 등(2015)과 Park 등(2016)은 수치해석모형을 통해 산출된 지하수위는 관측수위와 유사할 수 있으나, 유동방향에 대한 결과가 실제 지하수 흐름과 상이하게 분석되므로

지하수 흐름에 대해서도 검·보정이 필요하다고 제시하였으며, Ko(2016)에 의하면 제주지역의 독특한 지하수위 특성으로 인해 동일유역 내에서도 표고와 지하수위가 상반된 결과가 나타나고 있어 지하수 유동해석의 검·보정에는 한계가 있다고 제시하였다.

수리전도도를 적용함에 있어서도 표고기준으로 유역을 세분화하여 단일 값을 면적단위로 적용하였다. 그러나 Choi(1999)는 제주지역의 경우 지역에 따라 표고와 지하수위간의 일정한 관계를 찾기 어려울 정도로 수리특성의 차이가 크게 난다고 제시하였다. Kim 등(2014)과 Ko(2016), Park 등(2016), Kim 등(2017)에 의하면 제주지역의 수리전도도는 공간적으로 비균질적인 특성을 보이고 있어 지하수 유동특성 해석 시 수리전도도를 지점단위 및 셀 단위로 구분하여 상세하게 적용하여 개선할 필요가 있다.

## 2. 연구목적

수문학적 유역은 지표의 표고에 의해 강우 시 유출수가 하천으로 모여드는 주변 지역을 의미하고 있지만 지하수의 유역은 하천과 관련된 유역면적과 지하수가 유입되는 범위가 반드시 일치하지 않을 수도 있다(<http://www.water.or.kr>). 특히, 유역 경계의 분수계는 지표수 분수계와 지하수 분수계로 구분이 되지만, 지하수 분수계를 결정하는 것은 수문지질 분포에 따라 다양한 흐름을 보일 수 있기 때문에 매우 어렵다(Kim, 2011).

제주도(2003)는 제주지역의 지하수 관리유역을 구분하기 위해 지하수 부존형태, 수문지질단위 분류, 대수층 수리특성 등을 조사·분석 한바 있다. 그러나 수문지질학적 방벽의 분포를 구분하고 지하수의 분수령을 세분화하기에는 한계가 있어 제주도는 우리나라 내륙지역과 같이 DEM자료에 의한 지표를 기준으로 4개의 중유역(동부, 서부, 남부, 북부)과 16개 소유역(조천, 구좌, 동제주, 중제주, 서제주, 성산, 동서

귀, 중서귀, 서서귀, 표선, 안덕, 대정, 한경, 한림, 애월, 남원)으로 구분하고 있다. 또한 이들 소유역은 편의상 행정구역을 감안하여 다시 4개의 중유역(동부, 서부, 남부, 북부)으로 통합하여 구분하고 있다.

소유역 경계는 인접 유역에서의 유입 또는 유출이 발생되지 않는 경계선을 말하며, 지하수 유역을 지표수 유역과 동일하게 적용한다는 것은 유역간의 지하수 유·출입이 발생되지 않는 것으로 전제로 하고 있다. 따라서 모델분석 시 소유역 경계를 적용할 경우 타 유역으로의 유·출입이 제한된다.

모델링 프로그램에 유역 경계를 설정할 경우 지표의 경계 또는 함양경계 등 적용되는 인자의 경계설정 여부에 따라 지하수 흐름이 발생되며, 지하수 해석을 위한 유역경계의 기준이 정확히 정립되지 않을 경우 실제 흐름과 상이한 결과를 보일 수 있다(Kim 등, 2015; Park 등, 2016). 또한, 모델링 검증은 연속적으로 관측된 지하수위 자료의 평균값을 기준으로 수행되며, 모델분석 결과에 따라 수리전도도가 산출되는데, 유역설정이 잘못된 경우 분석결과의 신뢰도는 낮아질 수밖에 없다(Kim 등, 2016).

이 연구에서는 제주도 지하수의 수리학적 유역설정에 따른 지하수 유동의 특성을 규명하고자 한다. 지하수위 자료와 표고와의 상관성을 검토하기 위해 지하수 관정과 관측점의 지하수위 자료를 분석하고, 해안거리(해안거리에서부터 관측지점까지의 거리)와 표고와의 상관관계분석, 해안거리와 지하수위의 상관관계분석, 고도별 지하수위와 표고의 상관관계를 분석하였다. 제주도 전역에 대한 등수위선을 구축하기 위하여 지점별 지하수위 자료를 공간보간기법에 적용하고, 작성된 등수위선을 검정하였으며, 지하수 등수위선의 지하수면을 기준으로 새로운 지하수 유역을 구분하여 설정하였다. 수리학적 특성에 기반한 지하수 유역과 강수특성을 고려한 지하수 함양량, 등수위선 DEM자료를 이용한 관측자료 보완, 지점별 수리전도도 등을 지하수 수치해석 모형에 적용하여 지하수 유동특성을 분석하였다. 특히, 지점별 지하수위 관측자료와의 비교·검토, 지하수 등수위선과의 방향성을 검토하여 수치해석 모델 결과의 신뢰도를 향상시켰으며, 모델에서 산출된 제주도 전역의 수리전도도 분포와 지하수위의 등수위선 및 지하수 부존형태와의 관계를 해석하였다.

## 4. 연구 자료 및 방법

제주도 전역을 대상으로 지하수위 분포특성과 표고와의 상관성을 비교·분석하고, 지하수 등수위선 구축과 지하수 유역 경계 설정, 지하수 유동특성 해석 등을 수행하기 위해 Fig. 1.1의 흐름에 따라 연구를 수행하였다.

제주도 전역에서 개발된 4,865개소의 지하수 관정에 대하여 연도별 개발특성, 월별 개발특성 등을 분류하고, 지하수 관정 개발 당시 측정된 지하수위 자료를 분석하였다. 또한 2016년까지 제주도에 설치된 133개소 관측정의 지하수위자료(관측일로부터 2016년 말까지)를 수집하여 연도별 수위특성, 월별 수위특성, 관측기간에 따른 수위특성 등을 분석하고, 본 연구에서의 활용 가능한 지하수위 자료를 검토하였다.

지하수 유동특성 해석 시 통용되고 있는 표고 기준 지표수 유역의 적용가능성 검토를 위해 지하수위 자료와 표고와의 상관분석을 수행하고, 지역별로 표고와 지하수위 특성을 비교·분석하였다. 또한 지역별 지하수위 결과를 공간보간기법에 적용하여 제주도의 지하수 등수위선을 구축하고, 등수위선의 신뢰성 검증을 위해 교차타당성 검정과 그래프 검정을 수행하였으며, 작성된 등수위선은 지하수 유역의 경계기준을 설정하는 지표로 활용하였다.

지하수 수리학적 특성에 기반한 지하수 유역을 3차원 수치해석모형[GMS (Groundwater modeling system)-MODFLOW]에 적용하여 지하수 유동특성 해석을 수행하였다. 수치해석을 위한 개념모델 입력 인자로는 유역경계, 지하수 함양량, 관측수위, 수리전도도 등으로 지하수 함양량은 제주도에 71개소의 강우관측소(기상청-종관 4개소, 방재 20개소, 재난안전대책본부-47개소)의 강수량 자료를 이용하여 등우선도를 작성하고, 평균 지하수 함양률 44.5%를 적용하여 소유역별 함양량을 산정한 후 모델에 적용하였다. 유역별 소수의 지하수 관측 자료를 보완하기 위해 지하수 등수위선을 수치표고모델[DEM(Digital Elevation Model)]로 분석하여 일정간격에 따라 지점별 지하수위를 추출한 후 모델의 검·보정 자료로 활용하였다. 또한 공간적으로 비균질적인 특성을 나타내는 수리전도도의 경우 지점단위로 적용하였으며, 유역별 지하수 유동특성 해석을 통해 산출된 수리전도도를 통합하여 제주도의 수리전도도 분포도를 작성하였다.



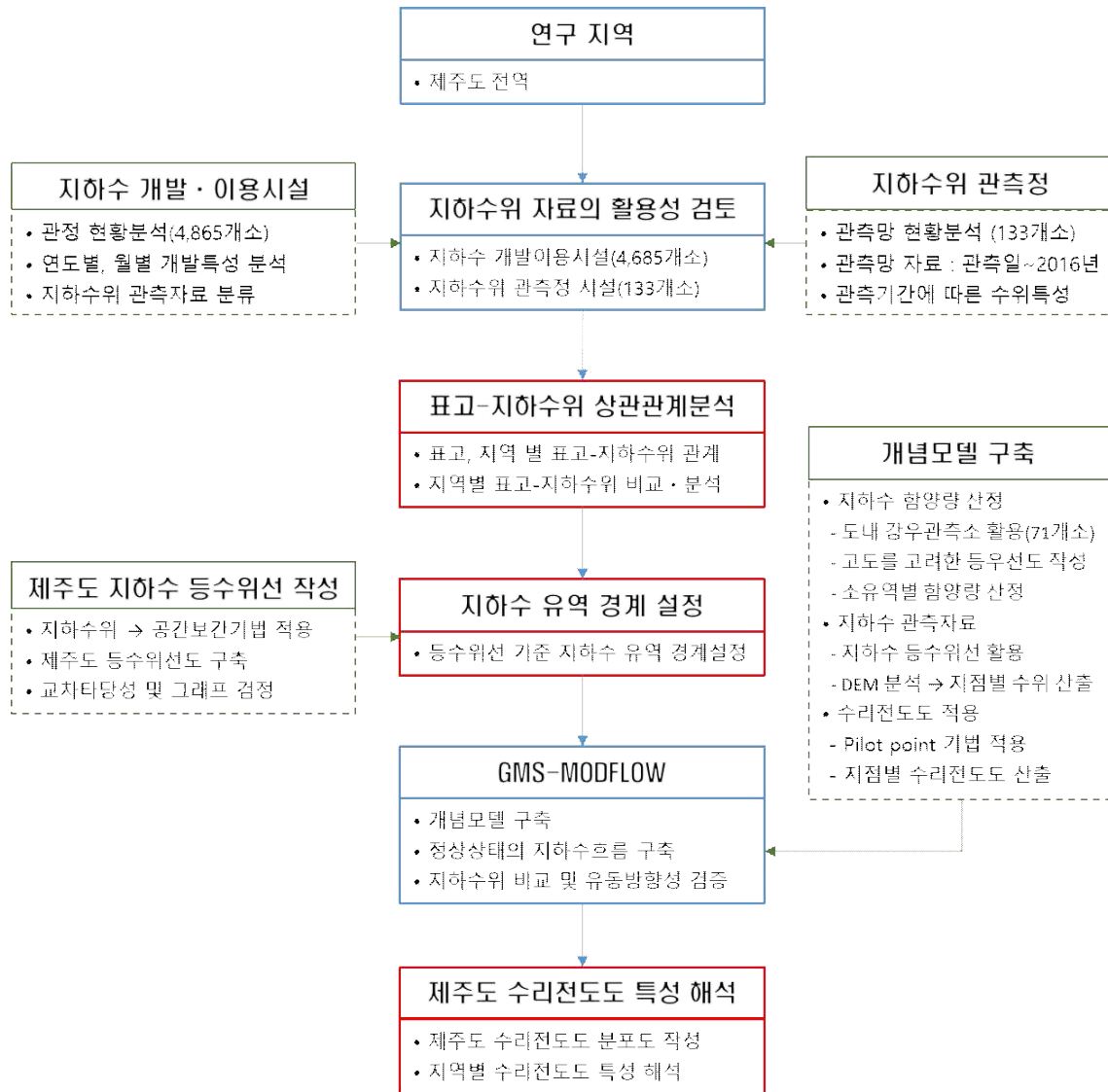


Fig. 1.1 Flow chart on the study

## II. 이론적 배경

### 1. 지하수위 측정의 공간보간법(Spatial Interpolation)

공간분포에 대한 통계자료가 필요할 때 가장 정확한 방법은 모든 지역에서 알고자 하는 자료를 관측·측정하여 직접 취득하는 것이다. 그러나 모든 지점에서의 값을 알고자 하는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 특정지점을 선정하여 관측 값을 획득한 후 관측된 데이터를 이용하여 공간적인 분포를 구축하고, 미계측·미측정 지점의 값을 예측하는 방법이 활용된다.

공간분석(spatial analysis)은 거리, 면적, 연결성, 인접성 등 인자들의 위치정보를 공간적으로 표현하기 위한 방법으로 공간적인 분포특성이 유사한 관측자료를 이용하여 분석된다. 공간분석은 기본적으로 거리에 상관성을 두어 관측지점 자료위치에 따른 상관관계가 형성되며, 미관측 지역의 값을 추정하거나 모형을 구축하는데 자료간의 공간적 상관관계가 반영될 수 있어야 한다.

공간분석 방법 중 공간보간법(spatial interpolation)은 실제 관측된 값들을 이용하여 미지의 값을 예측하는 방법이다. 지형 특성과 같이 연속적인 면의 특성을 보이는 공간분포를 도면화하기 위해서는 한정된 지역에서의 점단위로 측정된 관측 자료를 활용하여 미계측된 지역까지 전체 영역의 지형분포를 추정·예측한다. 공간보간 기법은 관측자료를 어떠한 방법으로 적용하여 분석하였는지에 따라 분석방법이 나누어지고, 관측지점과 거리간의 공간적 분포와 상관도 등에 따라 다양한 매개변수를 적용할 수 있다. 공간보간법은 공간추정, 공간예측 또는 내삽법(Interpolation)으로도 구분되며 분석영역의 공간에 존재하는 다양한 관측 값 활용하여 새로운 결과물을 도출하거나 관측을 통해 확인된 지점의 값이나 속성 값을 이용하여 미지점의 값을 추정하는 것이다. 대표적인 공간보간법은 Kriging, Inverse Distance Weighted(IDW), Spline 방법이 있다.

## 1.1 Kriging

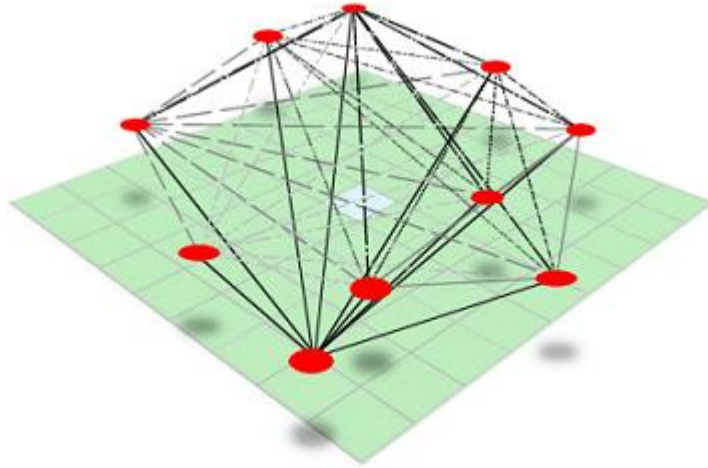
크리깅(Kriging) 공간보간법은 관측지점의 공간거리를 고려하여 변화하는 비율로 어떠한 특정 지점에서의 데이터 값을 추정할 수 있는데, 미지의 특정 지점의 값은 주변에 분포하고 있는 값들과 관계가 있기 때문이다. 즉, 분석영역이나 분석지점에서 관측을 통해 값을 알고 있는 인근지역 결과의 가중 선형 조합으로 예측·분석 되는 방법으로, 추정식이 편향되지 않도록 결정하기 위해 가중치는 예측오차를 최소화 한다. 이를 위해 공간적으로 상관관계를 나타내는 Variogram이 사용되며 분리 거리에 따라서 공분산을 계산한다.

크리깅 기법을 이용하여 공간 통계적 모형을 분석하기 위해서는 관심 있는 변수에 대한 표본공간을 정의하는 것이 필요하다. 표본공간의 경우 정상성(stationarity)을 가져야 하고, 비정상성일 경우 변화양상을 고려하여 비정상성에 적절한 모형을 연구해야 한다. 정상성은 시계열 모형을 고려하는 관점에서 적용가능한 시계열 모형이 다양하기 때문에 시계열 모형 중에서 어떤 특정한 성질을 갖는 일부만을 고려 하자는 취지에서 나온 개념이 정상성 개념으로, 이러한 정상성 개념을 만족한다는 것은 공간데이터는 추세가 없고, 공분산은 거리  $h$  에만 의존하는 함수라는 것이다 (Choi, 2008).

크리깅 예측을 위해 정의된 표본공간 내에서 얻을 수 있는 모든 자료를 얻어 경험적 Variogram을 계산한다. Variogram은 일정 거리에 있는 결과들의 유사성을 나타내는 기준으로 일정간격만큼 차이를 보이는 자료들 간의 차이를 제공한 것의 기댓값이다. 거리가 가까울수록 자료간의 차이는 유사하므로 Variogram은 작게 나타나고 거리가 길어질수록 Variogram은 크게 나타난다.

경험적 Variogram이 계산되면 이를 가장 잘 묘사할 수 있는 이론적 Variogram을 구한다. 최종적으로 결정된 이론적 Variogram과 관측된 결과값을 이용하여 크리깅 모형으로 미계측 지점에서의 공간예측 값을 생성하고 예측오차를 파악·검증한다.

지구통계학적 방법 중에서도 최선의 선형불편추정자(Best linear unbiased estimator)인 크리깅기법은 1960년 말에 개발되어 현재는 자료의 형태 및 유형에 따라 선택이 가능한 다양한 종류의 방법들이 개발되어 있다. 특히, 어떠한 형태의 관측 값이더라도 가장 신뢰할 수 있는 결과를 예측하는 것으로 알려져 있으며, 지질학 등의 분야에서 활발하게 사용된다.



<http://www.geography.hunter.cuny.edu>

Fig. 2.1 Conceptual diagram of Kriging

### 1.1.1 Simple Kriging(SK)

크리깅은 관측된 값을 이용하여 가중선형 조합으로 미계측지역의 근사치를 예측하는 방법이다. 가중치는 예측오차를 최소화 하면서 추정식이 편향되지 않도록 결정하는데, 이를 위해서 공간적 상호관계를 나타내는 Variogram이 사용되고, 거리에 따라 공분산이 계산된다. 크리깅 모형으로 미계측지역의 값을 예측하고자 한다면, 반드시 가중치를 알아야 하며, 다양한 가중치 산정방법 중에서도 단순하게 예측오차를 최소로 하는 가중치를 산정하여 미계측지역의 값을 예측하는 경우를 단순크리깅(SK)이라 한다. 관측을 통해 값을 알고 있는  $n$ 개의 자료 값을 활용하여 단순크리깅에 의해 특정지점의 변수  $z$ 의 선형 추정값  $z_o^*$  (식 1)과 오차분산(식 2)은 다음과 같다.

$$z_o^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \quad (1)$$

$$\sigma_{SK}^2 = E[(z_o - z_o^*)^2] \quad (2)$$

여기서  $z_o^*$ 는 단순크리깅(SK)에 따른 예측값,  $z_o$ 는 예측하고자 하는 지점의 참값  $i=1, \dots, n$ 은  $z_o$ 를 둘러싼 분석영역의  $n$ 개의 측정치,  $\lambda_i$ 는 가중치,  $n$ 은 사용한 자료의 총 개수이다.

$\sigma_{SK}^2$ 은 크리깅 결과의 오차분산이며, 이를 최소로 하는 가중치를 결정한다.  $z_o$ 는  $x_o$ 위치에서의 특성 결과 값으로  $z(x_o)$ 를 단순화 하여 표시한 것이다. 오차분산은 관측값과 예측 값 차이의 제곱에 대한 기댓값으로 가중치의 함수이다. 즉,  $z$ 가 2차정 상성을 가진다고 가정하면  $z^*$ 는 각각  $z_i$ 와 평균값이 동일해 지며, 참값  $z_o$ 에 대해 최소 분산을 갖는다는 두 조건을 만족시키는  $\lambda_i$ (가중치)를 유도한다.

### 1.1.2 Ordinary Kriging(OK)

단순크리깅(SK)은 오차분산을 최소로 하는 가중치를 산정하여 인근지역에 관측된 값들의 선형조합으로 미계측지역의 값을 예측하는 방법이다. 그러나 단순크리깅의 추정식은 편향되기 때문에 추정식의 평균값이 모집단의 평균값과 불일치하게 되는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 개선하기 오차의 분산을 최소로 하면서, 크리깅 추정식이 편향되지 않도록 하는 크리깅을 정규크리깅(OK)이라 한다.

크리깅 이론에 사용된 모든 값들은 실제 관측을 통해 주어진 자료이므로 동일한 평균값을 갖는다. 또한 크리깅 식이 편향되지 않도록 하기 위해서는 가중치의 합이 1이 되어야 한다. 정규크리깅(OK)은 오차의 분산을 최소로 하고, 크리깅 식이 편향되지 않도록 추정치를 만들기 때문에 BLUE(Best Linear Unbiased estimator)라고 한다.

### 1.1.3 Universal Kriging(UK)

크리깅모형 적용 시에 공간적으로 변화하거나 특정한 경향성을 갖는 모형에서 공

간적인 추세를 제거한 후 오차를 통해 공간모형분포를 재구축하는 방법을 일반크리깅(UK)이라 한다. 일반크리깅도 단순크리깅과 마찬가지로 관측된 값들의 선형조합을 이용하여 미계측지역의 값을 예측하는 방법으로 불변성을 만족하지 않고 변화되는 경향성을 고려하기 위한 수학적 기법이 적용된 가장 일반화된 크리깅 모형이다. 평균값이 임의로 변화된다면 이 결과를 기술할 수 있는 실제적인 방법은 전무하다. 그러므로 일반크리깅을 적용하기 위해서는 평균을 정확히 알 수는 없지만 공간적으로 부드럽게 변화된다고 가정한다.

이 방법에서 중요한 점으로는 자료의 값이 위치에 따라 변화되는 경향성을 정확히 알 수는 없지만 그 경향성을 나타내는 함수(functionality)는 알고 있다는 것이다. 일반크리깅 방법은 관측된 자료 값이 일정한 경향성을 나타내는 경우에도 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있지만, 구체적 모델링 분석을 위해 많은 계산시간이 많이 필요로 한다는 단점을 가지고 있다. 또한 결과값의 경향성을 최종적으로 결정하는 데에는 연구자의 주관적인 판단이 필요하다.

#### 1.1.4 Cokriging(CK)

두 가지 이상의 변수를 선형조합을 통해 미계측 지역의 값을 예측하는 크리깅 방법을 Cokriging(CK)이라 한다. 이때 예측하고자 하는 변수를 주변수라 하며, 주변수가 아닌 두 번째 변수를 2차변수라 한다. 이차변수는 다양하게 적용될 수 있으며, Cokriging의 일반식은 다음과 같다(식 3).

$$z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i + \sum_{j=1}^{n_s} \sum_{k=1}^{m_j} \lambda_{jk} u_j(x_{jk}) \quad (3)$$

여기서  $z$ 는 주변수,  $n$ 은 사용된 주변수의 전체 표본수,  $n_s$ 는 사용된 2차변수의 전체 개수,  $u_j$ 는  $j$ 번째 2차변수,  $m_j$ 는  $j$ 번째 2차변수의 전체 표본,  $\lambda$ 는 가중치,  $x$ 는 각 자료의 이치이다. 따라서 주변수 값을 추정하기 위하여서는 총  $(n_s + 1)$ 의 변수와  $(n + n_s * m_j)$ 개의 자료가 사용된다.

공동크리깅은 주변수의 표본수는 적고 이차변수의 표본 수는 많을 때 사용되는 방법으로 대개의 경우 2차변수의 정확도는 떨어진다. 하지만 주변수와 이차변수는 반드시 공간적으로 상호관계가 형성되어야 하며, 공동크리깅을 통해 이차변수들을 적용함으로써 공간적 불확실성을 최소화 할 수 있다. 공동크리깅을 사용하기 위해서는 반드시 각각의 변수들에 대한 Variogram이 필요하고, 주변수와 각각의 이차변수들 사이에는 교차 Variogram이 필요하다. Variogram의 모델 분석에서도 많은 시간과 노력이 필요한데 모든 교차 Variogram을 양의 정부호로 만족할 수 있도록 분석하는 것은 매우 어렵다. 따라서 다양한 이차변수들이 상호관계가 높은 경우를 제외하고는 주변수와 하나정도의 이차변수를 이용하여 분석하는 경우가 대부분이다.

### 1.1.5 Empirical Bayesian Kriging(EBK)

Empirical Bayesian Kriging은 크리깅 기법을 적용하는데 Semi Variogram을 추정하고 보간 하는 지리통계기법이며, Semi Variogram은 지리통계학적 분석에서 관측치 간의 공간적인 특징의 Variogram을 나타내는 그래프이다(Lee와 Son, 2016).

Semi Variogram의 변수는 제한 최우도 방법(Restricted Maximum Likelihood, REML)을 적용하여 일부 데이터로부터 추정된다. 추정된 Semi Variogram을 이용하여 새로운 데이터를 시뮬레이션하고, 시뮬레이션 된 결과를 이용하여 새로운 Semi Variogram을 추정하는 방법이다(Chiles와 Delfiner, 1999).

단순크리깅 및 정규크리깅 등의 일반적인 크리깅 기법에서는 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위해 변수를 조정하여 관측 값과 유사하도록 보정하고, 미지의 값을 예측한다. 그러나 EBK은 시뮬레이션을 통해 변수를 자동으로 보정하여 관측 값과의 높은 상관성을 도출하고, 미지의 값을 예측하여 비교적 신뢰도가 높은 방법이다(Gribov와 Krivoruchko, 2012).

## 1.2 Inverse Distance Weighted(IDW)

역거리가중치 보간법(IDW)은 토블러의 법칙(Tobler's Law of Geography)이 적용된 방법으로 관측된 지점과 관측 지점과 인접지점 사이의 거리에 따라 가중치를 부여하는 내삽방법이다. 특히, 가까이 있는 실측값에 더 큰 가중 값을 주어 선형가중 이동평균을 하여 보간하는 방법으로 거리가 가까울수록 높은 가중 값이 적용된다. 토블러의 법칙은 관측된 지점과 인접한 지점들의 공간특성은 관측된 지점과 멀리 떨어져 있는 지점에 비해 유사성이 크게 나타남을 보여준다. 일반적으로 이 방법의 가중치는 거리의 역수에 대한 거듭제곱이 적용되며, 내삽지점 주변으로 일정한 기준에 따라 내삽 및 연속면 생성한다. IDW의 가장 단순한 형태는 Shepard기법 (shepard, 1968)으로 내삽지점의 값을 도출하는 식은 다음과 같다(식 4).

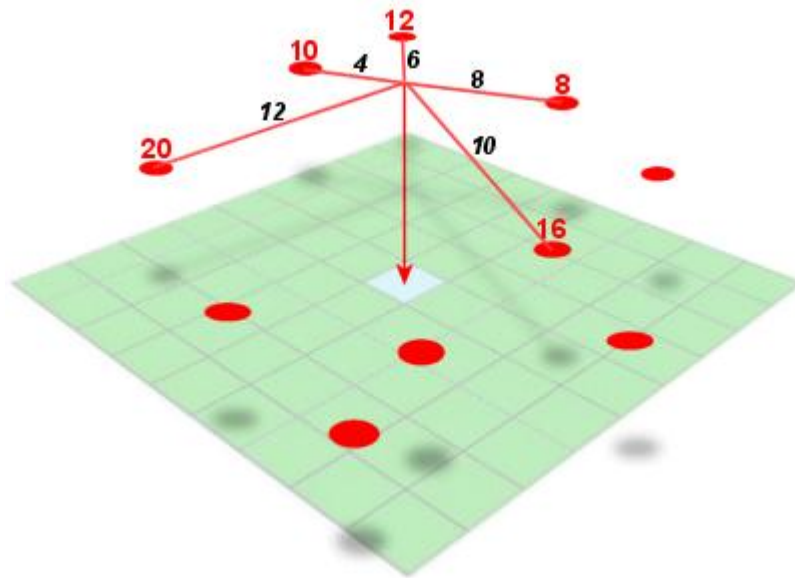
$$\hat{Z}(x_j) = \frac{\sum_{i=1}^n Z(x_i) d_{ij}^{-p}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}^{-p}} \quad (4)$$

여기서  $x_j$ 는 미지점으로 인접한 관측점들을 통해 추정하고자 하는 점,  $x_i$ 는 관측 지점의 관측 값,  $d_{ij}$ 는 내삽지점과 관측지점 간의 거리,  $p$ 는 가중치이다.

IDW는 연구지역 내의 관측 값에 가중치를 거리에 반비례하여 계산하는 보간법으로 계산방법이 다른 공간보간법에 비해 간략하면서도 정확도가 높은 값을 산출할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 보간 수행과정에 입력되는 관측점의 분포도에 따라서 미계측지역의 예측 값이 결정되기 때문에 관측점 수를 어느정도 적용해서 보간하여야 하는지, 관측 지점이 미계측지점에서 얼마만큼 떨어져 있는지 등 입력 변수 값을 선정하는데 어려운 경우가 많으며, 최소값 또는 최대값을 예측하지 않는 한계점이 있다. 따라서 IDW보간법을 적용 시에는 자료의 특성, 관측점의 거리, 관측 자료의 정확도 등 공간보간분석에 영향을 미치는 인자를 고려하여 적절한 표본을 추출하고, 관측값 간의 거리를 설정해야 한다.

특히, IDW는 관측값이 밀집된 경우에 적절한 방법이며 표본의 선형가중조합 (Liner Weighted Combination)으로 임의 지점의 값을 산정하며, 표본에서 거리가 멀수록 결과에 미치는 영향력은 작아진다.





<http://www.geography.hunter.cuny.edu>

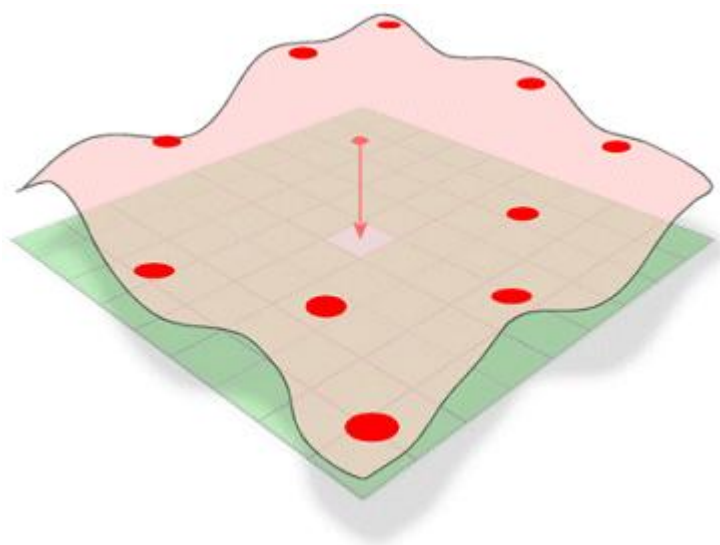
Fig. 2.2 Conceptual diagram of IDW

### 1.3 Spline

Spline기법은 표면의 집합 또는 곡선을 설명하기 위하여 국부적으로 정의된  $p$ 차 다항식들을 기초로 한 공간보간기법으로 다항식들은 관측값에 대하여 서로 접합되어 부드러운 곡선으로 연결되며, 다항식에 대한  $p-1$ 차 도함수는 연속이 된다(Lee, 2017). knot는 부분적 곡선 또는 표면 사이의 연결되는 지점으로 knot는 임의적으로 입력되고 Spline은 자료를 통과하도록 제약조건을 설정할 수 있다. 관측점에서 떨어진 knot를 선택하고 최소제곱법 (least squares) 또는 기타 방법을 이용하여 부드러운 Spline곡선 또는 표면을 생성할 수 있으며, 일반적으로 Spline의 차수 (degree)는 3을 사용하며, 이것을 3차 Spline(Cubic spline)이라고 한다(Webster and Oliver, 2001). 따라서 보간 함수의 첫 번째 미분항이 없을 경우나 계산이 어려울 경우 활용하는

것이 적절하다. Spline보간법은 지역적 또는 부분적으로 급격히 변화하는 함수의 변동에 대해 높은 정확도의 예측 값을 산출되지만 구역별로 데이터에 대한 함수식을 적용하고 있어 하나의 단일함수로 표현은 어렵고, 이에 따라 낮은 차수의 다항식으로 제한된다.

Spline보간법은 전체 구간을 소구간 별로 나누어 저차수의 다항식으로서 완화 표면에 가장 적절하며, 눈에 띄는 급격한 변화를 보이는 표면에 대해서는 보간이 잘 되지 않으며, 선형보간이기 때문에 해안선과 장벽이 있을 시에 보간이 되지 않는다 (Lee, 2017). 또한 Spline보간법은 일반 표면 보간에서 많이 사용되며 최소허용범위에 기초한 선택된 선을 완화하거나 일반화 하는데 사용된다.



<http://www.gisresources.com>

Fig. 2.3 Conceptual diagram of Spline

## 2. 지하수 유동해석 모형

전 세계적으로 사용되고 있는 지하수 수치해석 모형은 MODFLOW, FELOW, MS-VMS, PM, ARGUS, GW-VISTAS 등과 같이 다양한 프로그램이 있으나, 각 모형들은 지역의 수리특성 및 실제 현장의 여건에 따라 개발되고 개선되었기 때문에 각각의 프로그램을 이용하는데 기능상 장·단점이 있다. 다양한 프로그램 중에서도 가장 범용되는 모형은 MODFLOW로 이론의 과학적 타당성과 현장 적용성이 높은 것으로 인정되어 전 세계적으로 많이 사용되고 있다(Han, 1999).

### 2.1 MODFLOW 모형의 개요

GMS(Ground Water Modeling System) 모형은 Brigham Young University's Environ-mental 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 모형이 있다(Lee, 2009).

지하수에 관련된 모델링은 분석구역의 지하수 환경을 근사해로 단순화하여 표현하므로 실제 분석구역의 지하수 유동 및 용질의 이동 등과 관련된 과거 및 현재 상황을 분석하고, 향후 외부의 조건에 의해 예측되는 변화를 예상하는 다양한 과정을 의미한다. 또한, 복잡한 지하수의 흐름과 수문특성, 지하수와 관련한 지화학적 특성 및 오염물질 거동 등에 대한 특성을 단순화한 수학적인 표현이다. 특정 지역 또는 유역에 지하수 모델분석의 목적은 유입, 유출량을 예측하고 분석구역 인근지역에 미치는 영향을 파악하고, 지하 대수층의 시공간적인 수두의 변화량을 모의하고 예측함으로써 이를 사전에 방지하고 최종적으로 지하수의 보전 및 합리적인 관리를 구축하는데 목적이 있다(Jung, 2003).

전 세계적으로 범용되는 프로그램은 MODFLOW으로 1988년 미국지질조사소 USGS(United State Geological Survey)의 Michael McDonald와 Arlen Harbough에 의해 개발되었다. MODFLOW의 특징은 특정 유역의 다공질 포화매체 내에서 정류 및 부정류 상태의 유동해석을 모사하고 2차원 또는 3차원의 지하수 흐름을 모사하

기 위하여 개발되었다(McDonald와 Harbaugh, 1988).

MODFLOW는 특정 유역을 대상으로 가장 발전된 형태의 특징을 모델링 화 할 수 있다. 특히 지하수와 지표수간의 상호작용에 따른 해석과 지하수 양수로 인한 영향 범위 예측, 오염 등에 의한 위험 평가를 위한 잠재 노출 경로 결정 등에 관한 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 물 관리 및 이수분야, 지반공학 분야 등에서 폭넓게 사용 중이다(Lee, 2009).

## 2.2 MODFLOW 모형의 방정식

이 프로그램은 3차원 유한차분법을 통한 지하수 유동 해석모형으로 다양한 수리 지질학적 특성의 구조를 용이하게 구현하여 모의가 가능하며, 결과를 해석하기에도 간단하여 전 세계적으로 많은 연구기관 및 연구자가 사용하는 프로그램이다. 또한 지하수의 유동을 해석하기 위해 개발된 프로그램으로 지하수 유체의 온도와 밀도는 항상 일정한 것으로 가정하고 있다. 지하수 유동을 해석함에 있어 강, 우물, 배수, 증발, 대수층 등의 다양하고 복잡한 경계조건의 영향을 고려할 수 있다. 특히, 지하수 관정에서의 양수, 지하수 정화, 광산 배수 등의 연구에 많이 사용되며, 법률적인 문제 발생 시 신뢰성 높게 활용되는 모형이다. 이 모형은 포화대 내에서의 지하수 유동을 모의하고, 모델의 지배방정식은 3개의 가정으로부터 도출된다.

- 모의영역은 포화대이며 대수층은 다공성 매질로 변형되지 않는다
- 유체는 비압축(incompressible) 상태에 있다.
- 지하수 시스템은 등온 조건아래 있다.

이에 따라, 연속방정식과 Darcy's의 법칙을 통하여 지하수의 유동방정식이 유도되고, 유한 차분화하여 지하수 유동을 모의 한다(식 5).

$$\frac{S}{b} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) \pm Q \quad (5)$$

$K_{ij}$  : 수리전도도

$h$  : 동수두

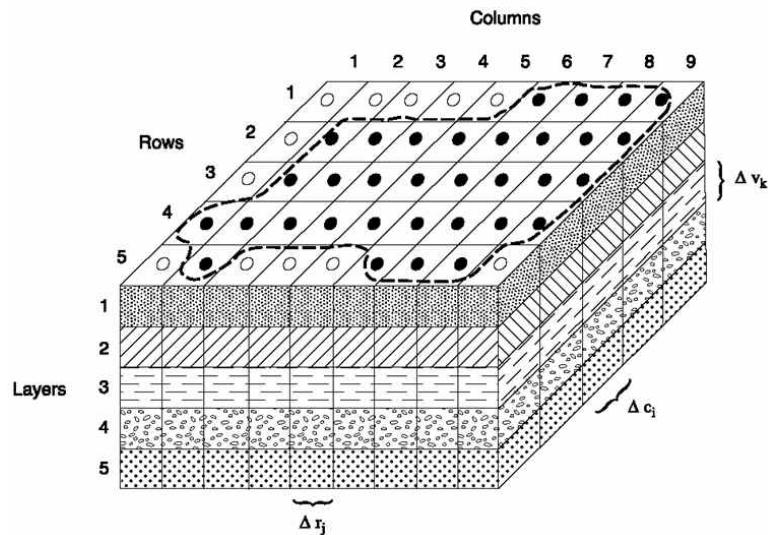
$Q$  : source&sink

$S$  : 저류계수

$b$  : 대수층 두께

시각적으로 판단하기 어려운 지하 대수층 내 유동은 조건에 따라 시·공간적으로 변동 범위가 매우 심하고, 지하수 유동에 미치는 특성인자들이 매우 다양하여 지하수 유동해석에 전체적으로 반영하기에는 매우 어려운 조건이다.

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(Choi, 2010)(Fig. 2.4).



---- 대수층 경계 (Aquifer Boundary)

● 활성화 셀 (Active Cells)

○ 비활성화 셀 (Inactive Cells)

$\Delta r_j$  횡으로 배열된 셀의 크기 (j는 종 방향 Cell 수)

$\Delta ci$  종으로 배열된 셀의 크기 (I는 횡 방향 Cell 수)

$\Delta vk$  수직으로 배열된 셀의 크기 (k는 layer 수)

Fig. 2.4 Mimetic diagram of virtual aquifer

MODFLOW모형은 유한차분법을 근거로 한 모델로써 실제유역에서의 지하수 유동계를 파악하기 위해 사용되었으며, 일정한 밀도를 가지는 다공성매질을 통해 흐르는 3차원 지하수 유동은 비균질, 비등방성 매질에서의 비평형 상태 하에서 지하수 흐름에 관한 편미분 방정식으로 나타낼 수 있다(식 6).

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \frac{\partial h}{\partial z}) \pm W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (6)$$

$K_x, K_y, K_z$  :  $x, y, z$  좌표축에 따른 투수계수 ( $LT^{-1}$ )

$h$  : 수두 (piezometer head :  $L$ )

$W$  : 대수층의 단위체적당 sink/source 유량 ( $x, y, z, t$ )

$S_s$  : 비저류계수(specific storage :  $L^{-1}$ )

$t$  : 시간

식 (6)으로 표현되는 연속지하수 흐름은 시·공간에 의한 불연속점들이 유한집합에 따라 교체되고 부분 도함수들은 점들의 수두차에 따라 계산된 항으로 교체되므로 해석적 값을 얻기가 거의 불가능하다. 이 연구에서는 지하수 유동에 대하여 근사치를 얻기 위해 다양한 수치해석 기법이 적용되므로 유한차분법을 적용하였다. 식 (6)은 연속적 선형 대수 차분방정식 시스템으로 도입하게 되는데, 그 해는 특정 시간 과정에서 수두를 제공한다. 이러한 값들은 흐름의 편미분 방정식의 해석적 해에 의해 주어지게 되는 시변계적인 수두 분포에 대하여 근사치를 구성한다.

유한차분의 지하수 흐름방정식은 각 셀에 유입 및 유출에 대한 모든 흐름의 합은 셀의 내부에서 저울변화율에 대하여 같아야 한다는 연속 방정식으로 정의 할 수 있으며, 지하수 밀도가 일정하다는 가정 하에 셀에 대한 흐름 평형은 연속방정식으로 나타낼 수 있다(식 7).

$$\sum Q_i = SS \frac{\Delta h}{\Delta V} \quad (7)$$

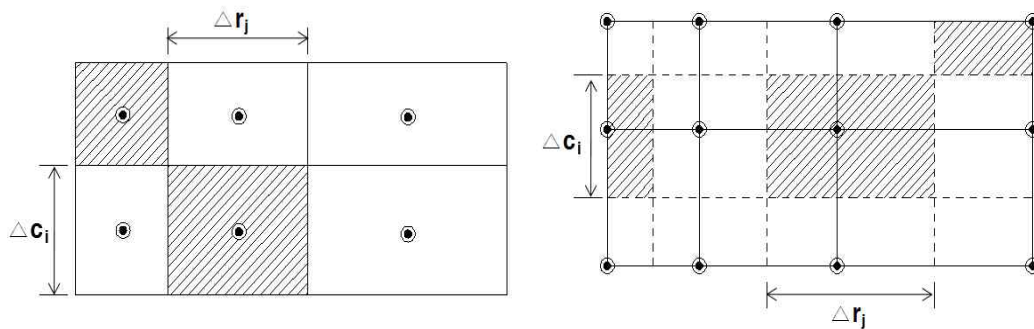
$Q$  : 셀 유입 흐름율 ( $L^3 T^{-1}$ )

$SS$  : 유한차분 형태의 비저류율 ( $L^{-1}$ )

$V$  : 셀 체적 ( $L^3$ )

$h$  : 수두변화량 ( $L$ )

Fig. 2.5는 Block과 Point의 중심격자 시스템의 차이를 도시한 것이며, Fig. 2.6은  $i, j, k$ 셀과 인접한 6개의 셀( $i-1, j, k-1, j, k+1$ )로 나타내었다.



a. Block-Centered Grid System

b. Point-Centered Grid System

- Nodes
- Grid Lines
- Cell Boundaries for Point-Centered Formulation
- /// Cell Associated With Selected Nodes

Fig. 2.5 Block-centered grid and point-centered grid system

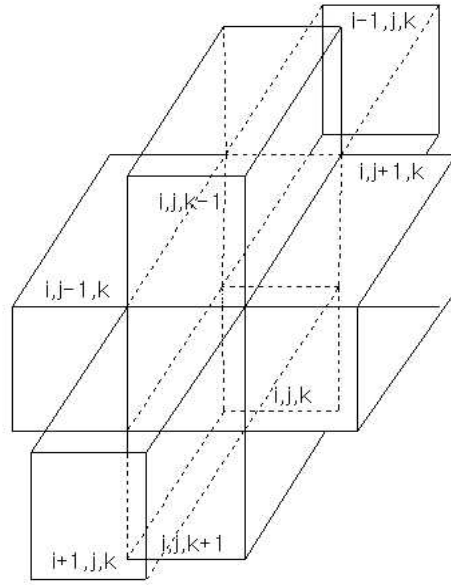


Fig. 2.6 Isometric drawing of core  $i, j, k$  cell and 6 nearby cells

$i, j, k$ 의 셀로부터 수평적인 셀( $i, j-1, k$ )로 이동하는 지하수흐름은 Darcy의 법칙에 의하여 식 (8)로 나타낼 수 있으며, Fig. 2.7로 표현될 수 있다.

$$q_{i, j-1/2, k} = KR_{i, j-1/2, k} \Delta c \Delta V_k \frac{(h_{i, j-1, k} - h_{i, j, k})}{\Delta r_{j-1/2}} \quad (8)$$

$h_{i, j, k}$  : 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



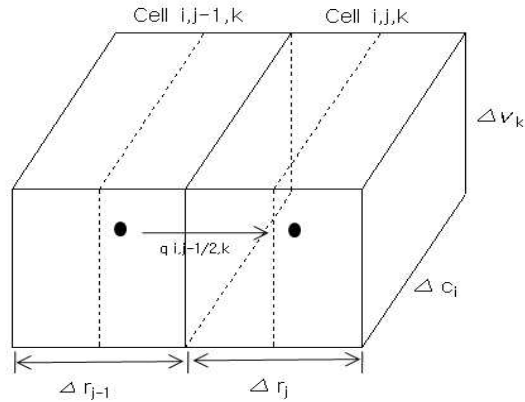


Fig. 2.7 Groundwater flow from  $(i, j, k)$  cell to  $(i, j-1, k)$  cell

$i, j, k$ 셀과  $i, j+1, k$ 셀 사이의 수평적 흐름, 연직방향에 대한 전면과 후면 통한 Block으로의 흐름, 연직방향에 대한 상부와 하단 면을 통한 흐름은 다음과 같다(식 9 ~ 13).

$$q_{i+1/2, j, k} = KR_{i+1/2, j, k} \Delta C_i \Delta V_k \frac{(h_{i+1, j, k} - h_{i, j, k})}{\Delta r_{i+1/2}} \quad (9)$$

$$q_{i+1/2, j, k} = KC_{i+1/2, j, k} \Delta r_j \Delta V_k \frac{(h_{i+1, j, k} - h_{i, j, k})}{\Delta C_{i+1/2}} \quad (10)$$

$$q_{i-1/2, j, k} = KC_{i-1/2, j, k} \Delta r_j \Delta V_k \frac{(h_{i-1, j, k} - h_{i, j, k})}{\Delta C_{i-1/2}} \quad (11)$$

$$q_{i, j, k+1/2} = KV_{i, j, k+1/2} \Delta r_j \Delta V_k \frac{(h_{i, j, k+1} - h_{i, j, k})}{\Delta V_{k+1/2}} \quad (12)$$

$$q_{i, j, k-1/2} = KV_{i, j, k-1/2} \Delta r_j \Delta C_i \frac{(h_{i, j, k-1} - h_{i, j, k})}{\Delta V_{k-1/2}} \quad (13)$$

식 (9 ~ 13)은 수두와 격자차원 및 투수계수의 항에 셀  $i, j, k$ 의 면으로 통하는 흐름을 나타냄으로 격자차원과 투수계수를 하나의 상수로 표현할 수 있다(식 14).

$$CR_{i, j-1/2, k} = KR_{i, j-1/2, k} \Delta C_i \Delta V_k / \Delta r_{j-1/2} \quad (14)$$

$CR_{i,j-1/2,k}$ 는 절점  $i, j-1, k$ 와  $i, j, k$ 사이의 열( $i$ )과 층( $k$ )의 투수량으로, 식 (14)를 식 (8)로 치환하면 다음과 같이 나타낼 수 있다(식 15).

$$q_{i,j-1/2,k} = CR_{i,j-1/2,k}(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) \quad (15)$$

이에 따라 식 (2.5~2.9)는 다음과 같이 나타낼 수 있다(식 16 ~ 20).

$$q_{i,j+1/2,k} = CR_{i,j+1/2,k}(h_{i,j+1,k} + h_{i,j,k}) \quad (16)$$

$$q_{i-1/2,j,k} = CR_{i-1/2,j,k}(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \quad (17)$$

$$q_{i+1/2,j,k} = CR_{i+1/2,j,k}(h_{i+1,j,k} + h_{i,j,k}) \quad (18)$$

$$q_{i,j,k-1/2} = CR_{i,j,k-1/2}(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) \quad (19)$$

$$q_{i,j,k+1/2} = CR_{i,j,k+1/2}(h_{i,j,k+1} + h_{i,j,k}) \quad (20)$$

여기서, 투수량은 식 (14)의  $CR_{i,j-1/2,k}$ 을 사용할 수 있으며, 식 (16 ~ 20)은 6개의 인접한 셀에서 부터 셀  $i, j, k$ 로 흐름을 나타낸다. 증발산이나 우물, 배수구 지역함양 등 지상에서 대수층으로 유입되는 흐름에 대하여 형상에서부터 과정까지 밝히기 위해서는 부가적인 항들이 요구된다. 이러한 흐름은 유입 셀의 수두에 의존하게 되며, 다른 대수층의 모든 수두에 대해서는 독립적이거나 전적으로 유입 셀의 수두에 대해 독립적일 수 있으며, 외부로부터 대수층의 흐름은 다음과 같다(식 21).

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n}h_{i,j,k} + q_{i,j,k,n} \quad (21)$$

$a_{i,j,k,n}$ 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 22).

$$a_{i,j,k,1} = q_{i,j,k,1} \quad (22)$$

하천과 대수층이 연결된 경우 침투(n=2)에 대한 함양은 다음의 식으로 해석한다 (식 23).

$$a_{i,j,k,2} = CRIV_{i,j,k,2}(R_{i,j,k} - h_{i,j,k}) \quad (23)$$

$R_{i,j,k}$  : 하천의 수위

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

$CRIV$ 는 하상의 수직적 수리전도도로 식 (23)은 다음과 같이 정리된다(식 24).

$$a_{i,j,k,2} = -CRIV_{i,j,k,2}h_{i,j,k} + CRIV_{i,j,k,2}R_{i,j,k} \quad (24)$$

여기서, 하나의 셀에 영향을 미치는 N개의 외부 유원이나 응력이 있다면 조합과 흐름(combined flow)은 다음과 같이 나타낼 수 있다(식 25).

$$QS_{i,j,k} = \sum_{n=1}^n a_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^n p_{i,j,k,n}h_{i,j,k} + \sum_{n=1}^n q_{i,j,k,n} \quad (25)$$

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 26).

$$QS_{i,j,k} = p_{i,j,k}h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} \quad (26)$$

외부 흐름을 QS와 6개의 인접한 셀 흐름으로부터 식 (19)를 셀  $i, j, k$ 에 적용하면 지하수 유동은 다음과 같다(식 27).

$$\begin{aligned}
& q_{i,j-1,k} + q_{i,j+1/2,k} + q_{i-1/2,j,k} + q_{i+1/2,j,k} + q_{i,j,k-1/2} + q_{i,j,k+1/2} + QS_{i,j,k} \\
& = SS_{i,j,k} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k
\end{aligned} \tag{27}$$

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 (16 ~ 20) 및 식 (27)은 셀  $i, j, k$  에 대한 유한차분근사를 위해 다음과 같이 나타낼 수 있다(식 28).

$$\begin{aligned}
& CR_{i,j-1/2,k}(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) + CR_{i,j+1/2,k}(h_{i,j+1,k} + h_{i,j,k}) \\
& + CC_{i-1/2,j,k}(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) + CC_{i+1/2,j,k}(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) \\
& + CV_{i,j,k-1/2}(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k+1/2}(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \\
& + P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \Delta h_{i,j,k} / \Delta t
\end{aligned} \tag{28}$$

$t_m$  은 식 (28)의 흐름 항에서 구해지는 시간으로, 시간에서의 수두의 시간도 함수에 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 나타낸다(식 29).

$$\left( \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \right)^m = \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \tag{29}$$

여기서, 지하수 흐름에 대한 편미분 방정식을 후방차분 방정식으로 사용하여 지하수 유동식을 나타내면 다음과 같다(식 30)

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

$$\begin{aligned}
& + CV_{i,j,k-1/2}(h^{m_{i,j,k-1}} - h^{m_{i,j,k}}) + CV_{i,j,k+1/2}(h^{m_{i,j,k+1}} - h^{m_{i,j,k}}) \\
& + P_{i,j,k}h^{m_{i,j,k}} + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k}(\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{(h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1})}{t_m - t_{m-1}} \quad (30)
\end{aligned}$$

현 시간단계의 끝에서 수두를 포함하는 모든 조건들(terms)을 방정식의 좌측항 그리고 현 시간단계의 끝에서 수두에 독립하는 모든 항을 우측 항으로 분류하면 다음과 같이 나타낼 수 있다(식 31).

$$\begin{aligned}
& CV_{i,j,k-1/2}h_{i,j,k-1}^m + CC_{i-1/2,j,k}h_{i-1,j,k}^m + CR_{i,j-1/2,k}h_{i,j-1,k}^m \\
& + (-CV_{i,j,k-1/2} - CC_{i-1/2,j,k} - CR_{i,j-1/2,k} - CR_{i,j+1/2,k} \\
& - CC_{i+1/2,j,k} - CV_{i,j,k+1/2} + HCOF_{i,j,k})h_{i,j,k}^m + CR_{i,j+1/2,k}h_{i,j+1,k}^m \\
& + CC_{i+1/2,j,k}h_{i+1,j,k}^m + CV_{i,j,k+1/2}h_{i,j,k+1}^m = RHS_{i,j,k} \quad (31)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
HCOF_{i,j,k} &= P_{i,j,k} - SCI_{i,j,k}/(t_m - t_{m-1}) \\
RHS_{i,j,k} &= -Q_{i,j,k} - SCI_{i,j,k}h_{i,j,k}^{m-1}/(t_m - t_{m-1}); \text{ and } (L^3t^{-1}) \\
SCI_{i,j,k} &= SS_{i,j,k}\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k
\end{aligned}$$

식 (2.8)을 완전 음해 법으로 차별화하면 다음과 같이 나타낼 수 있다(식 32).

$$\begin{aligned}
& K_{xx\ i,j,k+1/2} \cdot (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k})/\Delta x_j^2 - K_{xx\ i,j-1/2,k} \cdot (h_{i,j,k} - h_{i,j-1,k})/\Delta x_j^2 \\
& - K_{yy\ i+1/2,j,k} \cdot (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k})/\Delta y_j^2 - K_{yy\ i-1/2,j,k} \cdot (h_{i,j,k} - h_{i-1,j,k})/\Delta y_j^2 \\
& - K_{zz\ i,j,k+1/2} \cdot (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k})/\Delta z_j^2 - K_{zz\ i,j,k-1/2} \cdot (h_{i,j,k} - h_{i,j,k-1})/\Delta z_j^2 \\
& - W_{i,j,k} = S_{s\ i,j,k} \cdot (h_{i,j,k} - h_{i,j,k})/\Delta t \quad (32)
\end{aligned}$$

$\Delta x_j \Delta y_i \Delta z_k$  :  $x(j), y(i), z(k)$  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 (2.14)를 정리하여 재배열하면 다음과 같이 나타낼 수 있다(식 33).

$$\begin{aligned} & Z_{i,j,k}h_{i,j,k-1} + B_{i,j,k}h_{i-l,j,k} + D_{i,j,k}h_{i,j-l,k} + E_{i,j,k}h_{i,j,k} + F_{i,j,k}h_{i,j+l,k} \\ & + H_{i,j,k}h_{l,j,k} + S_{i,j,k}h_{i,j,k+1} = Q_{i,j,k} \end{aligned} \quad (33)$$

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

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

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

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

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

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

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

$Q_{i,j,k} = W_{i,j,k} - (S_{si,j,k} / \Delta t) h_{i,j,k}$  로 격자 내 각 변의 수두 셀(cell)에 대한 식을 매트릭스 형태로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다(식 34).

$$[A]\{h\} = \{q\} \quad (34)$$

[A] : 격자내 수두계수에 대한 매트릭스

{h} : 격자내 모든 교점에 대해 시간간격 m의 마지막 수두벡터값

{q} : 격자의 모든 교점에 대한 현 조건들의 벡터값

계산의 가속화를 위해 조정행렬 [M]을 고려하여 양변에 [M]{h}를 더하면 식 (34)는 다음과 같이 나타낼 수 있다(식 35).

$$[A + M]\{h\} = \{q\} + [M]\{h\} \quad (35)$$

이때  $[A + M]$ 의 인자가 구해져 있으므로 식 (35)에서 우변의 기지이면 해를 얻을 수 있고, 식 (35)를 반복적으로 나타내면 다음과 같다(식 36).

$$[A + M]\{h\}^n = \{q\} + [M]^{n1} \quad (36)$$

이 식에서  $n$ 은 반복지수로, 계산중의 반올림 오차를 줄여 정도를 유지하기 위하여 식 (36)의 우변에  $[A + M]\{h\}^{n1}$ 을 +하고, -하여 잉여 형으로 표시하면 다음과 같이 나타낸다(식 37).

$$[A + M]\{\xi\}^n = \{R\}^{n1} \quad (37)$$

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

### 2.3 MODFLOW 모형의 구성요소

MODFLOW는 사용자가 운영하기에 단순하고 편리하며, 비교적 규모가 큰 수리지질특성의 문제를 해결하기 위하여 필요한 큰 용량의 자료를 처리·분석 및 유지하는 능력이 뛰어나다. 특히, 물리적·수학적인 지하수 유동 특성의 개념이 어떻게 나타날 것인가에 대하여 대용량의 자료와 함께 다루어진다. MODFLOW는 주 프로그램(main program)과 모듈(module)이라고 하는 다양한 서브루틴(subroutine)을 가지고 있으며, 이러한 모듈들은 패키지(package)로 묶여진다.

### 2.4 MODFLOW 모형의 Package

이 연구에 사용된 MODFLOW모형은 사용자가 운영하기에 간편하여 규모가 수리

지질학적 특성의 문제를 해결하기 위해 처리·분석 및 유지하는데 매우 유용하게 활용된다. 또한 주프로그램(main program)과 다양한 모듈(서브루틴-subroutine)을 갖추고 있으며, 이러한 모듈들은 프로그램의 패키지로 구성된다. 각각의 패키지는 하천 또는 유출 등과 같은 특정한 수리지질학적인 특성인자를 Preconditioned Conjugate Gradient(PCG), Strongly Implicit Procedure(SIP), Successive Over Relaxation(SOR)등의 방법을 이용하여 지하수의 유동을 선형방정식으로 다룬다. 유동성분의 Package는 basic(BAS), Block-Centered Flow(BCF), 강(River), 우물(Well), 증발산(Evapotranspiration), 함양(Recharge), 배수(Drain)등의 패키지로 구성되어 있다.

BCF 패키지는 대수층의 수리상수 등의 매개변수를 파악하여 어떠한 특성의 대수층인지를 지정하고, 다공질매체 내에서 지하수 유동의 지배방정식을 계산하며, cell by cell의 유동, storage에서의 유동을 계산한다. Well 패키지는 지하수관정의 위치와 양수능력 등을 입력하고 양수에 따른 유동을 모의하며, 지하수 관정에서의 영향을 유한차분식에 하나의 항으로 입력되어 계산한다. 격자망 내에 위치한 지하수 관정들은 항상 격자의 중앙에서 양수되는 것으로 계산된다. RCH 패키지는 지하수 함양량 및 함양조건에 대한 자료를 입력하고, 실제로 모델에 입력하는 것은 함양율(recharge rate)이다. 각각의 격자에 함양되는 양은 함양율(recharge rate)에 넓이를 곱하여 값이 적용되며, 이 또한 유한차분식에 하나의 항으로 추가된다. PCG2 패키지는 선형과 비선형적의 미분방정식으로 나타나는 유동 방정식을 산정하는데 이용되며, 두 개의 preconditioning 조건을 갖추고 있다. 하나는 다항식을 이용하고, 또 다른 하나는 불완전한 Cholesky방법을 사용하여 비선형적 문제가 발생한 경우에는 Picard반복법을 이용한다. 이외 BAS 패키지는 지층의 구조 및 개수, 격자망 수, 시간 등의 전반적인 모형 구조를 취급하고, River 패키지는 하천의 경계조건 설정, Drain 패키지는 배수, Evapotranspiration 패키지는 증발산 모의에 이용된다. 지하수 유동성분의 패키지는 각각의 cell에 대해 유한차분 계수를 산정하며, 각각의 stress 패키지는 특정 경계의 흐름을 설명하는 계수를 이론적으로 공식화한다.



### Ⅲ. 연구대상 지역 및 지하수 개발·이용 현황

#### 1. 연구대상 지역

제주도는 한라산 백록담을 정점으로 완만한 구릉 모양을 이루는 원추형 순상화산(楯狀火山, shield volcano)의 특성을 보인다(Jejudo, 2003). 본도의 동·서간 거리는 73.262km이며, 남·북간은 41.12km, 부속 도서를 포함할 경우 동·서간 연장거리는 우도에서 차귀도까지 77.326km, 녹서에서 마라도까지 99.878km이다. 제주도의 전체 면적은 1,849.1km<sup>2</sup>이며, 제주시가 978.4km<sup>2</sup>로 52.9%, 서귀포시가 870.7km<sup>2</sup>로 47.1%이다. 해안선의 길이는 총 551.78km이며, 본도의 해안선 길이는 415.56km, 부속도서의 해안선 길이는 136.22km이다(제주특별자치도, 2017)(Fig. 3.1).

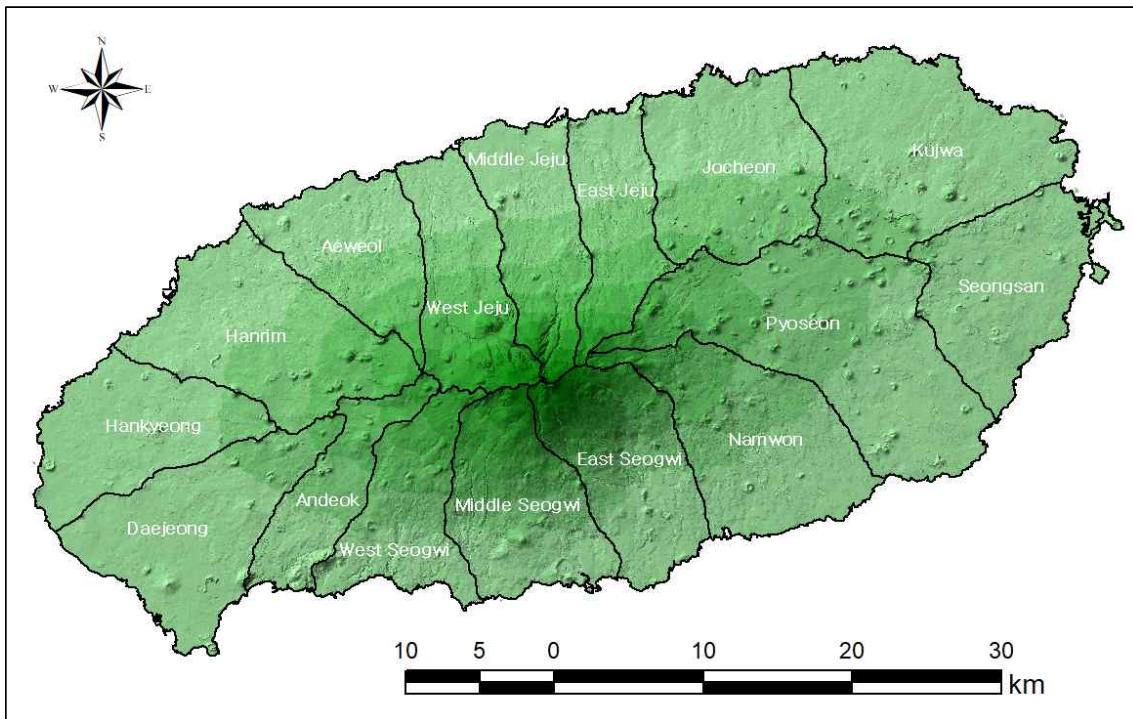


Fig. 3.1 Study area in Jejudo

유역분류는 ‘제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(Ⅲ)(2003, 제주도)’에서 1:5,000 수치지형도를 기반으로 분류한 4개의 중유역과 16개의 소유역으로 구분된다. 유역면적은 동부 표선유역이 207.3km<sup>2</sup>으로 가장 넓고, 구좌 172.5km<sup>2</sup>, 한림 141.7 km<sup>2</sup>, 남원 133.5km<sup>2</sup> 순이다(Table 3.1).

Table 3.1 Subwatershed areas

M-Watershed	North					East		
S-Watershed	Ae-weol	E-Jeju	M-Jeju	W-Jeju	Jo-cheon	Ku-jwa	Seong-san	Pyo-seon
Area (km <sup>2</sup> )	85.3	75.3	89.8	89.5	126.2	172.5	114.9	207.3
M-Watershed	South					West		
S-Watershed	Nam-won	E-Seogwi	M-Seogwi	W-Seogwi	An-deok	Dae-jeong	Han-kyeong	Han-rim
Area (km <sup>2</sup> )	133.5	107.1	106.3	82.8	62.5	130.8	102.8	141.7

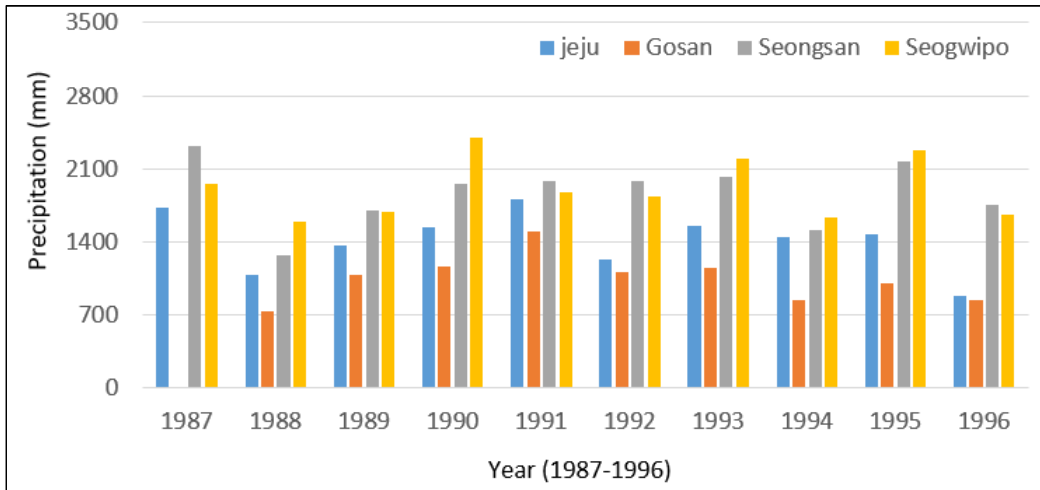
## 1.1 강수특성

제주도 4개의 기상관서(ASOS)의 30년간 일 강수량 자료를 이용하여 연도별 강수특성 및 월별 강수특성을 분석하여 다우년과 과우년, 계절 및 월별 강수특성을 분석하였다.

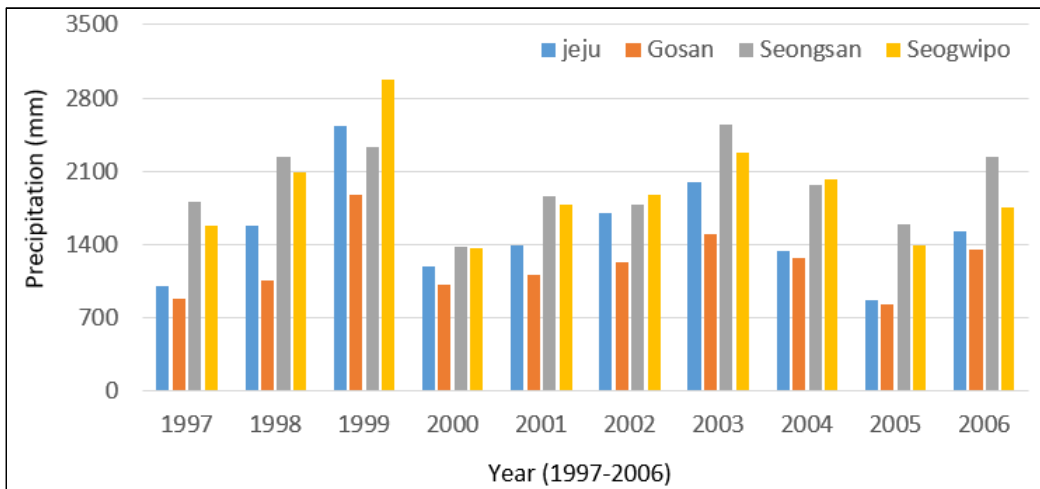
제주도는 지역 및 표고 특성에 따라 강수량 편차가 매우 크게 나타나므로 연평균 강수량을 정의하는 것을 곤란하지만, 해안지역에 위치한 4개의 기상관서를 기준으로 산정한 30년간(1987년 ~ 2016년) 제주도의 평균 강수량은 1,659.5mm이다. 평균 강수량대비 120%이상 강수가 발생한 해는 1987년, 1999년, 2003년, 2007년, 2012년, 2015년으로, 1999년 이후부터는 3년~5년의 반복적인 패턴으로 강수량이 많이 내리는 경향을 보인다. 반면, 평균 강수량의 80%이하로 발생한 해는 1988년, 1996년, 2000년, 2005년, 2013년으로 조사되었으며, 일반적으로 4~5년, 길면 7년 정도의 패턴으로 강수량이 적게 내리는 해가 발생한다(Table 3.2, Fig. 3.2).

Table 3.2 Annual precipitation characteristics

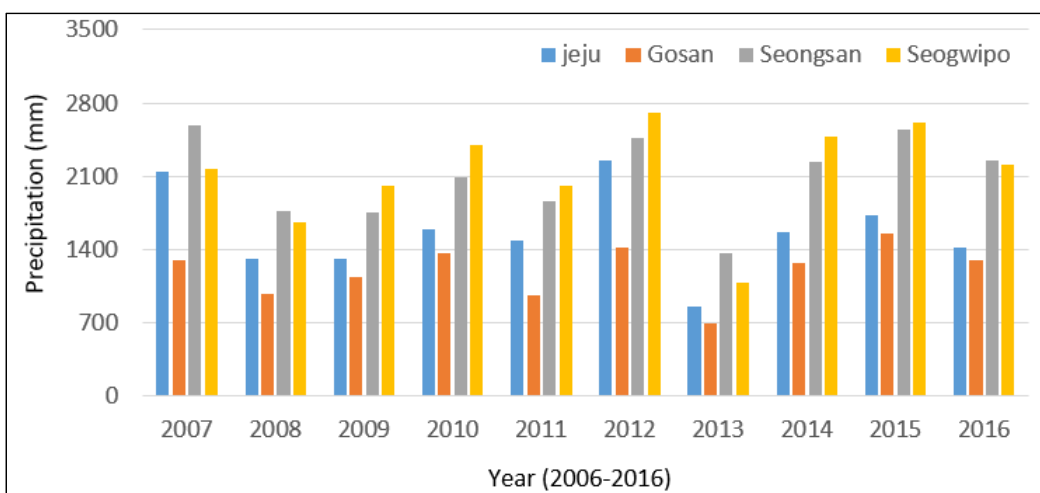
Year	Jeju	Gosan	Seongsan	Seogwipo
1987	1719.4	-	2323.5	1952.9
1988	1084.6	735.5	1264.4	1591.8
1989	1358.6	1081.5	1696.1	1681.9
1990	1544.5	1162.3	1952.3	2398.6
1991	1810.9	1504.0	1983.8	1872.6
1992	1232.9	1107.6	1981.4	1827.5
1993	1552.8	1151.4	2025.4	2190.2
1994	1448.9	834.3	1509.3	1626.0
1995	1472.9	1003.0	2169.8	2280.4
1996	881.1	837.4	1757.9	1656.0
1997	999.5	875.1	1803.0	1575.8
1998	1581.1	1050.4	2235.9	2091.9
1999	2526.0	1874.5	2328.0	2970.5
2000	1189.4	1013.6	1370.0	1368.5
2001	1388.6	1113.7	1856.5	1782.1
2002	1704.1	1225.8	1781.5	1877.2
2003	1999.2	1503.0	2550.5	2280.1
2004	1333.8	1269.9	1962.5	2018.0
2005	872.5	827.5	1588.0	1390.6
2006	1527.4	1350.3	2238.0	1757.6
2007	2139.8	1296.0	2582.5	2166.5
2008	1308.8	972.3	1770.7	1661.4
2009	1304.8	1133.0	1753.5	2006.8
2010	1584.9	1361.8	2086.8	2393.3
2011	1478.6	961.3	1865.7	2010.2
2012	2248.3	1418.1	2458.4	2700.8
2013	859.1	697.1	1364.0	1086.6
2014	1563.4	1271.6	2240.9	2473.2
2015	1728.3	1546.4	2542.2	2618.1
2016	1416.4	1293.1	2255.9	2204.5



(a) 1987 ~ 1996



(b) 1997 ~ 2006



(c) 2007 ~ 2016

Fig. 3.2 Annual precipitation characteristics

월별 강수특성 분석결과 4개의 기상대 모두 8월 강수량이 195.4~334.6mm로 가장 많은 것으로 조사되었고, 12월이 36.7~74.1mm로 가장 작게 분석되었다(Table 3.3). 서부지역 고산의 경우 5월을 제외하고, 모든 월에서 가장 적은 강수결과를 보이며 (Fig. 3.3), 월별 강수량은 3월 ~ 8월까지 남부와 동부지역(서귀포 및 성산기상대) 과 북부와 서부지역(제주 및 고산기상대) 간 큰 차이를 보이며, 연평균 강수량의 편차는 이 시기에 발생하는 강수의 영향인 것으로 판단된다.

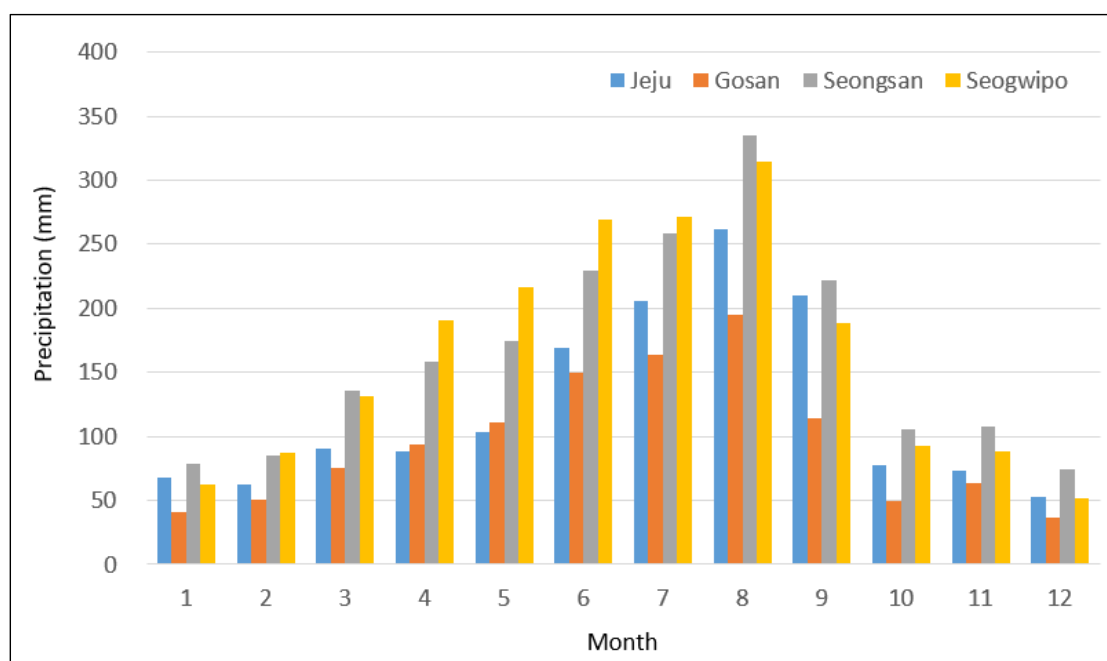


Fig. 3.3 Monthly precipitation characteristics

Table 3.3 Monthly precipitation characteristics

Month	Jeju	Gosan	Seongsan	Seogwipo
1	67.5	41.1	79.0	62.1
2	62.1	50.2	84.6	87.2
3	90.7	75.7	135.9	131.2
4	88.7	94.0	158.4	190.2
5	103.2	110.4	174.4	216.5
6	169.4	150.2	229.1	268.8

Month	Jeju	Gosan	Seongsan	Seogwipo
7	205.9	163.5	258.0	271.6
8	261.8	195.4	334.6	314.5
9	210.4	114.2	222.1	188.8
10	77.9	49.6	105.5	92.2
11	73.3	63.4	107.3	88.7
12	52.9	36.7	74.1	51.4

## 1.2 하천특성

제주도의 하천은 한라산 기준 남·북 방향으로 발달해 있으며, 중제주 유역에는 총 12개의 지방하천이 분포하는 반면, 동·서부 유역인 조천, 구좌, 성산, 한경, 대정 유역의 경우 지방하천이 없는 특성을 보인다. 도 전역에는 총 60개의 지방하천이 분포하며, 제주시에는 26개, 서귀포시에는 34개가 분포한다(Fig. 3.4). 유로연장이 가장 긴 하천은 표선유역에 위치하는 천미천으로 연장은 25.7km이다. 소하천은 도내 총 88개가 분포하며, 소하천의 연장은 총 271.4km이다.

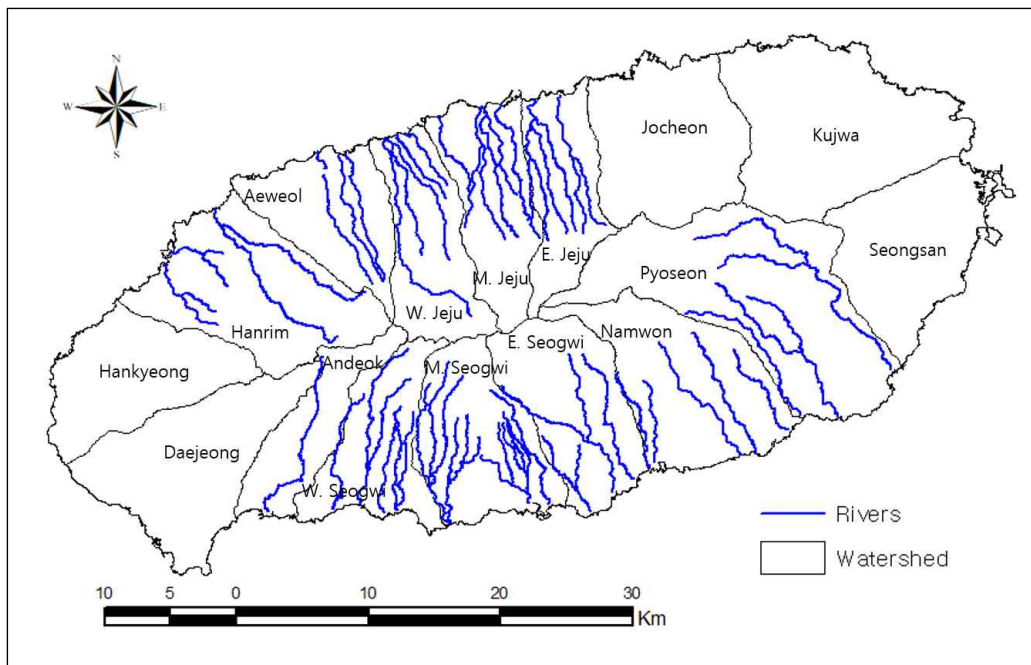


Fig. 3.4 Stream distribution in Jejudo

### 1.3 표고분석

제주도의 지형적 특성을 분석하기 위해 1/5,000 제주도 수치지형도를 이용하였으며, GIS(Geographic Information System)를 이용하여 표고분석을 수행하였다(Fig. 3.5). 제주도는 지형고도에 따라 표고 200m 이하를 해안저지대, 표고 200 ~ 600m 간을 중산간지대, 표고 600m 이상 지역을 산악지대로 구분된다(Jejudo, 2003). 해안저지대 지역인 200m 이하의 지역이 1,001.3km<sup>2</sup>으로 전체 면적 대비 54.4%를 차지하며, 대부분 주거지와 농경지가 분포되어있다. 중산간지대(200 ~ 600m)의 면적은 593.2km<sup>2</sup>으로 전체 면적 대비 32.2%를 차지하고, 농경지와 목초지, 관광 위락시설 등이 분포하며, 산악지대의 면적은 246.8km<sup>2</sup>으로 전체 면적 대비 13.4%를 차지하고, 주로 산림지대로 구성되어 있다(Table 3.4).

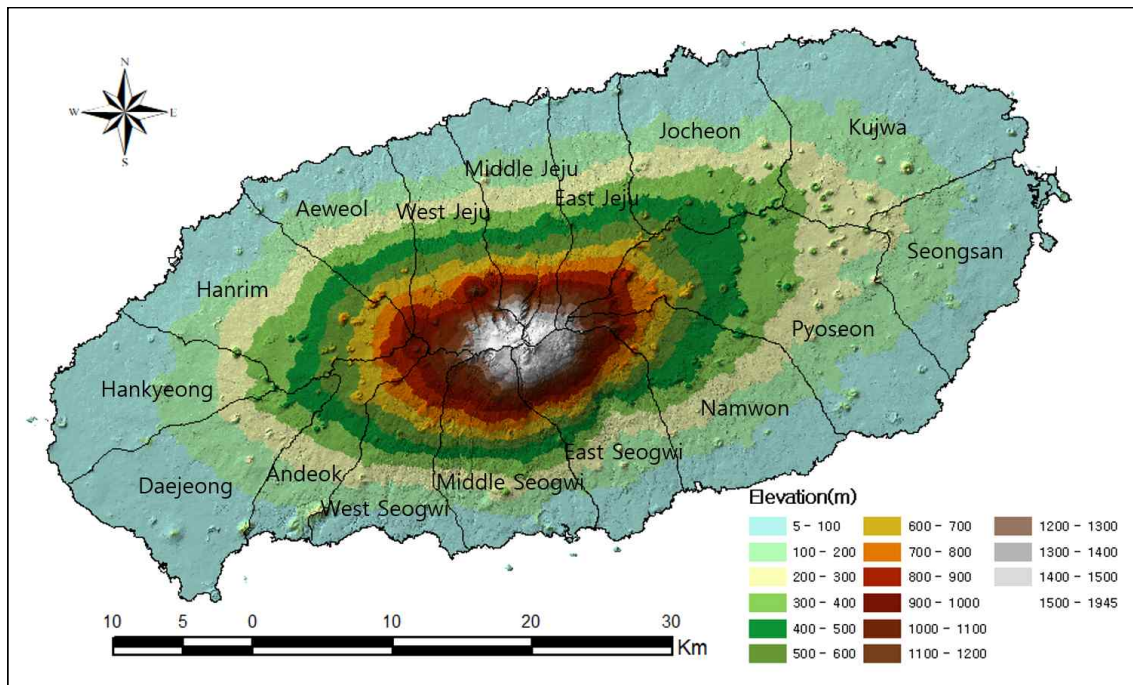


Fig. 3.5 The altitude of Jeju

Table 3.4 The altitude analysis result of Jejudo

altitude(m)			area(km <sup>2</sup> )	rate(%)
0	~	100	638.1	34.7
100	~	200	363.2	19.7
200	~	300	232.0	12.6
300	~	400	162.3	8.8
400	~	500	119.4	6.5
500	~	600	79.5	4.3
600	~	700	59.6	3.2
700	~	800	43.5	2.4
800	~	900	34.3	1.9
900	~	1,000	26.9	1.5
1,000	~	1,100	23.3	1.3
1,100	~	1,200	16.2	0.9
1,200	~	1,300	11.8	0.6
1,300	~	1,400	9.5	0.5
1,400	~	1,500	6.7	0.4
Total			1,841.2	100.0

참고) 1:5,000 국가수치지형도의 GIS 분석 결과로 실제 제주지역의 지적면적과는 차이발생

## 1.4 경사분석

한국수자원공사(1988)에 의하면 1°이하는 평탄지, 1~4°는 완경사지, 4~8°는 경사지, 8~12°는 준경사지, 12~30°는 급경사지, 30°이상은 급준경사지로 구분하고 있다 (Fig. 3.6).

제주도의 지형경사 분석결과, 1~4°의 완경사지가 647.66 km<sup>2</sup>로 전체 면적 대비



35.2%로 가장 넓으며, 4~8°의 경사지가 389.6 km<sup>2</sup> (21.2%), 1° 이하의 평탄지가 423.2 km<sup>2</sup> (23.0%)로 분석되었다(Table 3.5).

동부와 서부지역에서는 평탄지(0 ~ 1°) 및 완경사지(1 ~ 4°)가 상대적으로 넓은 반면, 북부 및 남부지역은 경사지(4 ~ 8°)와 준경사지(8 ~ 12°)가 상대적으로 우세하게 분포하고 있다. 한라산 및 오름이 위치한 지역은 급경사지 및 급준경사지가 주로 분포한다.

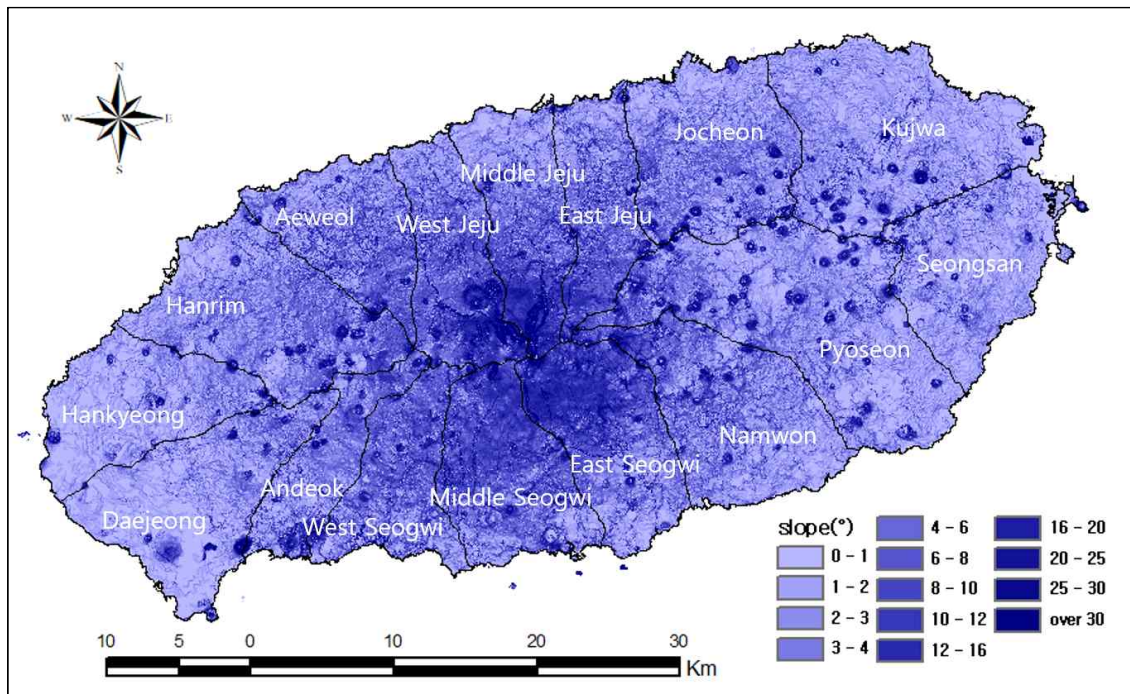


Fig. 3.6 The slope of Jeju

Table 3.5 The slope analysis result of Jeju

slope(°)			area(km <sup>2</sup> )	rate(%)
0	~	1	423.2	23.0
1	~	2	231.8	12.6
2	~	3	234.3	12.7
3	~	4	181.5	9.9
4	~	6	242.8	13.2

6	~	8	146.8	8.0
8	~	10	97.3	5.3
10	~	12	68.2	3.7
12	~	16	87.6	4.8
16	~	20	49.0	2.7
20	~	25	35.8	1.9
25	~	30	21.5	1.2
over 30			21.3	1.2
Total			1,841.2	100.0

참고) 1:5,000 국가수치지형도의 GIS 분석 결과로 실제 제주지역의 지적면적과는 차이발생

## 1.5 지질특성<sup>1)</sup>

제주도의 층서는 화강암과 응회암, U층과 서귀포층이 하부지층을 형성하고, 상부지층은 신생대 제 3기 말부터 제 4기 후기까지 지속된 화산활동에 따른 화산분출물로 이루어졌다. 현무암류는 제주도 전역의 약 90%를 차지하며, 화산분출 당시 점성이 낮아 넓은 지역을 피복하여 완만한 지형을 이루며, 제주도 동·서부에 주로 분포되어 있다. 특히, 현무암층은 분출시기에 따라 층상구조를 이루며, 층의 두께가 2m 이하부터 수십m에 이르며, 각 층의 사이에는 화산쇄설층이 협재되어 있다.

화산쇄설암은 수성화산 분출과 스트롬볼리 분출에 의한 것으로 구분되어지는데, 수성화산 분출에 의한 유리질 쇄설암은 주로 해안에 분포하여 층리가 발달되어 있다. 특히, 서부지역과 남서부 지역의 송악산과 산방산 주변, 동남부지역인 표선과 우도 일대에 분포하고 있다. 화산쇄설층의 두께는 일반적으로 1~5m정도 이지만 20m이상 발달한 지역도 있으며, 화산재, 화산사, 화산력, 스크리아 등과 같은 화산쇄설물로 구성된다. 스트롬볼리 분출에 의한 화산쇄설암은 오름과 같은 분석구를 형성하는데 용암대지 주변에 발달한 분석구의 정상부에는 화구가 있는 경우와 한쪽

1) 본 절에서는 한국자원연구소, 2000의 연구 내용 중 일부를 인용하여 보완하고 재구성하였다.

면이 침식된 화구 등 다양한 모양을 보인다.

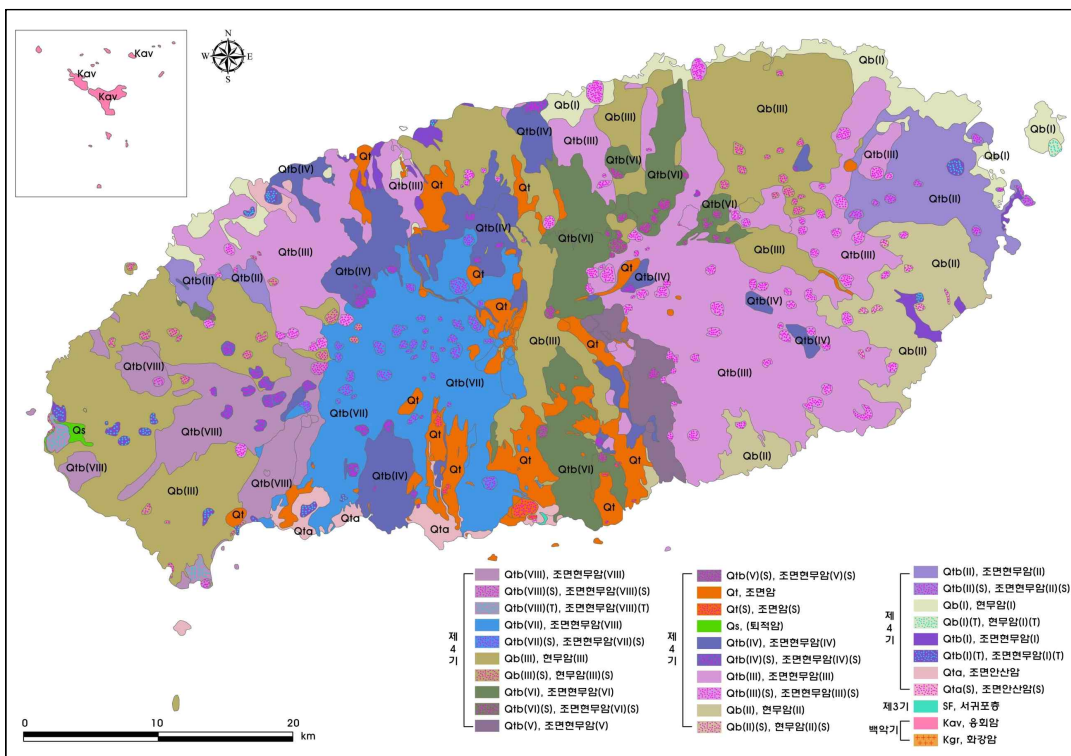
서귀포층은 고결 내지 준 고결된 해성층으로 화산성 역질사암, 사암, 사질이암, 이암, 유리질쇄설암으로 구성되며, U층은 미고결 역암 층으로 서귀포층 하부에서 발견된다.

Table 3.6 Geological system of Jejudo

구성암석	표식지별 암상
조면현무암 (VIII)-Qtb(VIII)	왕이매조면현무암, 병악현무암질조면안산암, 송악산응회암
조면현무암 (VII)-Qtb(VII)	법정동조면현무암
현무암(III)-Qb(III)	광해악현무암, 선흘리현무암질안산암, 덕천리현무암
조면현무암 (VI)-Qtb(VI)	시오름조면현무암
조면현무암(V)-Qtb(V)	성널오름조면현무암
조면암-Qt	한라산현무암, 영실조면암, 원만사조면암, 도순동조면안산암, 각수바위조면안산암, 영주교조면안산암, 신호동조면안산암, 사라오름조면안산암, 자과쇄각력암
퇴적암-Qs	위미리역암, 범호촌역암, 입석동역암
조면현무암 (IV)-Qtb(IV)	대포동조면현무암
조면현무암 (III)-Qtb(III)	물장울교조면현무암, 어도리현무암
현무암(II)-Qb(II)	
조면현무암(II)-Qtb(II)	수원리현무암, 부면동현무암, 금덕리현무암, 원동현무암
현무암(I)-Qb(I)	귀덕리현무암, 신흥리현무암
조면현무암(I)-Qtb(I)	고내봉응회암, 과오름현무암, 도두봉현무암, 당산봉응회암, 군산응회암
조면안산암-Qta	소정방현무암질안산암, 정방동조면현무암, 천지연조면안산암, 강정동조면현무암

제  
4  
기

제3기	서귀포층-SF	
	미교결퇴적층-US	
백악기	— 옹회암-Kav	
~		
쥬라기	— 화강암-Kgr	



1:250,000 제주(백아도, 진남포) 지질도폭 설명서, 2000

Fig. 3.7 Geological maps of Jeju

## 1.6 지하수 부존형태2)

제주도의 지하수 부존형태는 담수와 해수의 관계, 지질분포 특성, 지하수위 분포 등에 따라 상위지하수, 기저지하수, 준기저지하수, 기반암지하수 총 4가지로 분류된다.

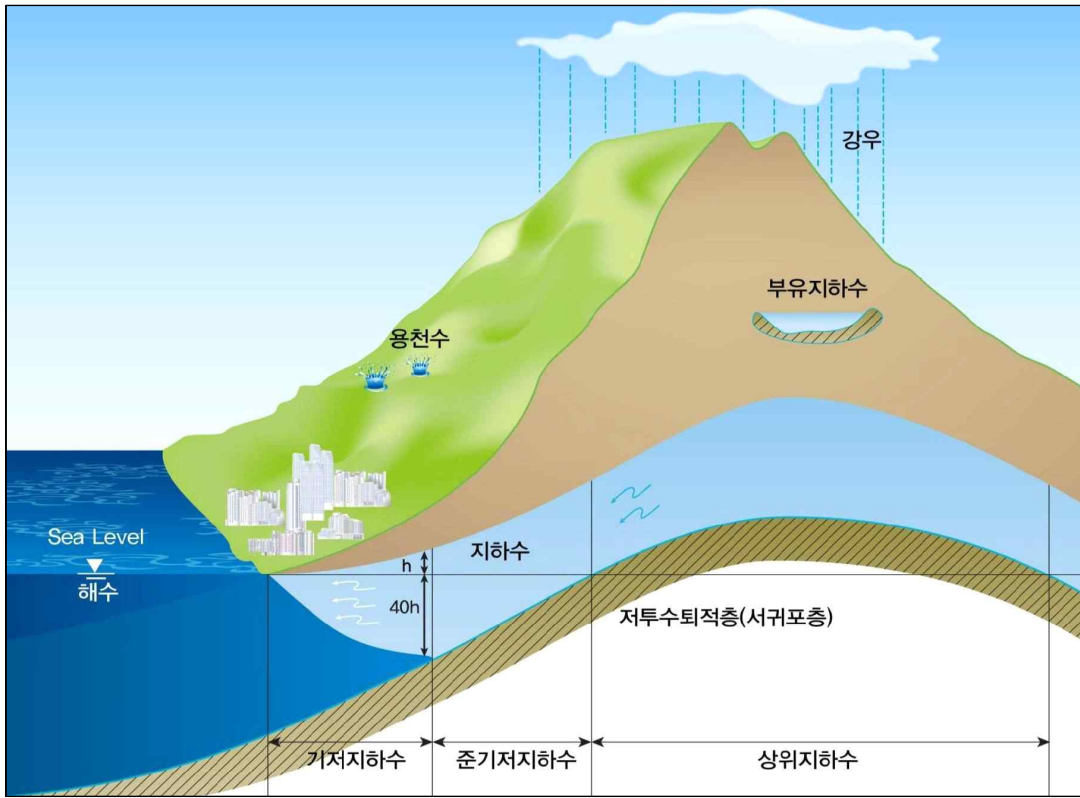
2) 본 절에서는 제주특별자치도, 2013의 연구 내용 중 일부를 인용하여 보완하고 재구성하였다.

기저지하수는 염수와 담수의 비중차이에 의해서 담수가 염수 상부에 렌즈 형태, Ghyben-Herzberg 원리에 의해 부존하는 지하수이다. 일반적으로 담수의 밀도가 해수의 밀도보다 작아 해수지하수체는 담수지하수체 하부에 위치하며, 담수지하수는 상부의 지하수위 높이에 40배 만큼 깊이까지 부존할 수 있다. 담수와 해수가 만나는 지역에는 저염지하수가 부존하는데, 점이대 또는 혼합대라고 하며, 혼합대 상부에 존재하는 담수지하수를 담수렌즈 또는 G-H렌즈라 한다. 담수렌즈는 모든 지역에 항상 일정하게 분포하는 것이 아니며, 지하수 함양량, 조석 등의 요인에 따라 확장 및 수축 등이 반복된다. 제주도의 기저지하수체는 북부 조천읍에서 남부 남원읍에 이르는 해안지역과 서부 한림읍 해안지역, 모슬포 해안지역을 따라 부존하고 있으며, 제주도 동부지역은 G-H비 보다 훨씬 얇은 1:20의 비율을 보인다(Kho, 2003).

준기저지하수는 지하의 투수성이 낮은 서귀포층이 담수지하수체와 해수를 차단하는 역할을 하고 있어 G-H 원리가 적용되지 않는 지하수체를 의미하며, 평균 해수면을 기준으로 상부에 위치한 지하수는 상부 준기저지하수로, 하부에 위치한 지하수는 하부 준기저지하수로 세분화 된다. 상부 준기저지하수는 서귀포층의 상부면을 따라 빠른 선형유속으로 유동하므로 풍수기와 갈수기의 수위변동 폭이 크게 나타난다. 하부 준기저지하수는 서귀포층이 해수면 하부에 분포하므로 서부지역 및 북부지역에 광범위하게 분포하며, 선형유속이 상부 준기저지하수 보다 느리고, 지하수위의 변동 폭은 강수에 의해 지배되지만, 투수성이 낮은 서귀포층이 해수면 기준 60m이하에 분포하는 지역에서는 조석의 영향이 발생된다.

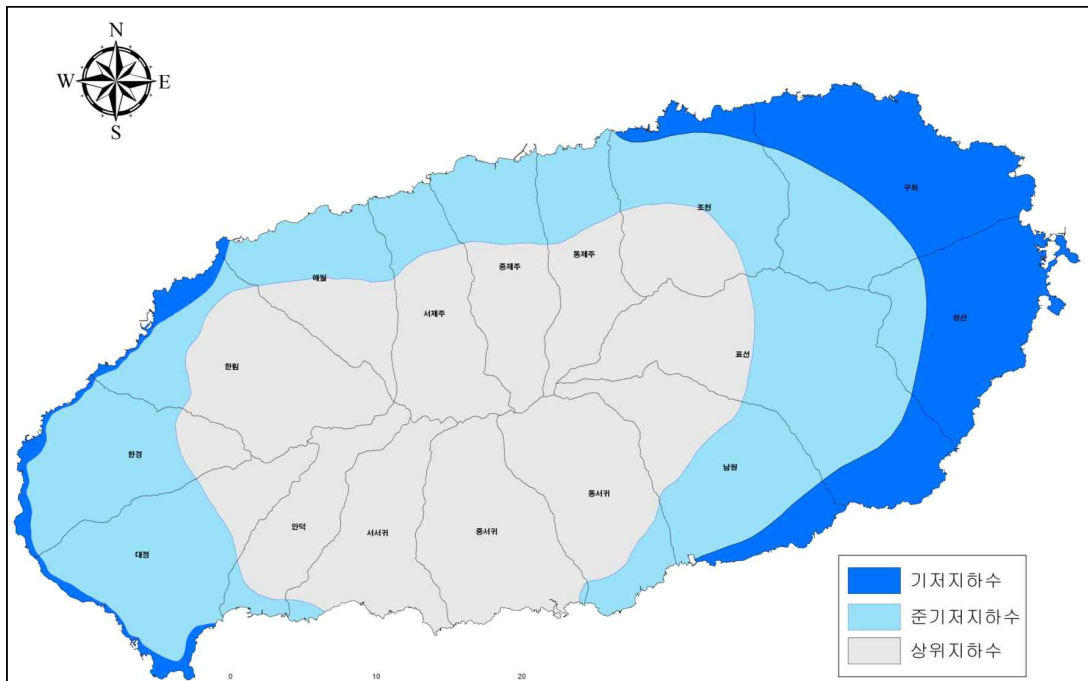
상위지하수는 지표면에 내린 빗물이 중력에 의해 상부의 투수성 지층을 통해 지하로 침투되다가 점토층과 같은 저투수성 지층이나 불투수성 암석층에 의해 더 이상 침투되지 못하고 저투수층의 표면을 따라 유동하는 지하수이다. 특히, 저투수층의 표면을 따라 빠른 선형유속으로 유동되므로 풍수기(7~9월)와 갈수기(12, 1~2월)간에 수위 변동 범위가 크게 나타나며, 양수에 의한 수위강하량이 크게 나타난다.

기반암지하수는 시대미상의 미교결퇴적층(U층), 서귀포층 등과 같은 저투수성 퇴적층 하부의 대보화강암과 용결응회암 등의 기반암에 발달된 절리나 파쇄대 등의 공극 사이에 부존하는 강수 기원의 심부지하수로 정의되며, 지하수의 수질이나 채수가능량은 기반암 지질구조의 발달 상태에 따라 영향을 받는 지하수체이다.



제주특별자치도 수자원관리종합계획(2013-2022), 2013

Fig. 3.8 Mimetic diagram for endowment of groundwater



제주특별자치도 수자원관리종합계획(2013-2022), 2013

Fig. 3.9 Groundwater Occurrence in Jeju

## 2. 지하수 개발·이용 시설 및 관측정 현황

### 2.1 지하수 개발·이용 시설

2016년 말 기준 제주도내에는 총 4,865개소(염지하수, 관측정 제외)의 지하수 관정이 개발되어 있다. 개발주체별로는 공공관정이 1,363개소, 사설관정이 3,502개소로 사설관정이 차지하는 비율은 72.0%이다(Table 3.7). 공공관정은 제주도 전 지역에 고루 분포하고 있는 반면, 사설지하수는 북부 일부지역과 남부, 남서부지역에 밀집되어 개발·이용 되고 있다(Fig. 3.10). 농업용 지하수가 3,261개소로 전체의 67%를 차지하고, 생활용수는 1,444개소로 29.7%, 공업용은 153개소로 3.1%, 먹는 샘물은 7개소로 0.1%이다. 농업용지하수는 남부지역과 남서부지역에 밀집되어 있고, 생활용 지하수는 북부 제주시지역과 남부 서귀포시지역에 밀집되어 있다(Fig. 3.11).

Table 3.7 Groundwater status by developing subject and usage

unit : point

classification	industrial	agricultural	bottled water	residential	total
public	3	926	6	428	1,363
private	150	2,335	1	1,016	3,502
total	153	3,261	7	1,444	4,865

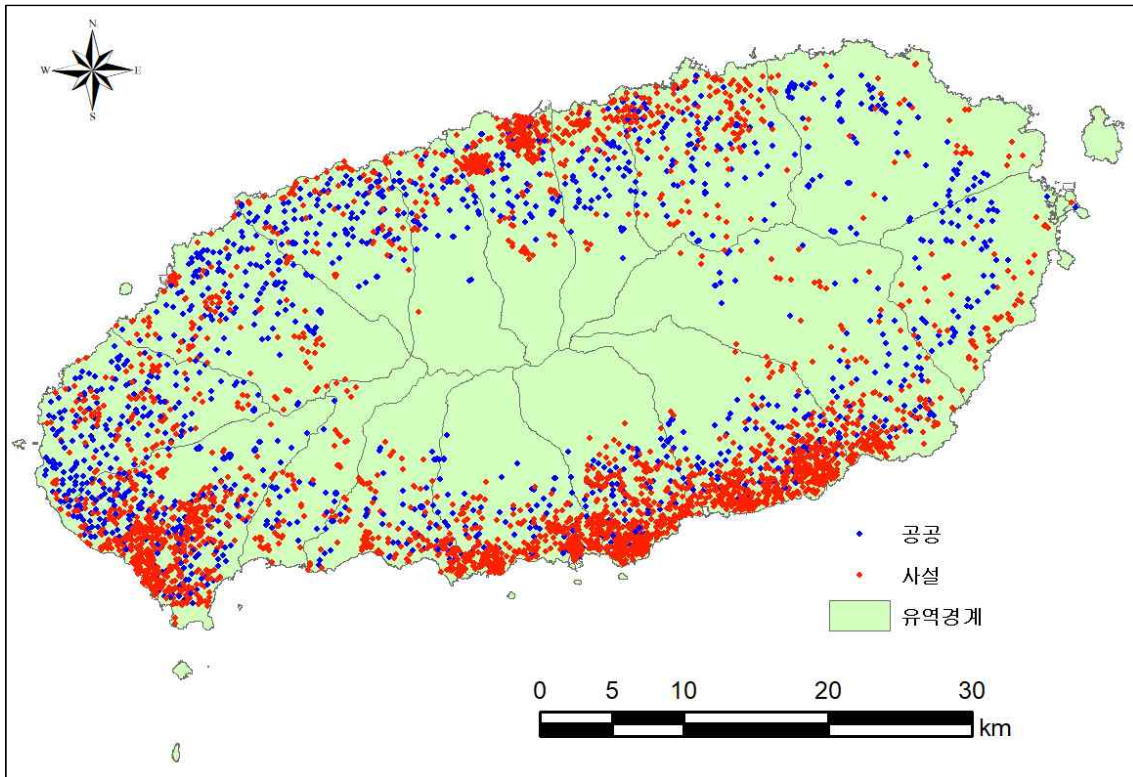


Fig. 3.10 Groundwater status by developing subject in Jeju

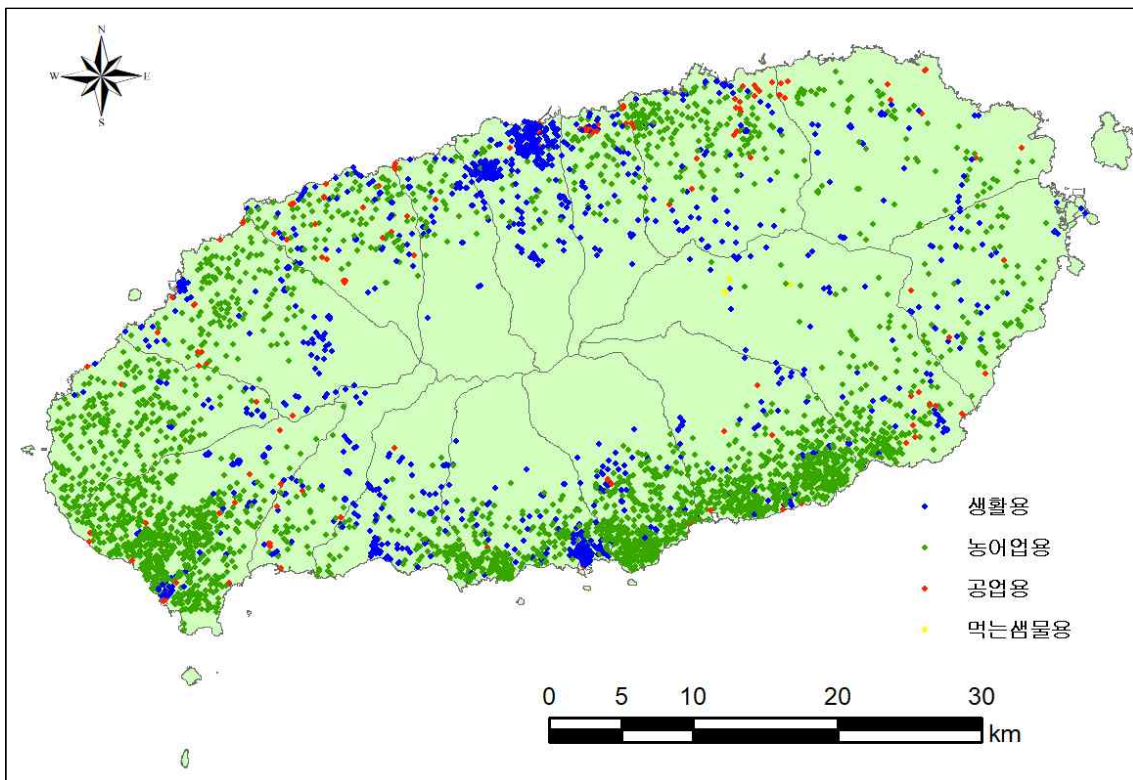


Fig. 3.11 Groundwater status by usage in Jeju



해안저지대지역(표고 200m이하), 중산간지대지역(표고 200~600m), 고지대지역(표고 600m이상)으로 분류해보면, 해안저지대지역이 4,311개소로 전체 88.6%이며, 중산간지역이 551개소로 11.3%, 고지대지역이 3개소로 0.1%이다(Table 3.8). 제주도의 지하수는 전반적으로 표고 200m이하의 해안저지대지역에 밀집되어 있다(Fig. 3.12).

Table 3.8 Groundwater development by elevation

altitude	under 200m	200 ~ 600m	over 600m	total
Groundwater (point)	4,311	551	3	4,865
rate (%)	88.6	11.3	0.1	100.0

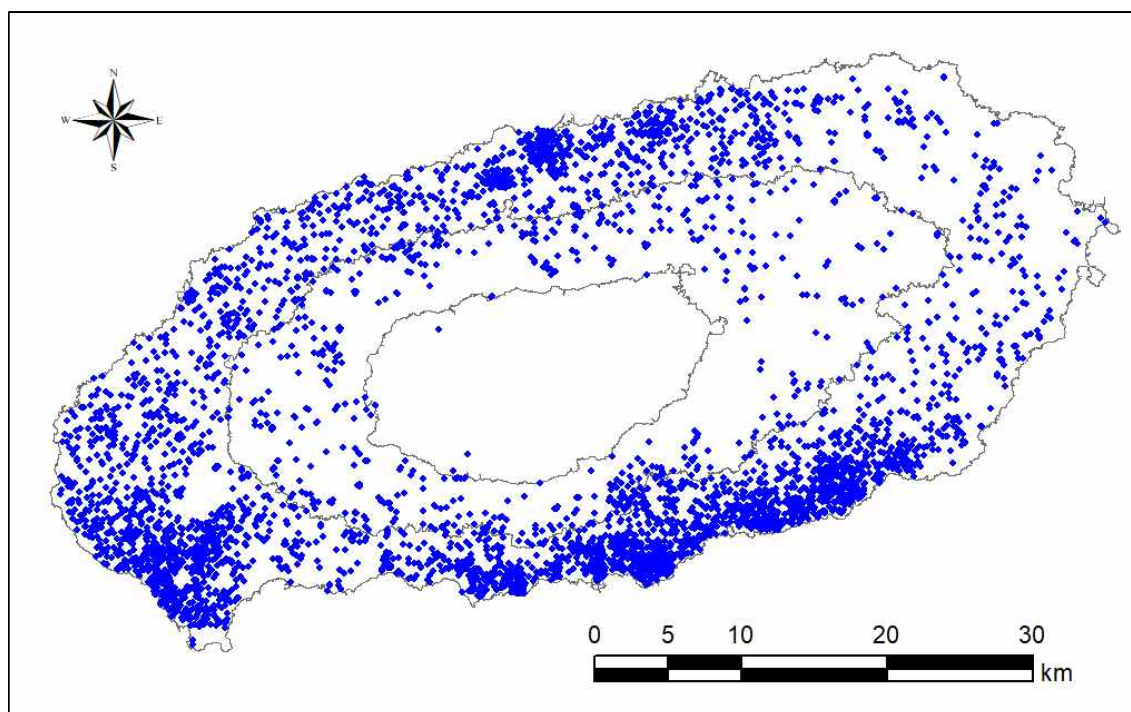


Fig. 3.12 Groundwater development by elevation

## 2.2 지하수 관측정 현황

지하수위 관측정은 제주도 지하수의 수위변동을 파악하여 지하수위 하강과 같이 지하수 장애로부터 관리하기 위하여 지속적으로 관측·감시하기 위한 관측시설이다. 지하수위 관측정은 관측정 내부에 설치된 자동측정기로부터 1시간 간격으로 지하수위·전기전도도·수온 등을 모니터링하고 있으며, 필요시에는 10분, 30분 간격으로 주기를 조정해 모니터링 하고 있다. 각 관측정에서 관측되는 데이터는 CDMA(코드분할 다중접속 : Code Division Multiple Access)무선통신망에 의해 실시간으로 관측정 관리 전용서버로 전송되어 관리되고 있다(제주특별자치도, 2014). 제주도내 지하수 관측정은 2001년부터 관측이 시작되어 2016년 12월 기준 총 133개소가 설치되어 운영되고 있으며, 지하수위 관측정, 해수침투 관측정, 광역 감시정 관측정, 인공함양 관측정으로 구분된다(Table 3.9).

Table 3.9 Development status of groundwater observations by year

year	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
observation (point)	35	2	26	13	7	2	11	14
accumulate	35	37	63	76	83	85	96	110
year	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
observation (point)	5	6	4	5	1	0	2	0
accumulate	115	121	125	130	131	131	133	133

고도별 설치현황에 의하면, 해안저지대(200m이하)에는 106개소로 전체 79.6%가 분포하며, 중산간지대(200 ~ 600m)에는 24개소, 고지대(600m이상)에는 3개소로 대부분의 관측정은 비교적 낮은 위치에 개발·운영 중이다(Fig. 3.13).

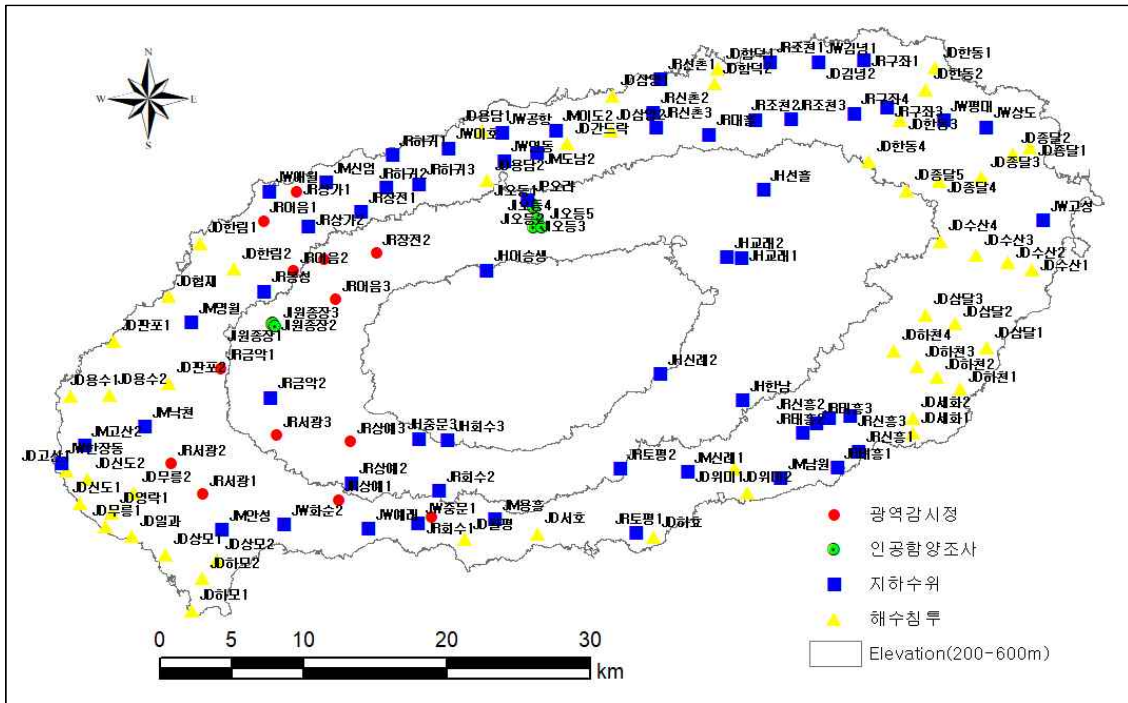


Fig. 3.13 Groundwater observation location map

## IV. 결과 및 고찰

### 1. 지하수의 관정 분류 및 관측자료 분석

#### 1.1 지하수 개발·이용 시설 분류

##### 1.1.1 연도별 지하수 개발

Table 4.1에서 제시한 1993년과 1995년의 경우 지하수 양성화 제도를 통해 등록된 지하수 관정이라고 할 수 있으며, 1961년 최초 개발된 지하수 관정부터 1995년까지 약 30년간 개발된 관정수를 포함하고 있다. 1993년 이전 개발된 지하수 관정은 2,299개소로 47.3%를 차지하고, 1995년 410개소로 8.4%, 1998년 432개소로 8.9%를 차지하고 있다. 점차적으로 지하수 관정이 증가됨에 따라 지하수 관리·보전에 관한 제도는 강화되고, 지하수 개발 건수는 감소되었다(Fig. 4.1).

Table 4.1 Status of groundwater development by year

year	under 1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
point	2,299	0	410	206	191	432	252	265	139
year	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
point	70	34	54	81	38	75	15	69	39
year	2011	2012	2013	2014	2015	2016	unconfirmed	total	
point	34	14	6	26	33	35	48	4,865	

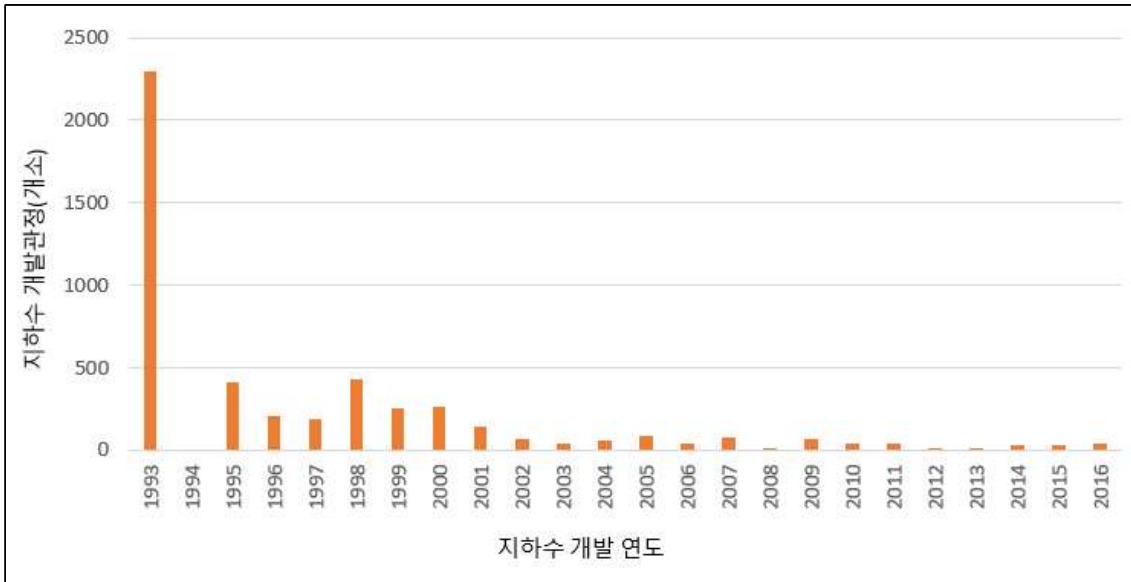


Fig. 4.1 Graph of groundwater development by year

### 1.1.2 월별 지하수 개발

지하수 관정의 월별 개발특성을 분석하기 위해 1993년에 양성화된 지하수 관정 2,298개소와 개발 시기가 정확하지 않은 48개소의 관정은 제외하였으며, 총 2,519개소의 관정을 대상으로 월별 개발현황을 분류하였다. 특히, 지하수위는 강수특성에 따라 수위변동이 나타나고, 지하수 개발 시점에 지하수위를 측정하므로 풍수기와 갈수기로 구분하여 제시하였다. 강수량이 많은 풍수기(6월 ~ 9월)에 개발된 지하수 관정은 1,161개소로 전체 46.1%를 차지하고 있으며, 갈수기(12월, 1월~3월)에 개발된 관정은 854개소로 전체 33.9%를 차지하고 있다. 이외 4월과 5월, 10월, 11월에 개발된 관정은 504개소로 전체 20.0%를 차지하고 있다(Table 4.2, Fig. 4.2).

Table 4.2 Monthly groundwater development

class	dry season			average season		rainy season
month	1	2	3	4	5	6
point	151	216	156	90	134	349

class	rainy season			average season		dry season
month	7	8	9	10	11	12
point	275	230	307	112	168	331

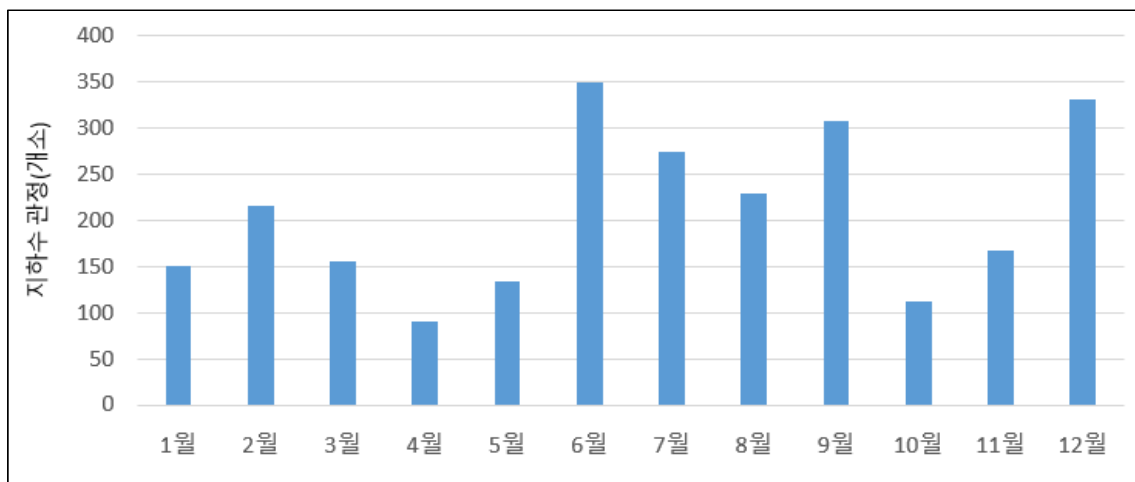


Fig. 4.2 Monthly groundwater development status graph

### 1.1.3 굴착심도별 분류

전체 지하수 4,865개소 중 굴착심도가 확인되지 않은 20개소를 제외하고, 4,845개소의 지하수 굴착심도를 검토한 결과 전반적으로 해수면을 기준으로 50m 이하까지 굴착된 것으로 조사되었으며, 해수면기준 50m 이하까지 굴착한 지하수 관정이

3,624개소로 전체 74.5%를 차지한다. 특히, 해수면 이하 20~30m까지 굴착한 지하수 관정은 총 1,008개소로 20.7%로 가장 많이 분포한다. 해수면기준 50~100m 이하까지 굴착한 지하수 관정은 552개소로 11.3%, 해수면 상부 50m까지 굴착한 지하수는 494개소로 10.2%이다(Table 4.3, Fig. 4.3).

지하수위는 해안에서 상류지역으로 진행될수록 상승되며, 도내 개발·이용 중인 지하수는 주로 해안저지대지역(표고 200m 이하)에 분포하고 있어, 전반적으로 해수면 이하까지 굴착된 것으로 확인된다. 특히, 지하수 개발·이용 관정은 대수층의 특성과 수요량에 따라 굴착심도가 달라질 수 있다. 즉, 동일한 대수층특성을 보이는 지역이라 하더라도 양수능력이 100m<sup>3</sup>/day와 1,000m<sup>3</sup>/day에 따라 굴착심도가 달라질 수 있으며, 동일한 양을 개발한다 하더라도 개발지역에 대수층 특성에 따라 굴착심도가 다르게 나타날 수 있다. Table 4.3에서 굴착심도가 -50 ~ 0m의 범위에 지하수 관정이 많은 이유로는 해안저지대(표고 200m이하)지역에 위치한 관정이 많고, 보편적으로 해수면 이하까지 굴착을 할 경우 수요량에 충족하는 양을 개발할 수 있는 것으로 해석된다.

Table 4.3 Classification by depth of groundwater

depth (EL. m)	under -150	-100~-150	-100~-50	-50~-40	-40~-30	-30~-20	-20~-10	-10~0	0~10
OBS (point)	1	24	552	387	721	1008	976	532	185
rate (%)	0.0	0.5	11.3	8.0	14.8	20.7	20.1	10.9	3.8

depth (EL. m)	10~20	20~30	30~40	40~50	50~100	100~150	over 150	unconfir med	total
OBS(point)	134	74	62	39	94	42	14	20	4865
rate(%)	2.8	1.5	1.3	0.8	1.9	0.9	0.3	0.4	0.0

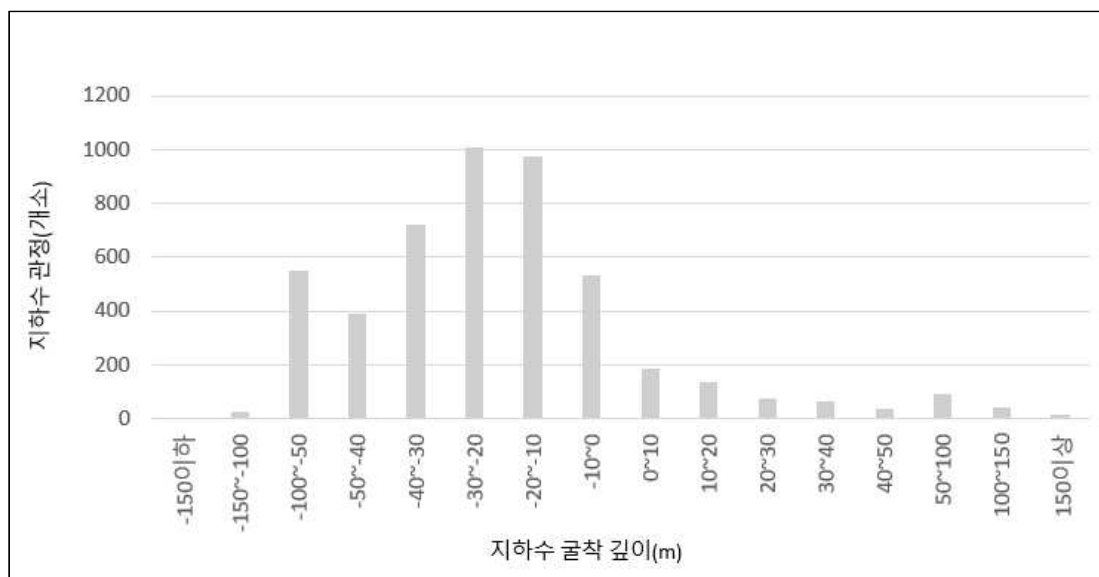


Fig. 4.3 Classification by depth of groundwater

#### 1.1.4 지하수위 분류

이 장에서 제시하는 지하수관정별 지하수위 자료는 지하수 개발 준공 시 측정된 자료를 활용하였으므로 개발연도와 계절 등 시기적인 영향과 수위측정자 및 장비 등이 동일하지 않기 때문에 현재의 현장결과와는 상이 할 수 있다.

2016년 기준 전체 4,865개소 지하수관정의 지하수위를 조사한 결과 0~10m에 분포하는 지하수 관정은 1,500개소로 30.8%를 차지하고, 10~50m에 분포하는 지하수 관정은 1,379개소로 28.3%를 차지한다. 지하수위가 해수면 기준 이하에 측정된 지하수 관정은 866개소로, 17.8%를 차지하며, 지하수위가 미 기재된 지하수 관정은 493개소로 10.1%를 차지하고 있다(Table 4.4, Fig. 4.4).

해수면 기준 이하의 지하수위 자료는 지하수위 측정시기 또는 개발당시 지하수위 측정자의 오류에 따라 발생될 수도 있다. 일반적으로 지하수위를 측정하고, 작성하는 방법으로는 EL. m과 GL. m으로 구분된다. EL. m은 해수면을 기준으로 측정된 결과를 기재하는 방법이며, GL. m은 지표를 기준으로 지표하 거리를 기재하는 방법으로 EL. m과 GL. m을 더하면 지하수관정이 위치한 표고(EL. m)가 된다. 따라



서 Table 4.4에서 지하수위가 0m 이하로 측정된 지하수 결과는 지하수 측정자료 기재에 오류로 인한 것으로 판단되며, 과거 개발된 지하수 관정들 또한 작성방법에 대한 오류가 발생할 것으로 판단된다.

Table 4.4 Classification by groundwater level

GW-level(m)	under 0	0~10	10~50	50~100	100~200	200~300	over 300	unconfirmed
OBS (point)	866	1,500	1,379	363	206	44	14	493
rate (%)	17.8	30.8	28.3	7.5	4.2	0.9	0.3	10.1

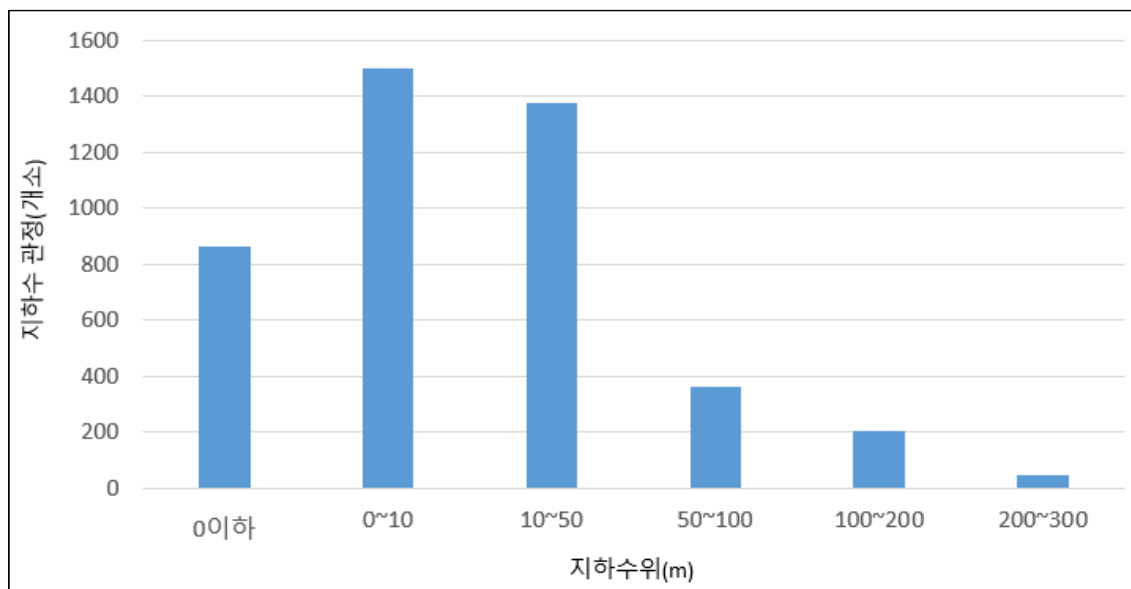


Fig. 4.4 Classification by groundwater level

## 1.2 관측정 지하수위 변동분석

### 1.2.1 연평균 지하수위 변동분석

2001년부터 2016년까지 각 관측정의 연도별 평균수위를 분석한 결과 연 최대 평균과 연 최소 평균값 차이는 0.17~48.84m의 범위로 분석되었다. 지하수 차이가 5m 이하의 관측정은 93개소(69.9%)로 가장 큰 비율을 나타냈으며, 전체적으로 기저지하수체에 위치하는 관측정이다. 5~10m의 수위차이를 보이는 관측정은 22개소(16.5%)로 대부분 준기저지하수체 지역에 위치하고 있으며, 10~20m의 수위차이를 보이는 관측정은 13개소(9.8%)로 북부지역의 일부 관측정은 준기저지하수체에 위치하고, 대부분 상위지하수체에 분포하는 관측정이다. 20m이상 수위차이를 보이는 관측정은 5개소(3.8%)로 상위지하수체에 위치하고 있다(Fig. 4.5). 전반적으로 지하수위는 10m이내의 차이를 보이고 있으나(Table 4.5), 최대 수위차이를 보이는 JH어승생 관측정으로 수위차이는 48.84m로 분석되었다. Koh 등(2006)에 의하면, 상위지하수 분포지역은 지형경사가 급할 뿐만 아니라 강수량이 풍부하기 때문에 다른 지역에 비해 지하수위는 높게 분포하고, 수위변동 범위(최대수위와 최소수위 차)는 최대 83.6m까지 나타난다고 제시한 바 있으며, JH어승생 관측정 또한 해발고도 615m의 고지대지역에 위치하고 있으며, 해당 지역의 지하수는 상위지하수체로 강수의 영향에 따라 수위 변동범위가 크게 나타나는 것으로 판단된다.

지하수 부존특성에 따라 연평균 지하수위의 변동 폭을 비교해보면 기저지하수에 위치하는 지하수 관정은 0.16 ~ 2.73m의 수위 변동 폭을 보이며, 연평균 지하수위의 수두 차는 비교적 낮은 특성을 보인다. 준기저지하수에 위치한 지하수 관정의 수위 변동 폭은 0.47 ~ 12.56m로 서부지역은 해안에서 약 5km이상 떨어진 내륙지역부터 5 ~ 10m의 수위 변동 폭을 보이고, 남부와 북부지역의 경우 해안선 근처에서 5 ~ 10m의 수위변동 특성을 보인다. 상위지하수에 위치하는 지하수 관정은 0.62 ~ 48.84m로 지하수 관정에 따라 수위 변동 폭의 차이가 크게 나타나는데, 이는 지하수 관정별 대수층 및 수리특성에 따라 수두차가 다양하게 나타나는 결과로 판단된다.

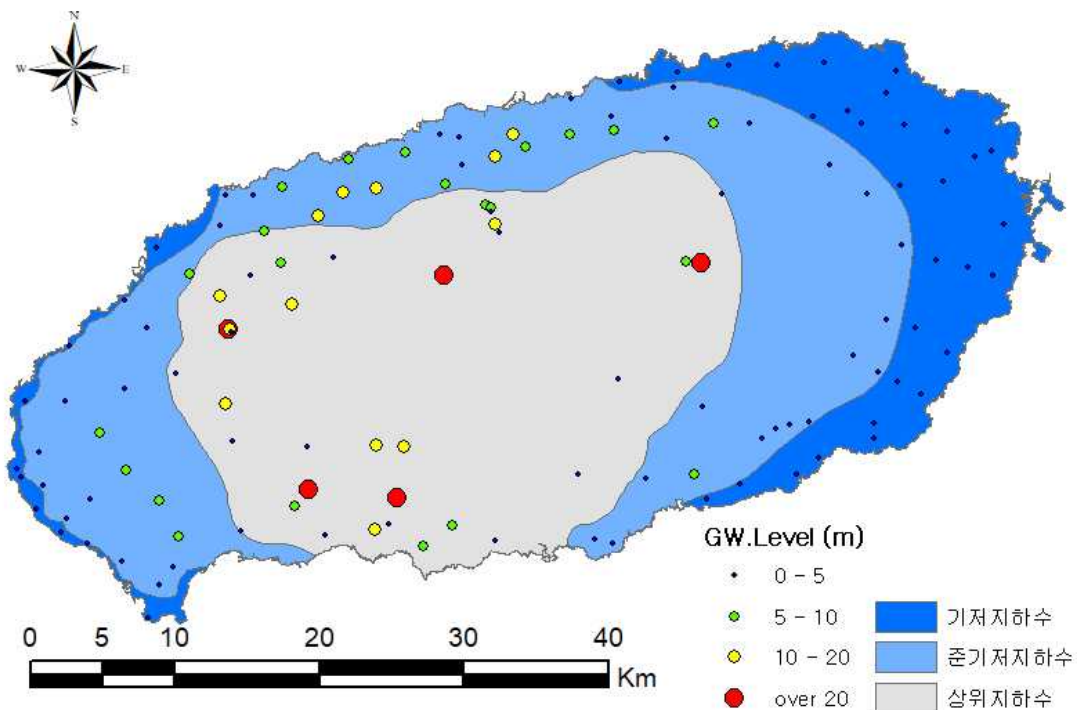


Fig. 4.5 Annual average difference in groundwater level

Table 4.5 The ratio of the annual average groundwater level difference

GW-level(m)	under 5	5 ~ 10	10 ~ 20	over 20	total
obs(point)	93	22	13	5	133
rate(%)	69.9	16.5	9.8	3.8	100.0

단일 관측정에 대하여 연도별 최대수위와 최소수위를 산정하여 연도별 경향분석을 수행하였다. 연평균 수위가 가장 높게 나타난 연도는 2003년과 2012년으로 2003년까지 개발된 관측정 63개소 중 41개소(65.1%)에서 최대수위를 보였으며, 2012년까지 개발된 관측정 130개소 중 37개소(28.5%), 2012년까지 개발된 관측정 133개소 중 17개소(12.8%)에서 최대수위를 보였다(Table 4.6).

Song 등(2012)에 의하면, 제주도 관측정 중 강수에 의해 영향을 받는 관측정은 92%에 달한다고 제시하였으며, 2003년에는 강수량이 2,083.2mm, 2012년에는 2,206.4

mm로, 2001년부터 2016년까지의 평균 강수량(1,675.1mm) 대비 1.2배~1.4배로 분석되었다. 2015년에는 강수량이 2,108.8mm로 비교적 많았지만, 2013년 극심한 가뭄의 영향에 의해 전반적으로 지하수위가 상승되지 못한 것으로 판단된다(Fig. 4.6).

Table 4.6 Maximum groundwater level by year

year	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
obs (point)	3	3	41	7	0	2	8	2
develop obs	35	37	63	76	83	85	96	110
rate (%)	8.6	8.1	65.1	9.2	0.0	2.4	8.3	1.8
precipitation (mm)	1535.2	1647.2	2083.2	1646.1	1169.7	1718.3	2046.2	1428.3
year	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
obs (point)	1	5	0	37	3	2	2	17
develop obs	115	121	125	130	131	131	133	133
rate (%)	0.9	4.1	0.0	28.5	2.3	1.5	1.5	12.8
precipitation (mm)	1549.5	1856.7	1579.0	2206.4	1001.7	1887.3	2108.8	1792.5

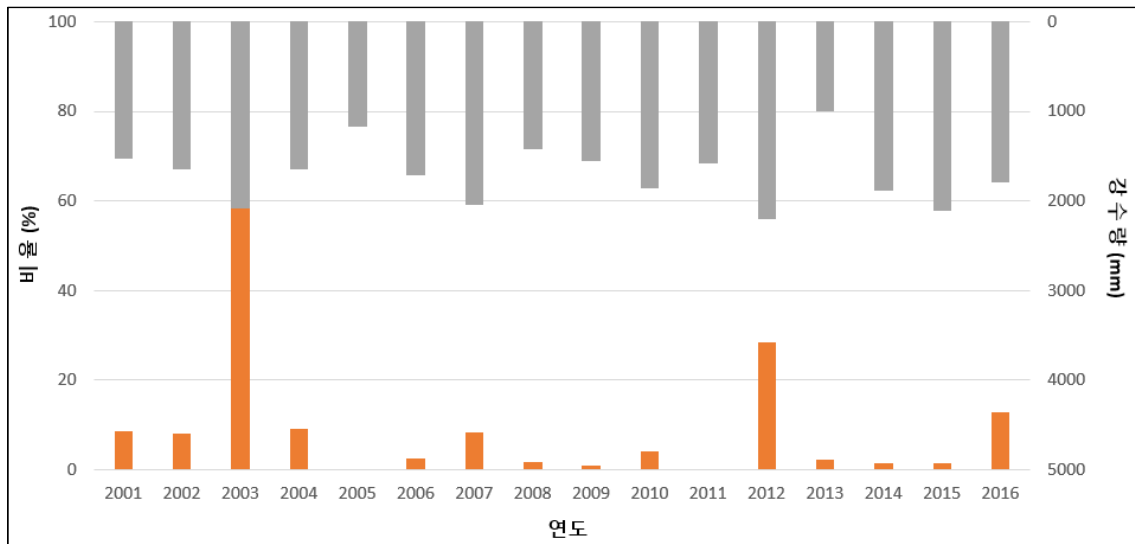


Fig. 4.6 Maximum groundwater level ratio by year

연평균 수위가 가장 낮게 나타난 연도는 2001년, 2005년, 2009년, 2013년으로 2001년까지 개발된 관측정 35개소 중 8개소(22.9%), 2005년까지 개발된 관측정 83개소 중 33개소(39.8%), 2009년까지 개발된 관측정 115개소 중 26개소(22.6%), 2013년까지 개발된 관측정 131개소 중 27개소(20.6%)에서 최저수위를 보였다(Table 4.7). 지하수위가 낮아지는 요인은 강수에 의한 영향으로 분석되며, 4~5년 주기에 따라 강수량이 적고, 지하수위 또한 낮아진다(Fig. 4.7).

Table 4.7 Minimum groundwater level by year

year	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
obs (point)	8	4	1	0	33	2	3	5
develop obs	35	37	63	76	83	85	96	110
rate (%)	22.9	10.8	1.6	0.0	39.8	2.4	3.1	4.5
precipitation (mm)	1535.2	1647.2	2083.2	1646.1	1169.7	1718.3	2046.2	1428.3

year	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
obs (point)	26	0	5	1	27	10	2	6
develop obs	115	121	125	130	131	131	133	133
rate (%)	22.6	0.0	4.0	0.8	20.6	7.6	1.5	4.5
precipitation (mm)	1549.5	1856.7	1579.0	2206.4	1001.7	1887.3	2108.8	1792.5

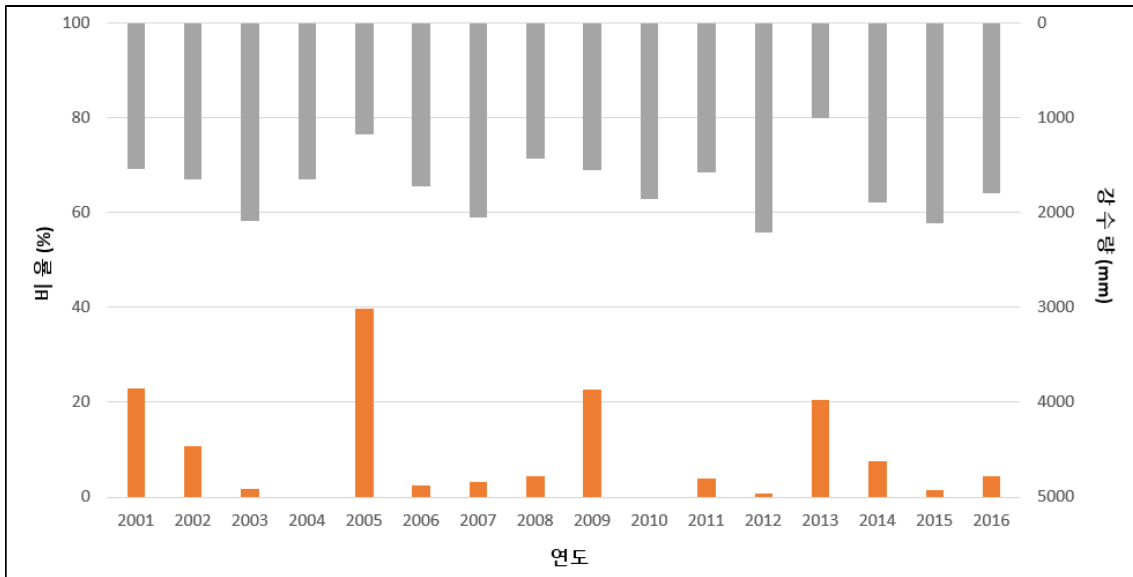


Fig. 4.7 minimum groundwater level ratio by year

### 1.2.2 월평균 지하수위 변동분석

관측개시 이후부터 2016년도까지 1월 ~ 12월 월별 수위를 조사하여, 관측정 별 월 평균 수위를 특성을 분석하였다. 지하수위가 최대 상승하는 시기는 9월과 10월로 분석되는데, 9월에 최대치를 보이는 관측정은 62개소로 전체 관측정 대비 46.6%이며, 10월은 32개소로 전체 관측정 대비 24.1%이다. 7월과 8월 또한, 각각 22

개소(16.5%), 9개소(6.8%)로 분석되었다(Fig. 4.8, Table 4.8).

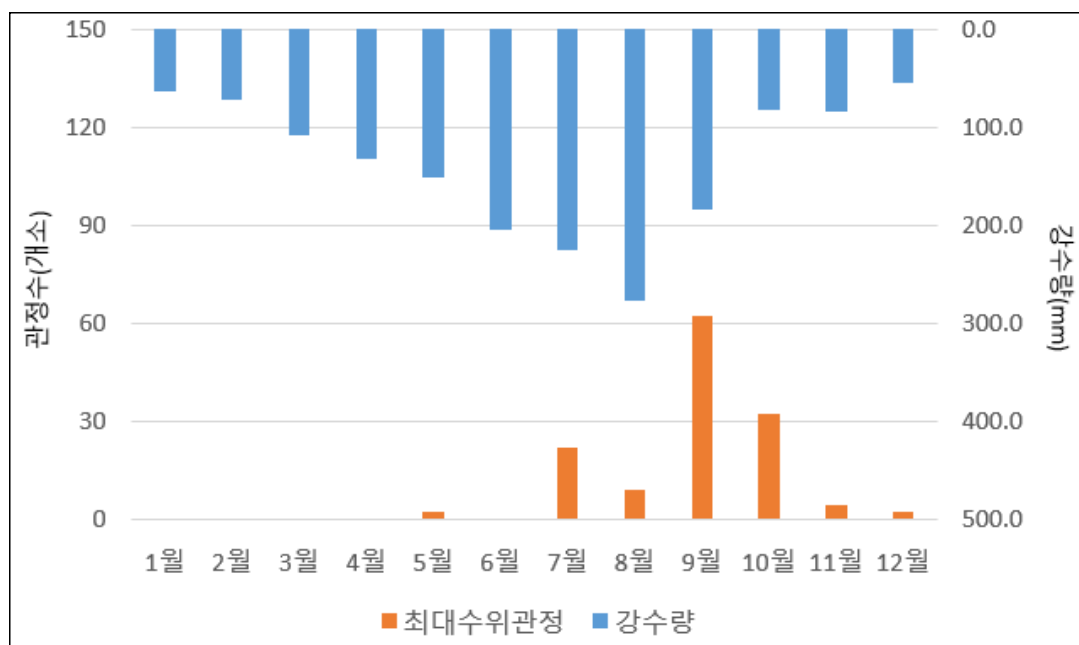


Fig. 4.8 Monthly precipitation and maximum groundwater level

Table 4.8 Monthly precipitation and maximum groundwater level

month	1	2	3	4	5	6
precipitation (mm)	62	71	108	133	151	204
maximum gw-level (point)	0	0	0	0	2	0
rate(%)	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50	0.00
month	7	8	9	10	11	12
precipitation (mm)	225	277	184	81	83	54
maximum gw-level (point)	22	9	62	32	4	2
rate(%)	16.54	6.77	46.62	24.06	3.01	1.50

지하수위가 최저로 하강하는 시기는 1월부터 4월까지로 분석되었다. 이중 2월과 3월에 지하수위가 최저치를 보이는 관정은 각각 40개소와 31개소로 전체 133개소 관측정 대비 53.4%를 차지하고 있으며, 1월과 4월은 각각 17개소(12.8%)와 16개소(12.0%)로 분석되었다. 강수량이 많은 7월 ~ 10월에는 지하수위 또한 매우 높게 나타났으며, 갈수기인 1월 ~ 4월까지의 지하수위가 낮게 분포한다(Fig. 4.9, Table 4.9).

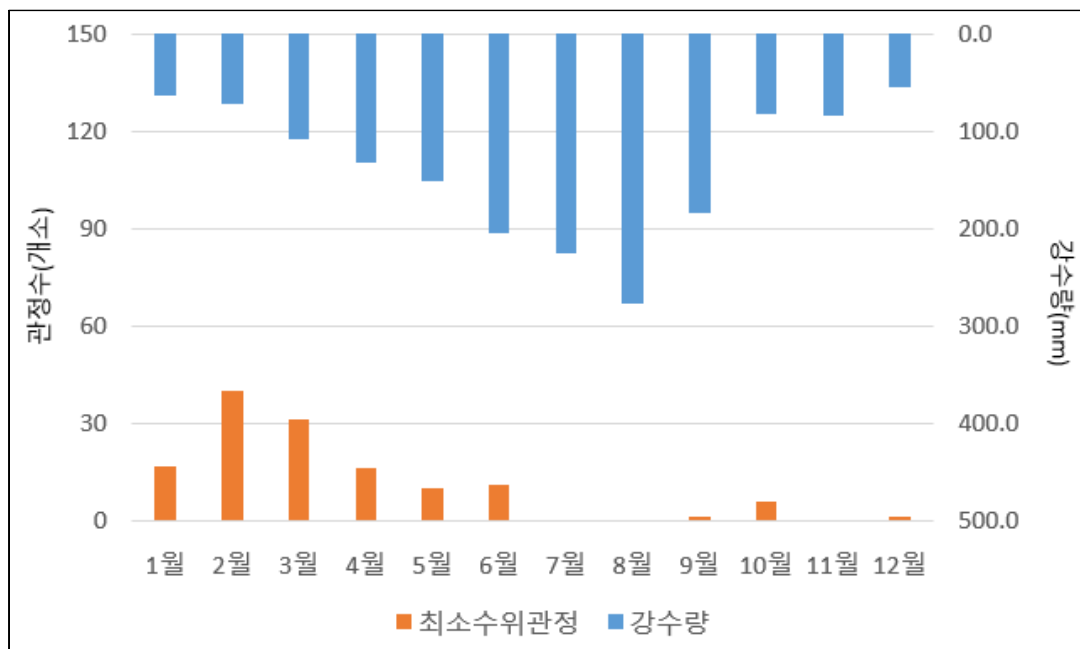


Fig. 4.9 Monthly precipitation and minimum groundwater level

Table 4.9 Monthly precipitation and minimum groundwater level

month	1	2	3	4	5	6
precipitation (mm)	62	71	108	133	151	204
minimum gw-level (point)	17	40	31	16	10	11
rate(%)	12.78	30.08	23.31	12.03	7.52	8.27

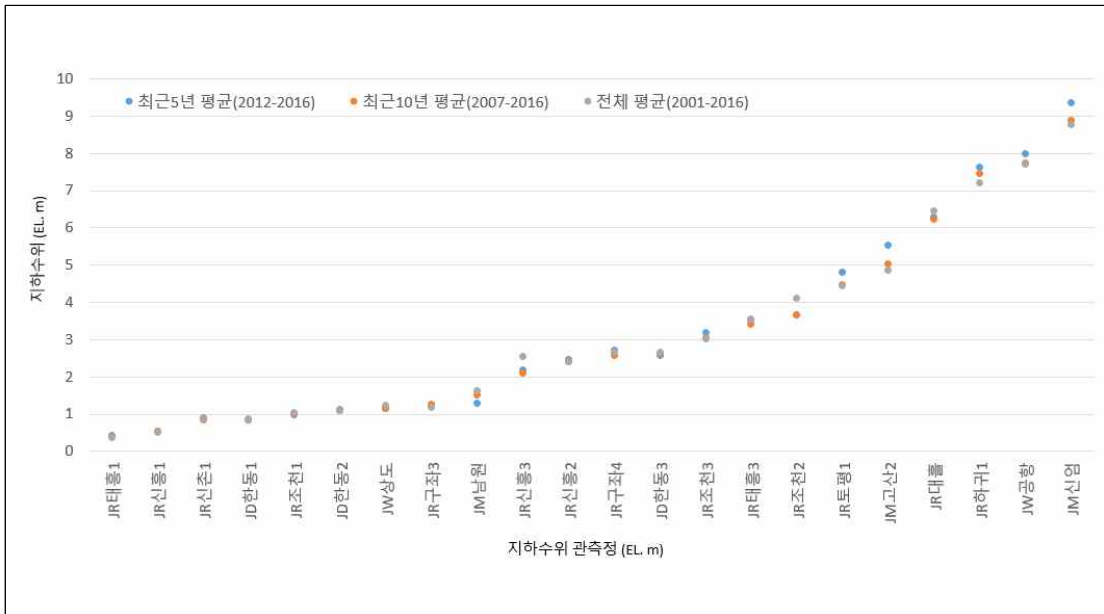


month	7	8	9	10	11	12
precipitation (mm)	225	277	184	81	83	54
minimum gw-level (point)	0	0	1	6	0	1
rate(%)	0.00	0.00	0.75	4.51	0.00	0.75

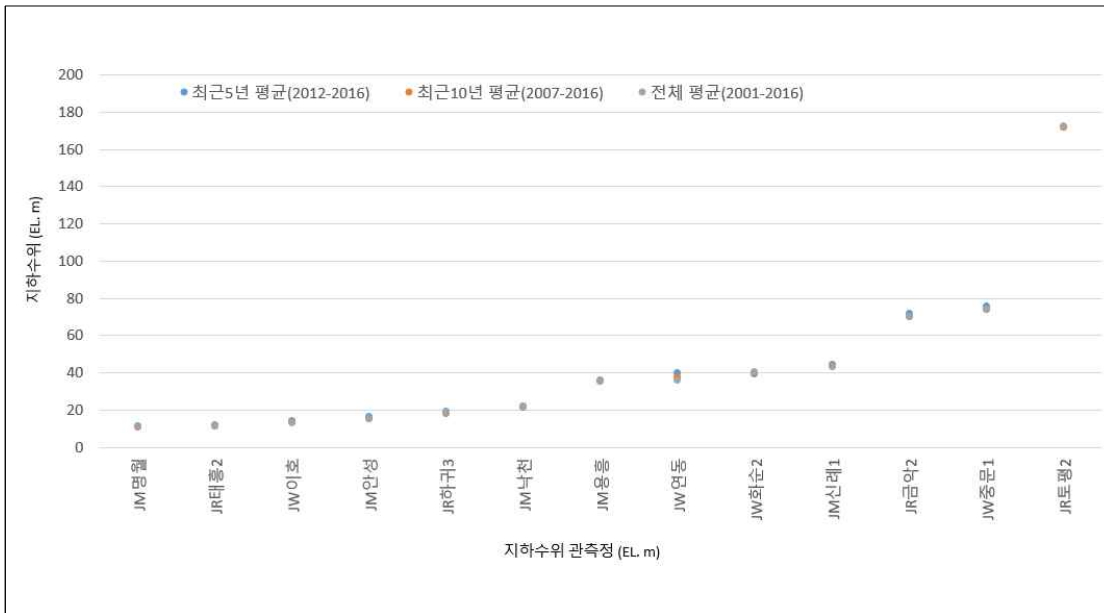
### 1.2.3 누적평균 지하수위 분석

2001년부터 2016년까지 연속적으로 관측된 지하수 관측정은 35개소로 총 누적 연수는 16년이며, 연속된 지하수위자료를 5년, 10년, 16년 각각의 누적평균수위로 산정하여 수위를 분석하였다.

2012년부터 2016년까지 최근 5년간 전체 관측정의 평균수위는 18.51m이며, JR태흥1관정이 0.43m로 가장 낮고, JR토평2 관측정이 172.26m로 가장 높다. 2007년부터 2016년까지 10년간 전체 관측정의 평균수위는 18.17이며, 5년 평균 자료와 동일하게 JR태흥1 관측정이 0.39m로 가장 낮고, JR토평2 관측정이 172.33m로 가장 높았다. 전 기간 평균수위 또한, JR태흥1 관측정이 0.39m, JR토평2 관측정이 172.49m이다 (Fig. 4.10). 관측정별 누적평균수위를 비교한 결과 수위차이가 0~0.5m범위로 나타난 관측정은 25개소이며, 0.5~1m는 6개소, 1~2m는 4개소 분석되었다. 앞서 분석한 연도별 지하수위 결과에 의하면 다우년과 과우년 패턴이 약 5년 정도로 보이고 있어, 이러한 영향에 따라 누적평균수위의 차이는 비교적 작게 산출되는 것으로 판단된다.



(a) groundwater level below 10m



(b) groundwater level over 10m

Fig. 4.10 Average groundwater level comparison(5year, 10year, 16year)

### 1.3 지하수위 자료 분석 및 활용성

도내에는 지하수위를 확인 할 수 있는 4,865개소의 지하수관정과 133개소의 지하수위 관측정이 있으며, 지하수 관정에서 측정된 지하수위 결과는 3,506개(측정결과 오류 및 미확인 자료 제외), 관측정에서 측정된 지하수위 자료 133개가 있다. 지하수위 관측 자료의 표본이 많을수록 지하수위 분석 및 유동특성 해석 결과의 신뢰도는 높아지지만, 검증 되지 않은 자료를 활용하는 것은 오히려 분석결과의 심각한 오류를 범할 수 있다.

지하수 개발·이용 관정에서 측정한 지하수위의 경우 본 연구의 분석 자료로 활용하기에는 한계가 있을 수 있다. 첫째로, 측정시기에 대한 문제이다. 제주지역의 지하수위는 강수에 영향이 매우 크지만 지하수 관정에서 측정된 지하수 결과는 동일 연도 및 월 등 기간의 폭이 매우 크다. 기존연구결과에 의하면 제주도 서부, 북부, 남부지역은 강수량에 따라 상당한 지하수위 변동범위가 나타나고, 계절적 영향에 따라 상승과 하강 패턴이 발생된다(Park 등, 1994). 지하수 개발·이용관정의 경우 장기적으로 관측하는 것이 아니라 특정시기에 1회 측정한 결과로 지하수위 측정당시 강수특성 등의 영향에 따라 지하수위의 결과가 다양하다. 두 번째로 굴착심도에 대한 문제이다. 지하수 개발·이용시설(사설관정)의 이용자는 지하수 연구 및 수리특성 등을 고려하여 지하수를 굴착하기보다 1일 양수능력에 따라 굴착심도를 결정하였다. 즉, 양수시험을 통해 필요수량에 도달할 경우 굴착을 종료하고, 필요수량 만큼만을 이용하고 있는 것이다. 특히, 제주도 지하수의 대수층 구조는 수직적으로 발달되어 있어 굴착심도에 따라 대수층 특성이 지역별뿐만 아니라 관정별로도 다르기 때문에 지하수위 및 대수층 산출특성이 상이하게 나타나고, 필요수량에 따라 상이하게 굴착된 지하수 관정을 연구목적으로 활용하기에는 적절하지 않다. 세 번째로는 지하수위 측정 장비 및 측정자에 대한 오차이다. 2000년 이전에 개발된 지하수 관정이 전체 관정의 83.4%를 차지하고 있고, 이 시기에는 정밀화된 지하수위 측정 장비인 압력식 수위기록장비(Diver), 센서형 수위측정기(KL010, Deeper R1)(<http://www.candh.co.kr>)등이 보편화되기 이전으로 측정방법에 대한 신뢰성이 부족하다. 또한 2016년 말 기준 도내 지하수 시공기업은 20개소 이상이며, 지하수 개발에 따른 지하수위 측정자가 상이하므로 측정결과에 대한 오차 등에 보정은 이

루어지지 않았다. 네 번째로 지하수위 측정결과의 기재방법에 대한 문제이다. 지하수위를 측정하여 기재하는 방법으로는 EL. m과 GL. m으로 구분되는데, 현재는 두 가지를 기재하거나 명확히 측정 기준을 기록하고 있지만, 과거 수위측정 결과의 기재방법은 두 가지를 혼용하여 작성되어 수위측정 결과를 어떠한 기준에 의해 기재하였는지 불분명한 결과를 나타낸다.

인근지역의 지하수위 분포를 예측하거나 모델 등의 분석과정에서 부득이하게, 지하수 개발 당시의 지하수위 자료를 검증자료로 활용하고자 한다면 지하수위 자료의 측정시기와 개발당시의 강수특성, 지하수관정 지역의 대수층특성 등 지하수위 자료의 신뢰성 검증을 수행한 후 활용하는 것이 바람직하다.

이와 반면, 지하수 관측정에서 측정된 지하수위 결과는 장기적으로 관측된 연속적인 데이터를 포함하며, 관측정으로부터 자동 측정된 결과를 전용서버로 전송하여 관리자가 데이터 오류 등의 자료를 필터링한 후 제주특별자치도 지하수관측정보 관리시스템(<http://211.184.196.131>)에 등록·제공되므로 자료의 신뢰성은 사실 지하수 관정에 비해 높다고 볼 수 있다. 다만, 조석변동에 의해 지하수위가 이상적이지 않은 결과를 보이거나, 지하수위 관측이 아닌 다른 목적에 의해 지하수 굴착심도를 다르게 한 관측정은 대수층의 영향에 따라 지하수위가 인근지역과 상이한 결과로 나타날 수 있어 분석의 목적에 따라 재분류한 후 사용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

## 2. 지하수위와 표고 및 해안거리와의 상관분석

상관분석(Correlation Analysis)은 두 변수 간의 관련성을 규명하기 위한 통계적 분석방법으로 변수간의 관련성을 검토하고 유의성을 검증하기 위해 사용되는 방법이다(Park, 2012). 상관분석에 적용되는 변수로는 독립변수와 종속변수로 구분할 수 있는데, 함수관계에서 다른 변수의 변화와는 관계없이 독립적으로 변화하는 독립변수(Independent Variable)로 분류되고, 독립변수가 변화함에 따라 그 영향으로 변하는 변수를 종속변수(Dependent Variable)로 구분된다(Sung, 2011).

상관분석 결과는 상관관계의 정도를 수치로 나타내어 정도를 표현하며, 이 때 적용되는 수치를 두 변수간의 선형성(Linearity)을 검토할 수 있는 상관계수(r)와 독립변수의 변화에 따라 종속변수의 변동양상을 검토할 수 있는 결정계수(Coefficient of determination, R-Sq)로 판단한다. r의 상관 범위는  $-1 < r < 1$ 로써 0.8이상이면 연관성이 매우 높다고 보며, 0.6 ~ 0.8은 연관성이 높음, 0.4 ~ 0.6은 연관이 있음, 0.2 ~ 0.4는 연관성이 낮음, 0.2이하는 연관성이 거의 없다고 보고,  $R^2$ 의 범위는  $0 \leq R^2 \leq 1$ 로써 1에 가까워질수록 회귀선의 적용성이 높다고 판단한다(Won, 2007).

이 연구에서는 표고와 지하수위의 관계를 비교·분석하기 위해 지하수 개발 당시 측정된 지하수위 자료를 제외하고 연속적으로 관측된 지하수 관측정 자료를 활용하였다. 자료의 범위는 매년 동일한 일자의 시간에 관측된 결과를 이용하거나 연평균 자료를 이용할 수 있다. 그러나 매년 동일 일자의 지하수위 결과는 계절적영향이나 강수의 특성에 따라 일시적으로 변동되는 결과를 나타낼 수 있으며, 연평균 자료는 해당 자료의 연도별 강수특성에 따라 높게 산출되거나 낮은 수위특성을 보일 수 있기 때문에 본 연구에서는 앞 절에서 조사된 누적평균수위 비교 결과에 따라 5년 평균 지하수 자료를 활용하였다.

2012년 이후 관측 개시된 지하수 관측정은 130개소이며, 이중 도서지역 관측정과 평균지하수위가 해수면이하로 관측되는 관측정, 인공함양조사 목적에 따라 굴착심도가 다르고 개발방법이 상이한 관측정은 이 연구에서 제외하여 총 125개소의 5년간 누적자료를 활용하여 제주도 전역을 대상으로 해안거리(해안에서부터 관측정까지의 거리)에 따른 표고 및 지하수위 관계, 표고와 지하수위 상관관계 분석, 지역별 표고와 지하수위를 비교·분석하였다.

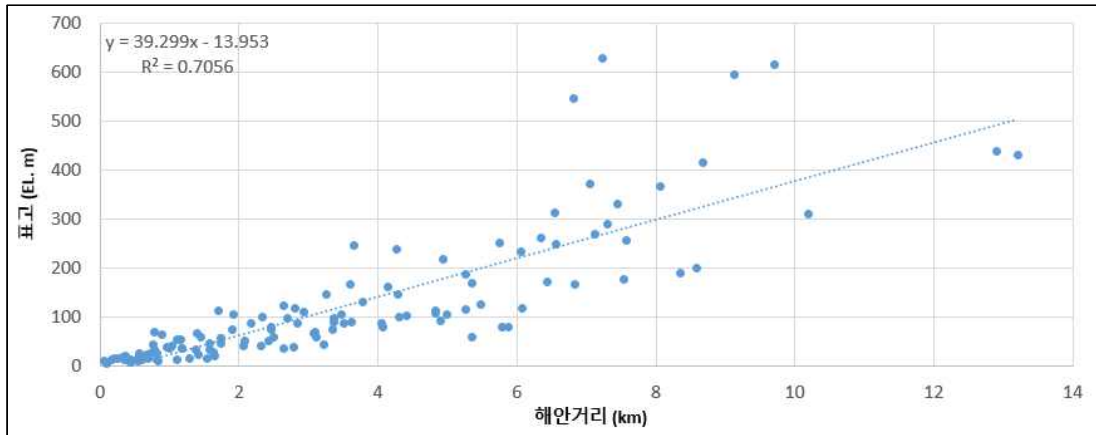
## 2.1 해안거리와 표고와의 상관분석

제주도 전역을 대상으로 해안거리(해안에서부터 관측점까지의 거리)와 표고의 상관분석 결과  $r$ 은 0.8400,  $R^2$ 는 0.7056이며, 거리에 따른 표고의 기울기는 약 39.29로 분석되었다. 지역별 해안거리-표고 상관분석 결과 동부지역의  $r$ 은 0.9662,  $R^2$ 는 0.9336로 해안거리와 표고와의 상관도는 비교적 높은 것으로 확인되었으며, 거리에 따른 표고의 기울기는 약 29.65로 분석되었다. 서부지역의  $r$ 은 0.8851,  $R^2$ 는 0.7835로 분석되었으며, 거리에 따른 표고의 기울기는 약 35.78로 분석되었다. 남부지역의  $r$ 은 0.9308,  $R^2$ 는 0.8664로 분석되었으며, 거리에 따른 기울기는 약 70.97로 분석되었다. 북부지역의  $r$ 은 0.9412,  $R^2$ 는 0.8859로 분석되었으며, 기울기는 약 48.75로 분석되었다(Table 4.10).

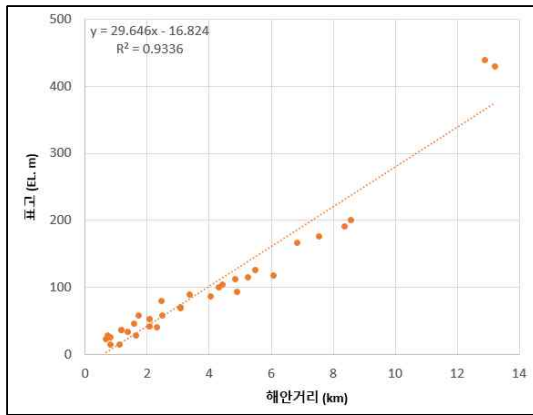
동서남북 지역의 해안에서부터 상류지역으로의 거리에 따른 표고의 관계를 분석한 결과 전반적으로 거리가 상승됨에 따라 표고가 높아지는 특성을 보이고, 기울기는 남부지역이 가장 급하고, 북부, 서부, 동부 순으로 분석되었다(Fig. 4.11).

Table 4.10 Coastal distance-elevation correlation analysis

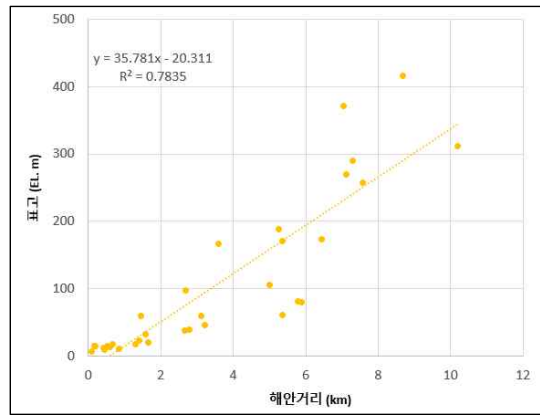
class	Jejudo	Eastern	Western	Southern	Northern
data	125	33	33	24	35
$r$	0.8400	0.9662	0.8851	0.9308	0.9412
$R^2$	0.7056	0.9336	0.7835	0.8664	0.8859
leaning	39.30	29.65	35.78	70.97	48.75



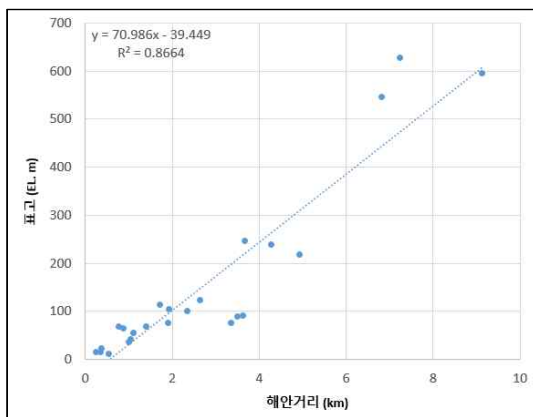
(a) Jeju



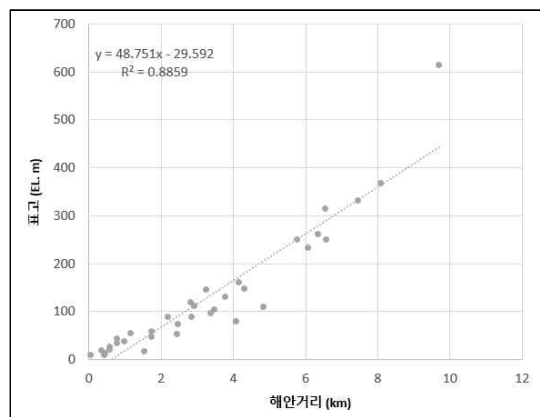
(b) Eastern



(c) Western



(d) Southern



(e) Northern

Fig. 4.11 Regional coastal distance–elevation correlation analysis

## 2.2 지하수위와 해안거리와의 상관분석

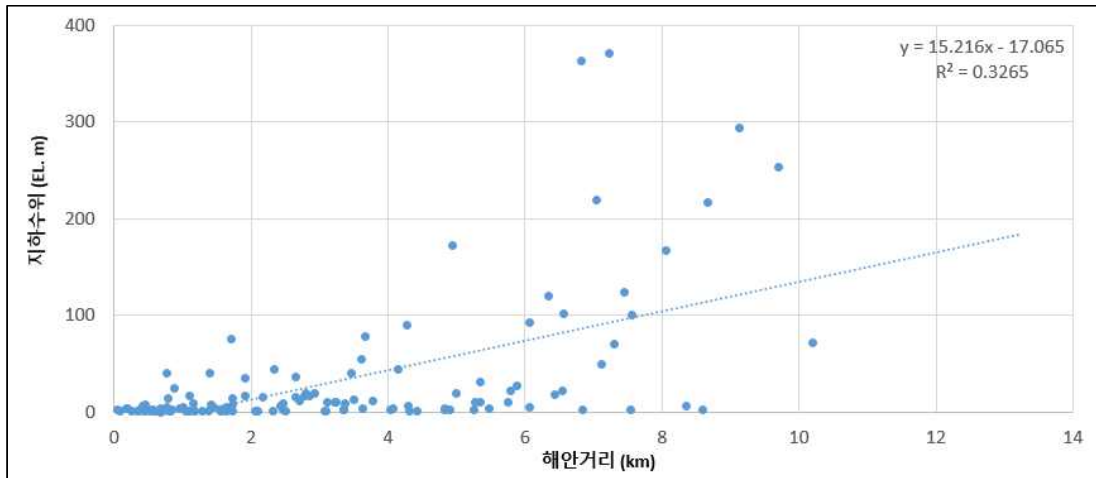
제주도 전역을 대상으로 지하수위와 해안거리의 상관분석 결과  $r$ 은 0.5714,  $R^2$ 는 0.3265이며, 거리에 따른 표고의 기울기는 약 15.21로 분석되었다. 지역별 해안거리에 따른 지하수위 특성 분석결과 동부지역의  $r$ 은 0.7532,  $R^2$ 는 0.5673으로 분석되었으며, 서부지역의  $r$ 은 0.6746,  $R^2$ 는 0.4551, 남부지역의  $r$ 은 0.8670,  $R^2$ 는 0.7516, 북부지역의  $r$ 은 0.8035,  $R^2$ 는 0.6455로 분석되었다(Table 4.11). 전반적으로 해안에서부터 거리가 길어짐에 따라 지하수위는 상승하는데, 남부와 북부지역은 비교적 높은 상관도를 나타냈으며, 동부지역과 서부지역은 비교적 낮은 상관도를 보였다(Fig. 4.12).

거리에 따른 지하수위 기울기 특성을 보면, 동부지역은 약 0.41, 서부지역은 약 12.59, 남부지역은 약 41.00, 북부지역은 18.00으로 분석되어 남부지역이 가장 급하고, 동부지역이 가장 완만한 특성으로 분석되었다.

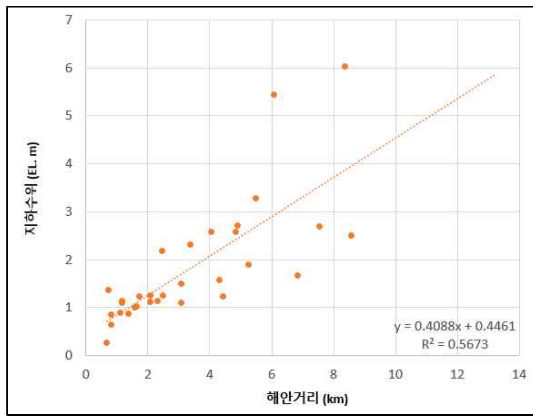
Table 4.11 Coastal distance-Groundwater correlation analysis

class	Jejudo	Eastern	Western	Southern	Northern
data	125	33	33	24	35
r	0.5714	0.7532	0.6746	0.8670	0.8035
$R^2$	0.3265	0.5673	0.4551	0.7516	0.6455
leaning	15.21	0.41	12.59	41.00	18.00

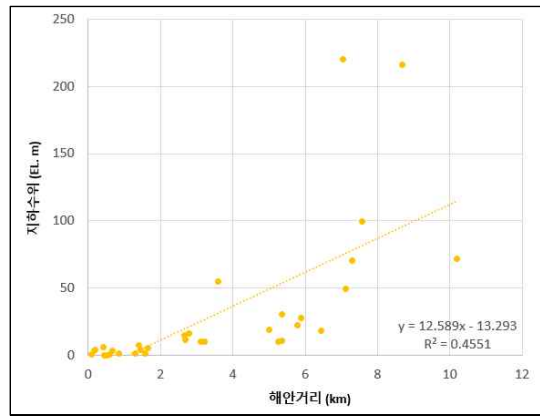




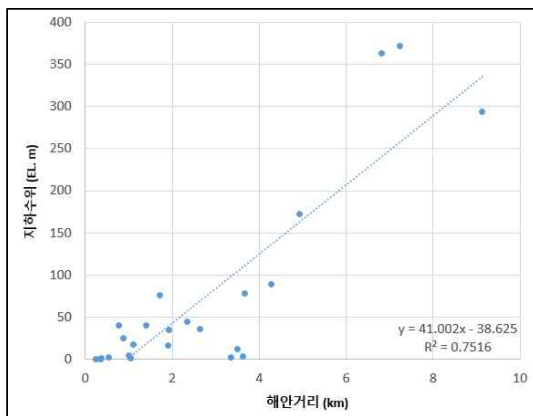
(a) Jeju



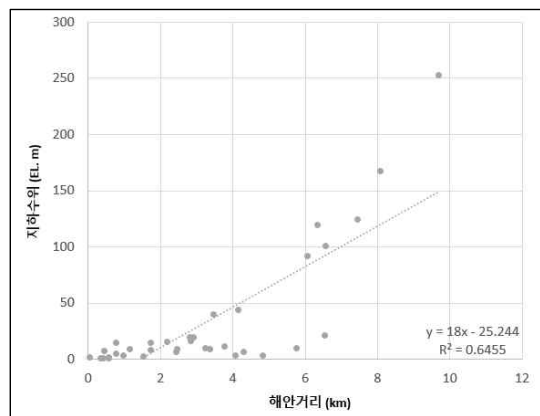
(b) Eastern



(c) Western



(d) Southern



(e) Northern

Fig. 4.12 Regional coastal distance–groundwater correlation analysis

### 2.3 지하수위와 표고와의 상관분석

제주도 전역을 대상으로 표고와 지하수위의 상관분석을 수행한 결과  $r$ 은 0.8950,  $R^2$ 는 0.8011로 비교적 높은 상관도를 나타냈다. 그러나 표고를 100m단위로 구분하여 표고-지하수위 상관분석을 수행한 결과 100m 이하 76개의 지하수위를 이용하여 분석한 결과  $r$ 은 0.4379,  $R^2$ 는 0.1918로 매우 낮은 상관도를 보였으며, 200m 이하 102개의 지하수위를 이용하여 분석한 결과  $r$ 은 0.4066,  $R^2$ 는 0.1653으로 매우 낮은 상관도를 보였다. 300m이하 113개의 지하수위를 적용하여 분석한 결과  $r$ 은 0.6767,  $R^2$ 는 0.4579로 분석되었으며, 400m 이하는  $r$ 은 0.7537,  $R^2$ 는 0.5681, 500m 이하는  $r$ 은 0.8236,  $R^2$ 는 0.6783로 분석되었다(Table 4.12).

전체 지하수위 자료를 입력하여 분석한 결과 비교적 양호한 상관도를 보였으나, 200m이하의 지역은 매우 낮게 분석되는데, 이는 표본자료의 분산도와 표준편차의 차이에 따라 차이가 발생한다. 200m이하 지역 102개소의 지하수위 표본의 분산은 183.1, 표준편차는 13.5인 반면, 전역 125개소의 지하수위 표본의 분산은 5,121.8, 표준편차는 71.6으로 분산도는 약 28배의 차이를 보이고 표준편차 또한 5.3배 차이를 보인다. 즉, 표고와 지하수위 자료의 범위가 증가되면서 상대적으로 전체 지하수위-표고 상관분석 결과가 높게나오는 경향을 보인다(Fig. 4.13). 또한 표고 200m이하의 지역에는 표본수의 81.6%가 밀집되어 있고, 표고 200m에서 700m이내에는 18.4%가 있어 자료의 분석결과에 대해서는 밀집도를 통해 200m이내의 결과로 해석하는 것이 적절하다고 판단된다.

Table 4.12 Elevation-groundwater correlation analysis

class	Jejudo	over 100m	over 200m	over 300m	over 400m	over 500m
data	125	76	102	113	118	121
$r$	0.8950	0.4379	0.4066	0.6767	0.7537	0.8236
$R^2$	0.8011	0.1918	0.1653	0.4579	0.5681	0.6783

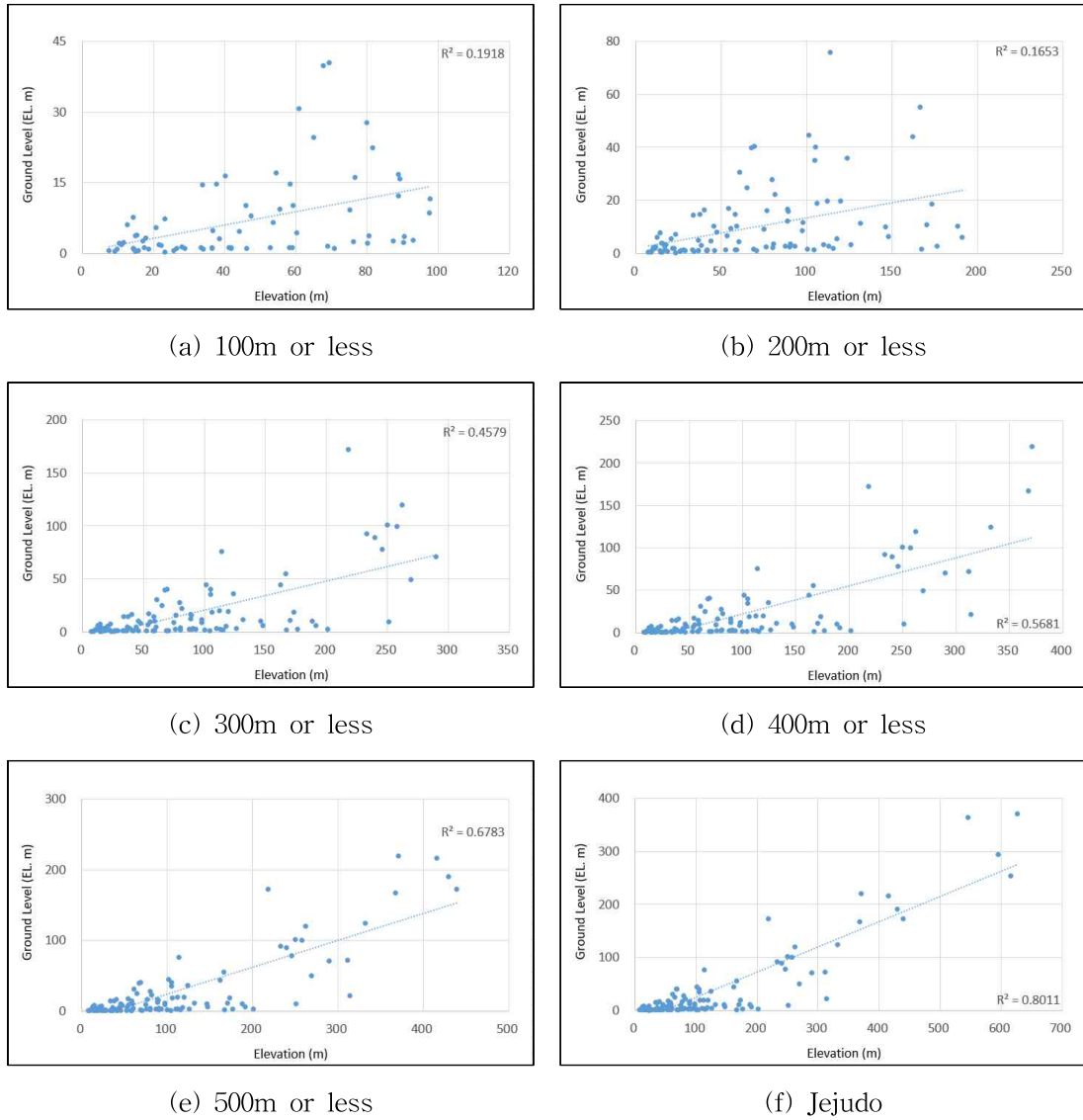
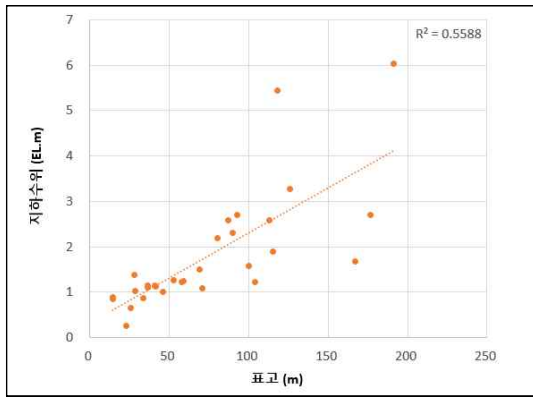
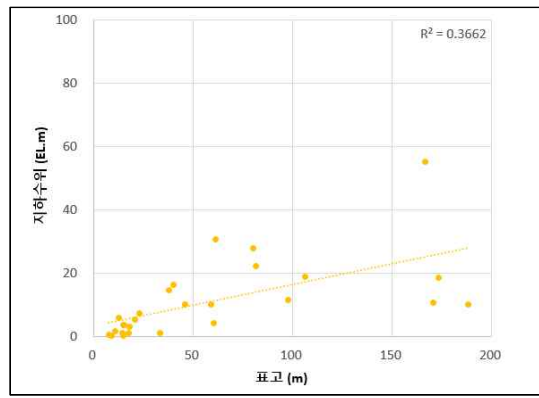


Fig. 4.13 Elevation-groundwater correlation analysis by elevation

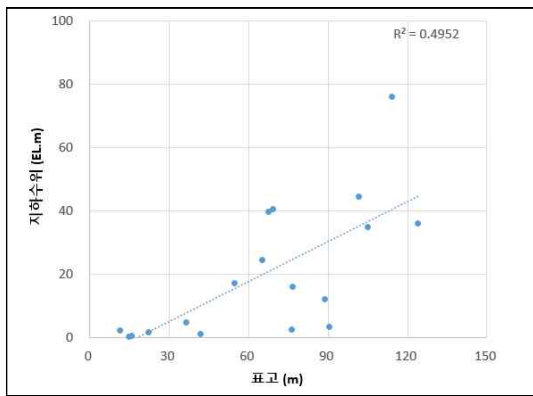
지하수위 자료의 표본이 가장 많이 밀집된 200m 이내의 표고-지하수위간의 상관도를 지역별로 구분하여 상관관계를 분석하였다. 지역별 상관분석 결과 동부지역은  $r$ 이 0.7475,  $R^2$ 는 0.5588, 서부지역의  $r$ 은 0.6052,  $R^2$ 는 0.3662, 남부지역의  $r$ 은 0.7037,  $R^2$ 는 0.4952, 북부지역의  $r$ 은 0.5957,  $R^2$ 는 0.3545로 분석되었다(Fig. 4.14, Table 4.13).



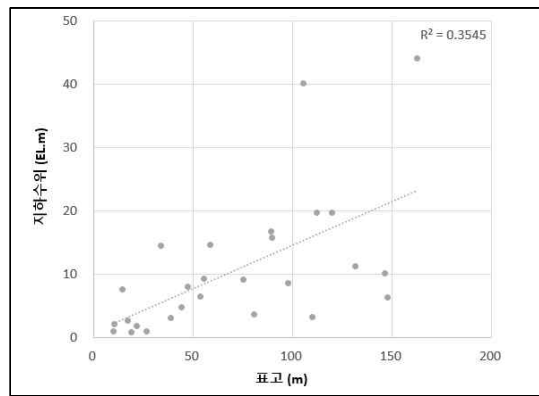
(b) Eastern



(c) Western



(d) Southern



(e) Northern

Fig. 4.14 Regional elevation-groundwater correlation analysis

Table 4.13 Regional elevation-groundwater correlation analysis

class	Eastern	Western	Southern	Northern
data	30	27	18	27
r	0.7475	0.6052	0.7037	0.5954
R <sup>2</sup>	0.5588	0.3662	0.4952	0.3545

## 2.4 지역별 표고와 지하수위 관계 비교·분석

### 2.4.1 동부지역 표고와 지하수위 비교·분석

동부지역 표고 60m이내에 위치한 관측정을 비교한 결과, JD-삼달1의 표고는 27.96m이지만, 지하수위는 1.37m로 해당지점의 표고보다 높은 10개소의 관측정에 비해 지하수위가 높게 나타났다. 특히, JD-세화2와 JD-하천2의 표고는 58.10m와 58.9m로 JD-삼달1과의 표고 차는 30.14~30.97m이지만 유사한 수위가 나타난다. JR-구좌1의 관측정 또한 지하수위는 1.01m로 표고가 17.26m차이 나는 JW-고성 관측정과 유사한 수위를 보인다(Fig. 4.15).

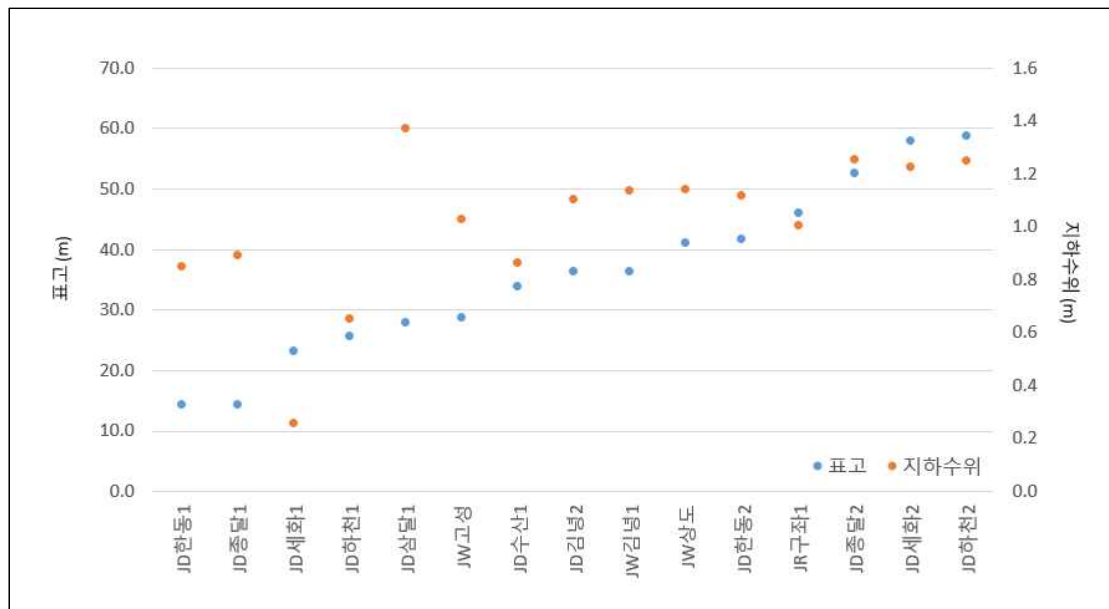


Fig. 4.15 Relation between elevation and groundwater level in eastern (60m or less)

동부지역 표고 60~250m에 위치한 관측정의 표고-지하수위 관계를 비교한 결과, JD-종달4, 종달5, 수산4는 표고가 167.21~201.24m임에도 지하수위는 1.67~2.50m으로 표고차가 최대 113.82m차이가 나는 JD-하천4, 삼달2, JR-구좌4의 수위와 유사하다. 또한 JD-하천4와 같은 경우 유사한 표고분포를 보이는 관측정에 비해 지하수위

는 2m이상 차이가 발생하였다(Fig. 4.16).

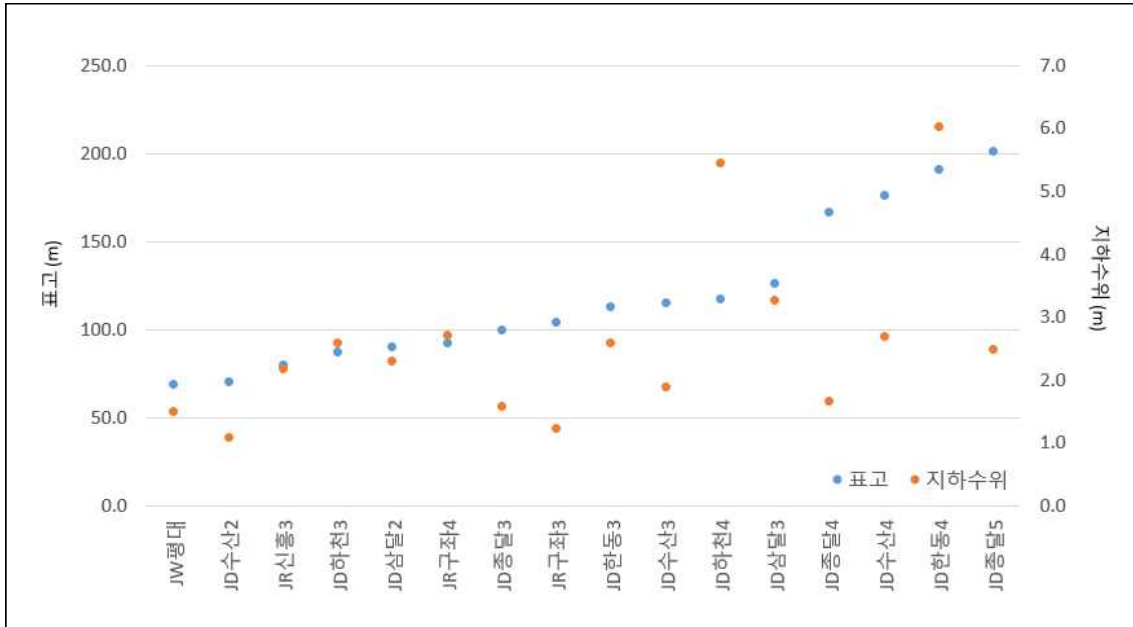


Fig. 4.16 Relation between elevation and groundwater level in eastern (60~250m)

#### 2.4.2 서부지역 표고와 지하수위 비교·분석

서부지역 표고 60m이내에 위치한 관측정을 비교한 결과, JD-협재 관측정의 표고는 12.57 m이지만, 지하수위는 6.04m로 JD-한림1, JW-한장동, JD-관포1, JD-일과, JD-영락1, JD-상모1, JM고산2와 표고-수위 반비례 특성이 나타났다. 특히, JW-한장동과 JD-영락1, 신도2의 지하수위는 0.39~1.2m로 비교적 낮은 분포를 보이지만 표고는 다른 관측정에 비해 높게 분포하고 있다. 또한 JD-무릉2와 한림2는 JD-용수2와 JM안성과 반비례 특성을 보인다(Fig. 4.17).

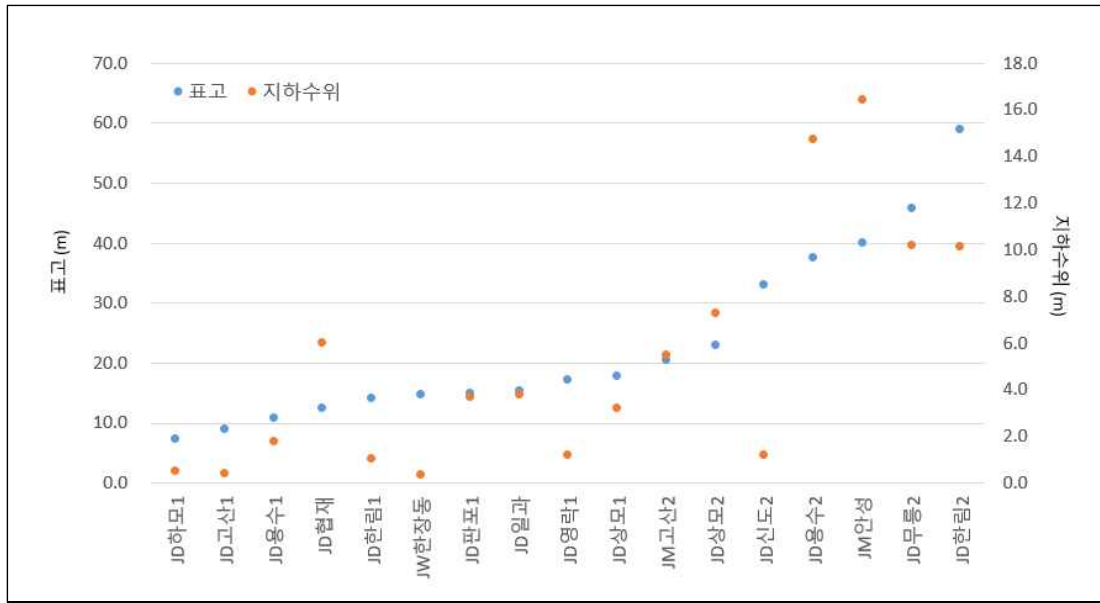


Fig. 4.17 Relation between elevation and groundwater level in Western (60m or less)

서부지역 표고 60~450m에 위치한 관측정의 표고-지하수위 관계를 비교한 결과, JR-봉성, 금악1, 어음2는 표고 170.58~188.31m에 위치하지만 지하수위는 10.13~18.63m로 표고 100m이하에 위치한 관측정 보다 낮은 지하수위분포를 보이고 있다. 또한, JR-상예2, 서광3과 JI원종장1, 원종장3, JR-금악2은 표고와 지하수위가 반비례 특성이 나타난다(Fig. 4.18).

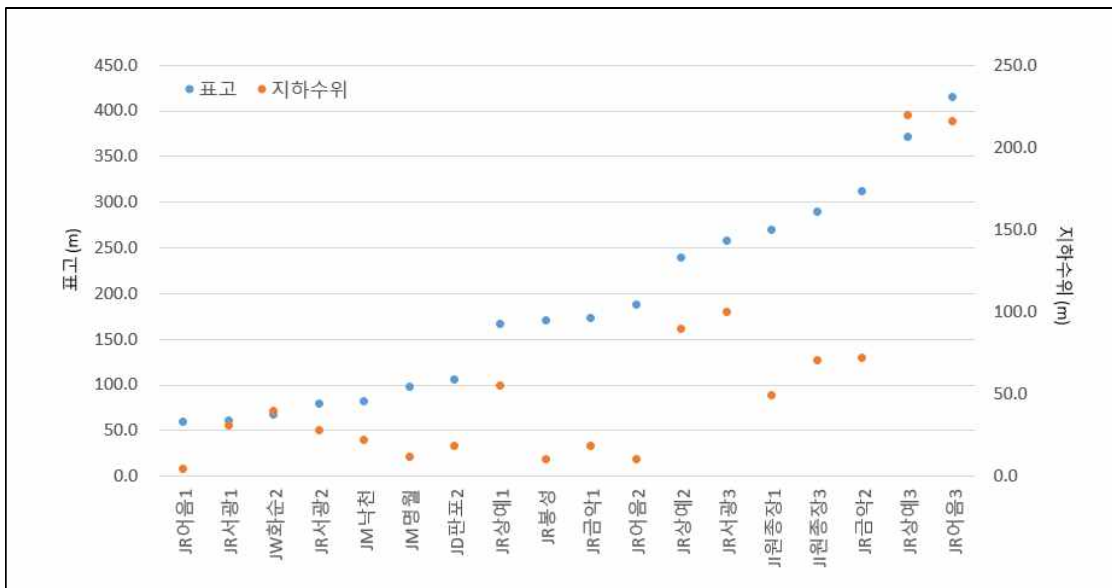


Fig. 4.18 Relation between elevation and groundwater level in Western (60~450m)

### 2.4.3 남부지역 표고와 지하수위 비교·분석

남부지역 표고 80m이내에 위치한 관측정을 비교한 결과, 대체적으로 표고와 지하수위가 유사하게 나타는 것으로 확인되었다. 그러나 JM-남원의 경우 표고가 41.79m 이지만 지하수위는 1.28로 해당지역보다 낮은 표고에 위치한 JD-위미1, JR-토평1에 비해 낮은 수위를 보이고 있으며, JR-신흥2 또한 표고 76.15m이지만 지하수위는 2.46m로 비교적 낮은 수위특성이 나타난다(Fig. 4.19).

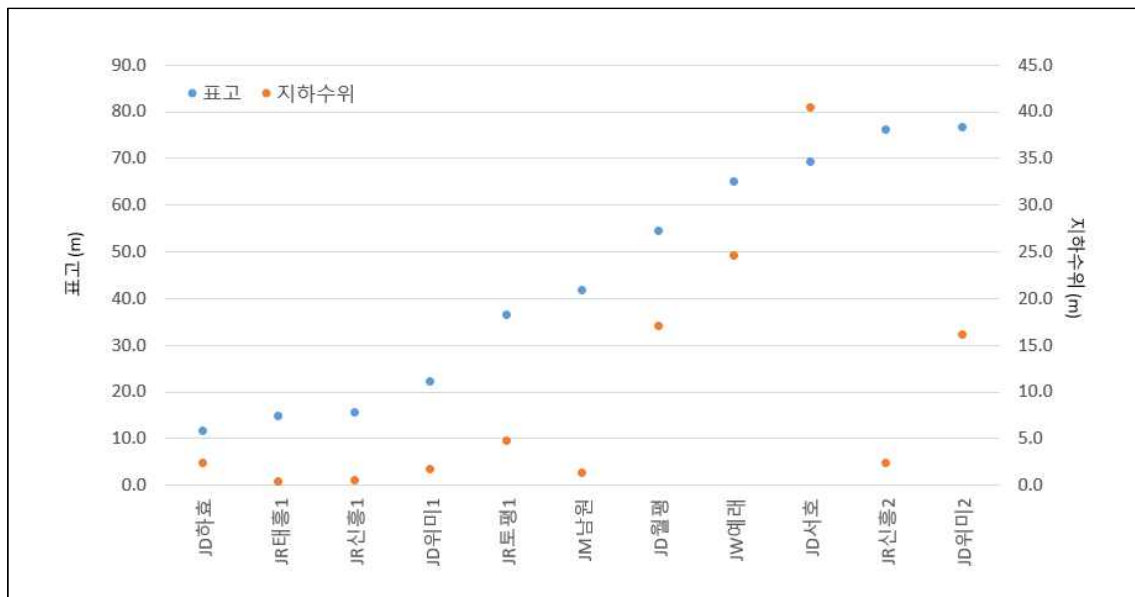


Fig. 4.19 Relation between elevation and groundwater level in Southern (80m or less)

남부지역 표고 80~650m에 위치한 관측정의 표고-지하수위 관계를 비교한 결과, 전반적으로 표고가 상승함에 따라 지하수위도 상승하는 것으로 보이는데, JW-중문1과 JM-용흥, JR-토평2와 JR-회수2, JH-중문3과 JH-신례2 관측정이 서로 반비례적 특성을 보인다(Fig. 4.20).



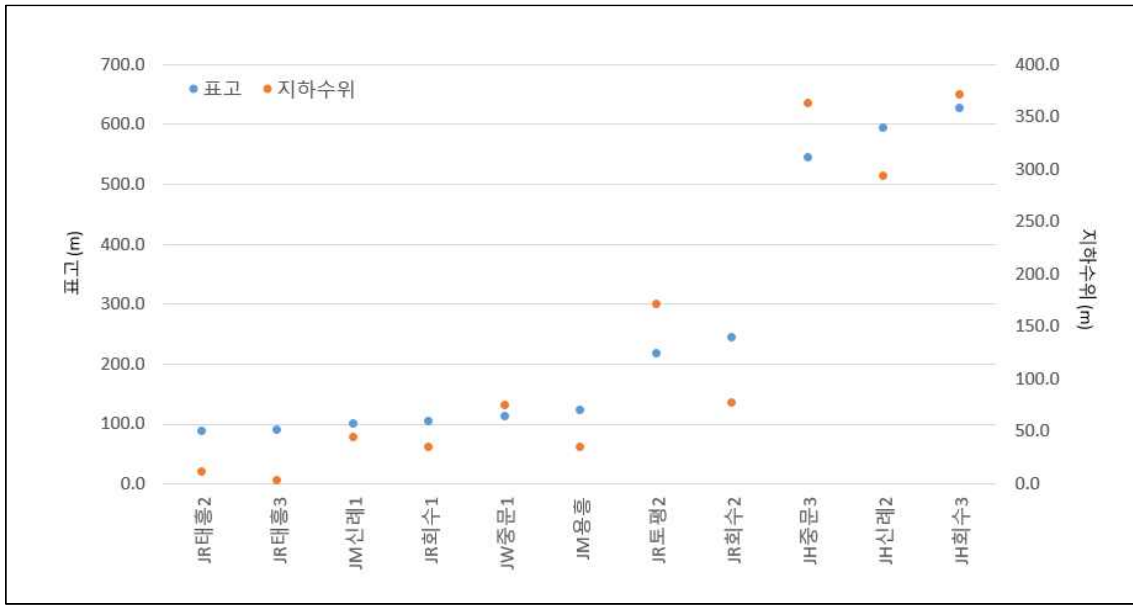


Fig. 4.20 Relation between elevation and groundwater level in Southern (80~650m)

#### 2.4.4 북부지역 표고와 지하수위 비교·분석

북부지역 표고 90m이내에 위치한 관측정을 비교한 결과, 대체적으로 표고와 지하수위가 유사하게 나타는 것으로 확인되었다. 그러나 JR-하귀1, JW-이호, JM-이도2 관측정은 유사한 표고분포의 관측정 대비 지하수위가 비교적 높게 나타나는 특성을 보이고, JR-조천2 관측정은 표고가 80.55m로 비교적 높게 분포하지만, 지하수위는 3.67m로 표고 20m이내의 관정들과 유사한 수위특성을 보인다(Fig. 4.21).

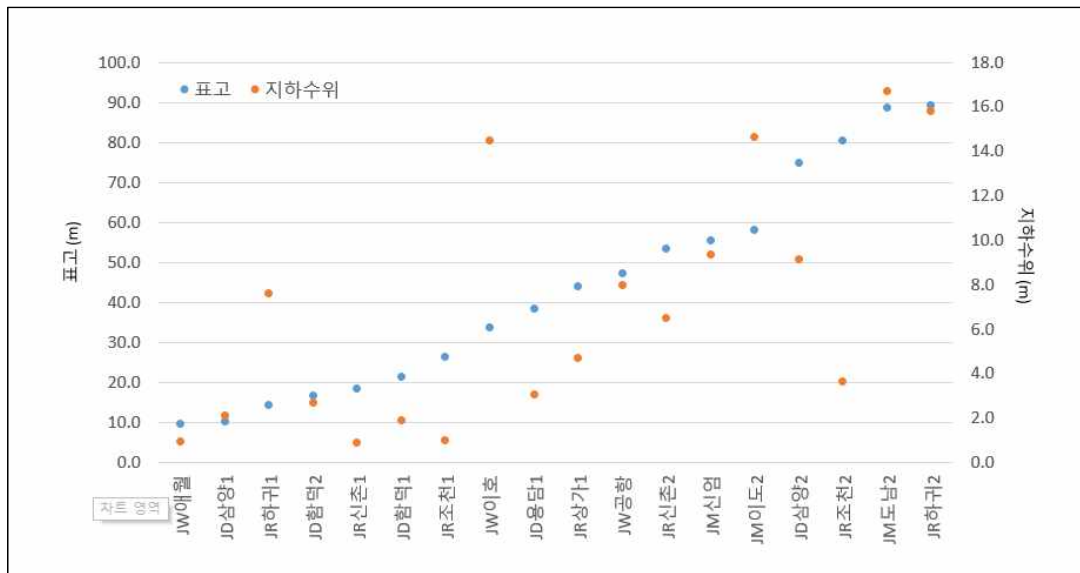


Fig. 4.21 Relation between elevation and groundwater level in Northern (90m or less)

북부지역 표고 90~650m에 위치한 관측정을 비교한 결과, 표고가 상승함에 따라 지하수위가 상승하는 것으로 나타나지만, JW-연동 관측정은 유사표고 지점대비 높은 지하수위특성을 보이고, JR-조천3, 대흘은 비교적 낮은 수위를 보인다. 특히, JR-상가3, 장전2는 유사한 표고지역의 지하수위 대비, 약 80m 낮은 지하수위 특성을 보인다(Fig. 4.22)

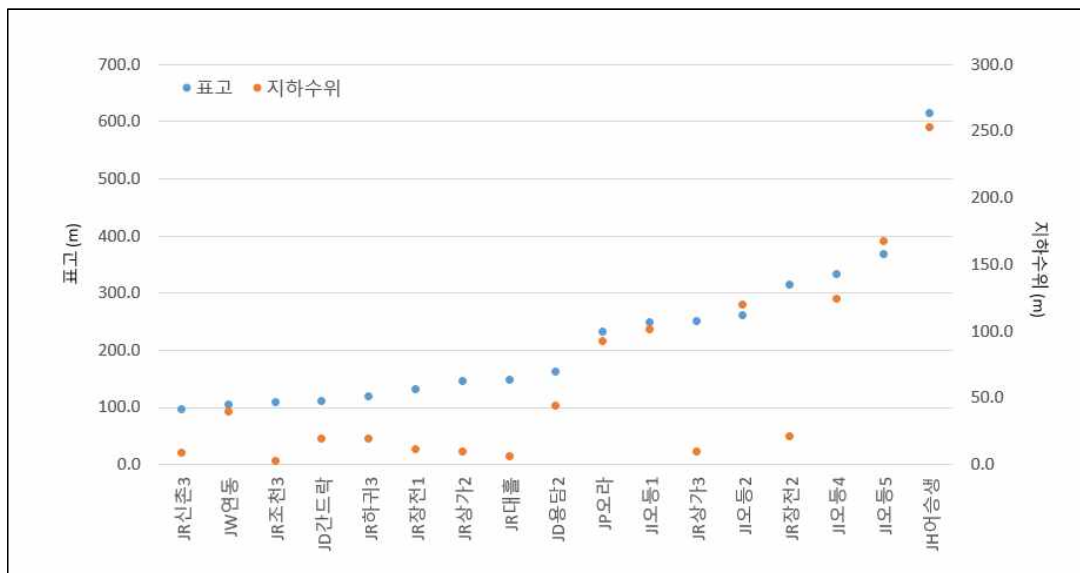


Fig. 4.22 Relation between elevation and groundwater level in Northern (90~650m)

### 3. 지하수 등수위선 구축과 지하수 유역경계 설정

#### 3.1 지하수 등수위선 구축

제주도 전역의 등수위선을 구축하기 위하여 공간보간법을 이용하였다. IDW는 근접 관측치에 가중 값을 주어 선형가중이동평균을 이용하는 방법으로 관측 값과 관측 값의 거리가 짧고, 밀집된 경우에 적절한 방법이며, Spline은 전체 표면의 굴곡을 최소화하는 수학적 연산으로 값을 추정하며, 부드러운 표면을 산출하는 방법으로 기온과 같은 다양한 현상을 부드럽게 표현하기에 적절한 방법이다. Kriging은 관측치의 거리 상관성 또는 방향성이 파악되는 경우 적절하며, 주변의 측정값을 통계적으로 분석하여 예측하는 방법으로 예측하고자 하는 임의 지점 주변의 추정 값에 대한 상관강도를 반영하여 추정하는 방법이다.

관측정의 지하수위 경우 산간지역을 제외하고는 전 지역으로 분산화 되어있고, 측정지점 등의 정보 확인이 용이하여 관측치의 거리 상관성 등 파악이 가능하므로, 크리깅을 이용한 등수위선을 작성하였다. 다양한 크리깅기법 중에서도 표고와의 상관도를 고려한 Co크리깅기법이 일반적으로 사용되고 있지만(Park, 2002; Oh, 2016), 앞 절에서 분석된 표고-지하수위 비교·분석 결과에 의하면 지하수위와 표고간의 상관도는 낮고, 지역적으로 편차가 매우 크게 발생되어 Co크리깅기법은 적절하지 않은 것으로 판단하였다. 특히, 지하수위 자료는 보통 비정상 확률함수(Nonstationary random function)의 특징을 가지고 있기 때문에(Jornel and Huijbregts, 1987) 정규 크리깅과 단순 크리깅 등의 다른 기법보다는 EBK크리깅의 시뮬레이션을 통해 미세측 지역의 수위에 대하여 더 정밀한 추정치를 얻을 수 있다(Gribov and Krivoruchko, 2012). 따라서 이 연구에서는 125개소 관측정의 5년 평균 자료를 EBK 크리깅 방법에 적용하여 제주도의 등수위선을 구축하였다(Fig. 4.23).

지하수위는 제주도의 중앙으로 진행될수록 상승되고, 최대수위지점은 한라산 중앙부에서 남서방향으로 8.8km지점으로 분석되었다. 남부-북부지역의 해안에서부터 상류지역까지의 수두경사 특성을 보면, 북부지역의 수두경사 대비 남부지역의 수두경사가 크게 나타나고, 동부-서부지역의 경우 동부지역이 서부지역보다 완만한 경사 특성이 나타난다(Fig. 4.24).

동부지역의 수위분포는 10m의 등수위선이 해안으로부터 약 12km 내륙 쪽에 위치하고 있는데, 동부지역은 기저지하수체가 광범위하게 분포하고 있기 때문에 이러한 결과가 도출된 것으로 판단된다. 지하수위가 가장 급한 경사특성을 보이는 지역은 남부지역으로 10m의 등수위선이 해안선과 매우 가깝게 형성되었다. 남부지역에서 지하수위 경사가 매우 급하게 형성되는 것은 지형적인 영향뿐만 아니라 상위지하수가 남부해안에서부터 분포하고 있기 때문인 것으로 해석된다.

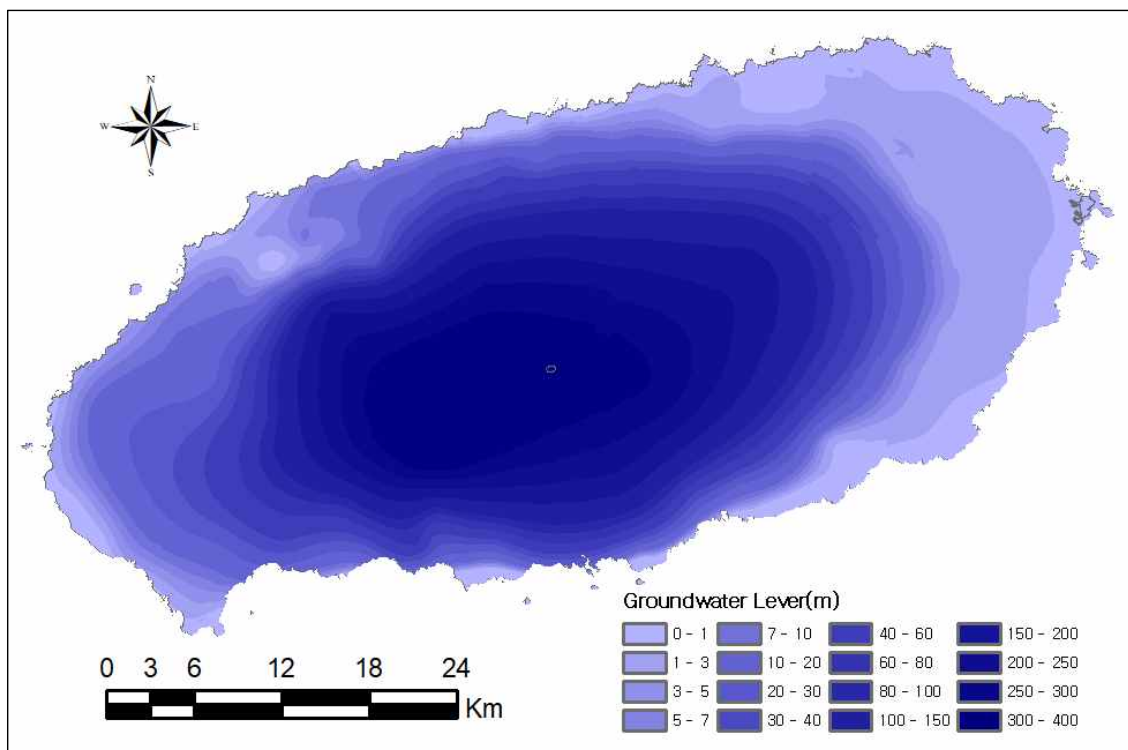


Fig. 4.23 Groundwater table contour map in Jeju

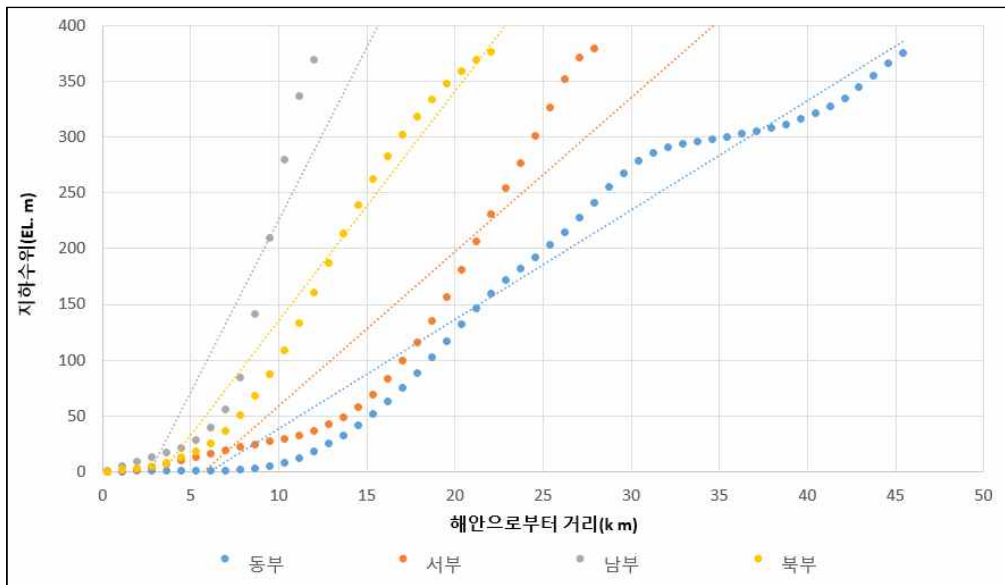


Fig. 4.24 Groundwater level slope by region

### 3.2 지하수 등수위선의 검정

EBM크리깅기법에 의해 생성된 등수위선의 정확성 대하여 검증을 위해 교차타당성 검정과 그래프 검정을 수행하였다.

#### 3.2.1 교차 타당성 검정

교차 타당성 검정을 위해 관측지점의 관측 값과 등수위선에서 얻어진 동일지점의 계산 값을 비교하였으며, 감소오차의 평균(Mean Reduced Errors, MRE), 감소오차의 표준편차(Standard Deviation of Reduced Errors, SDRE) 등을 분석하였다(Jung 등, 2001).

적용된 모델이 적절하다면 감소오차의 평균은 0에 가까워야하며(식 38), 감소오차의 표준편차는 1에 가까워야 한다(Davis, 1987; Solow, 1990)(식 39).

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{Z(x) - Z^*(x)}{\sqrt{\sigma_k^2}} \right]_i \doteq 0 \quad (38)$$

여기서,  $Zx$ 는 관측치,  $Z_k^*$ 는 추정치,  $\sigma_k$ 는 추정분산이다.

$$SDRE = \sqrt{VRE} \doteq 0 \quad (39)$$

$$VRE = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (RE - MRE)_i^2$$

$$RE = \frac{Z(x) - Z^*(x)}{\sqrt{\sigma_k^2}}$$

평균오차(Mean Errors, ME)는 0에 가까워야하며(식 40), 평균제곱오차(Mean Square Errors, MSE)와 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Errors, RMSE), 평균 크리깅 분산(Mean Kriging Variance, MKV)은 최소가 되어야 한다(식 41, 42, 43)

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n [Z(x) - Z^*(x)]_i \quad (40)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n [Z(x) - Z^*(x)]_i^2 \quad (41)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (42)$$

$$MKE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (\sigma_k^2)_i \quad (43)$$

마지막으로 오차의 분산은 평균 크리깅 분산과 유사하게 산출되어야 한다 (Samper, 1986)(식 44).

$$VE = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [Error - ME]^2 = MKV \quad (44)$$

평균오차와 감소오차의 평균은 -0.044와 -0.008로 0에 가까운 결과를 보였고, 평균 제곱 오차와 평균 제곱근 오차는 2.002와 1.415로 낮은 결과를 보였다. 평균 크리깅 분산은 12.917로 근접위치에 지하수위의 차이가 크게 발생하는 지점과 지하수위가 상반되는 자료에 의해 분산도는 다른 검정자료 대비 높게 나타났다. 오차의 분산은 평균크리깅 분산과 유사하게 나타났으며, 감소오차의 표준편차는 1에 가까운 0.968로 신뢰도는 높게 나타났다(Table 4.14).

Table 4.14 Cross validation of kriging results and observations

class	Data	ME	MSE	RMSE	MKV	VE	MRE	SDRE
result	125	-0.044	2.002	1.415	12.917	13.020	-0.008	0.968

### 3.2.2 그래프 검정

크리깅에 의한 예측 값의 검정에서는 교차타당성과 더불어 그래프 검정도 유용하게 이용되고 있다. 그래프 검정은 관측지점의 관측 값과 등수위선에서 얻어진 동일 지점의 예측 값을 대응하여 선형 그래프를 통해 검정하는 방법으로 관측 값과 예측 값이 일치할 경우 기울기가 1인 직선에 중첩되고, 오차가 발생하는 값은 직선과 멀어지게 표시된다.

크리깅에 의한 예측 값과 관측 값의 그래프 검정 결과는 Fig. 4.25와 같으며, 예측 값과 관측 값은 기울기가 1인 직선에 거의 중첩된  $Y = 0.9772X + 0.8388$ 로 검토되어 그래프 검정에 의해서도 크리깅 예측 값의 정확성이 입증되었다.

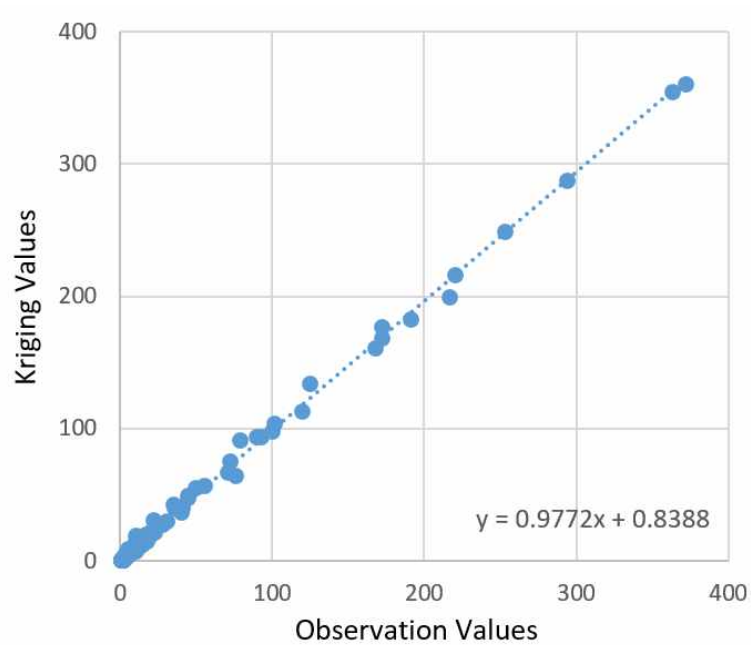


Fig. 4.25 Graph test of kriging results and observations

### 3.3 지하수 유역경계 설정

#### 3.3.1 지하수 유역의 정의

유역은 지표수 유역과 지하수 유역으로 구분 된다. 지표수 유역은 하천, 지형·경사, 분수계 등을 통해 작성되고, 지하수 유역은 지하수면을 기준으로 설정된다. 지표수 유역은 위성자료와 DEM자료 등을 통해 유역을 세분화 할 수 있지만, 지하수 유역은 지하수면의 분포를 정확하게 알 수 없기 때문에 정확히 유역을 구분하는 것은 매우 어렵다. 지하수 유역은 하나의 지하수 수계와 다른 지하수 수계를 구분하는 경계선을 의미하고, 지하수 수위면의 능선에 해당하며, 함양된 지하수의 배출지점을 결정한다(Kim, 2011).

내륙지역의 경우 하천수계와 지하수계가 연계되고, 지표와 지하수위의 상관성이 매우 높아(Chung 등, 1999; Lee, 2001; Cho, 2001; Kang 등, 2008) 지표수-지하수



연계운영, 연계관리 등 지표유역을 기준으로 운영·관리·연구가 통합적으로 시행되고 있다(Lee 등, 2004). 그러나 제주도의 경우 내륙지역과는 상이한 지질특성으로 하천은 대부분 건천이고, 전체 148개의 하천 중 상시하천은 제주시 2개소, 서귀포시 7개소가 유일하기 때문에 지표와 지하수계의 관계에 대하여 명확히 정의를 내리기에 한계가 있다.

### 3.3.2 제주도의 기존 지하수 유역

제주도와 수자원공사(2003)는 수문지질학적 특성에 의거하여 제주도의 지하수 관리 유역 구분을 시도하였다. 지하수 부존형태, 지하수위 및 수질, 수문지질단위 분류, 대수층의 수리특성 등의 조사·분석을 수행하고, 서귀포층과 암맥의 분포에 의한 수문지질 방벽의 존재 가능성을 검토하였다. 그러나 수문지질방벽의 분포를 규명하고, 지하수 분수령을 세분화하기에는 한계가 있어 1:5,000 수치지형도의 지형, 하천, 지표분수령 등 지표특성을 고려하여 설정된 16개의 소유역을 지하수 유역으로 제시하였다(Fig. 4.26).

제주도의 지형은 한라산을 중심으로 해안지역으로 낮아지는 방사상 특성으로 유역을 세분화 하게 되면 유역의 장단경의 차이가 크게 나타나는 특성을 보인다. 16개의 소유역 중 남부와 북부지역에 위치한 애월, 서제주, 중제주, 동제주, 안덕, 서서귀, 중서귀, 동서귀 유역은 장단경의 차이가 3 ~4배 이상 발생된다. 소유역별 관측정의 분포는 중서귀유역에 2개소, 동제주유역은 3개소, 서제주유역과 안덕유역은 4개소, 동서귀유역은 5개소, 서서귀유역은 7개소, 남원과 성산유역은 8개소, 애월과 조천, 표선유역은 9개소, 대정, 중제주, 한림유역은 10개소, 한경유역은 11개소, 구좌유역은 16개소가 분포한다. 특히, 소유역 내 지하수 관측정들은 지하수 유동해석에 검·보정 자료 및 소유역 내 지하수위 변동 등의 지표로 활용된다.

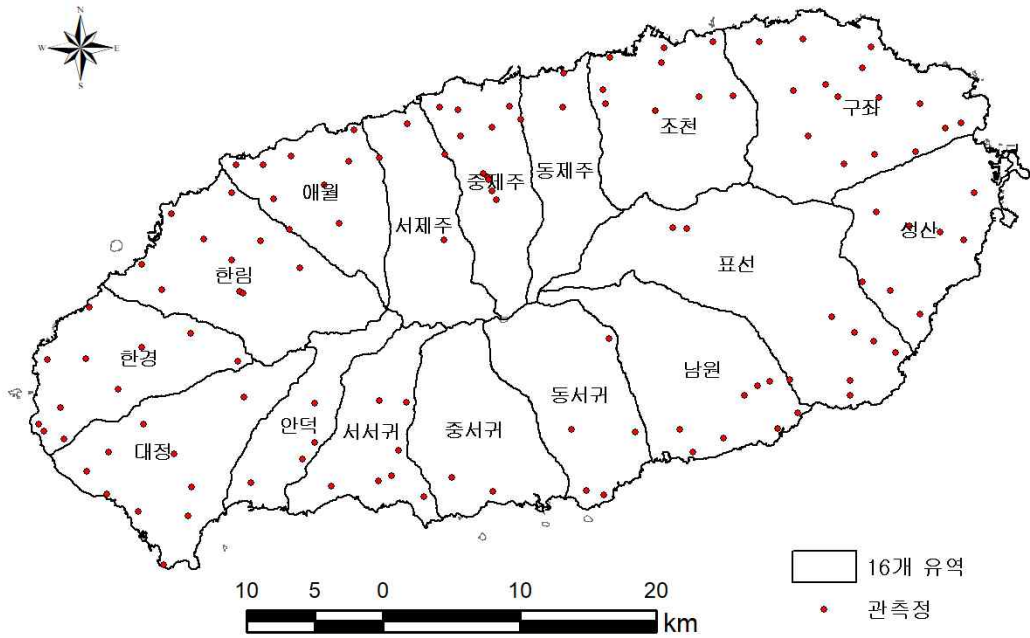


Fig. 4.26 Groundwater basin of jejudo

### 3.3.3 기존 지하수 유역의 문제점

제주도는 지표수 유역을 지하수 유역으로 해석하고 있으나, 제주도의 지표와 지하수위 상관관계 분석결과와 지역별 등수위선의 분포 등의 결과에 의하면 표고 특성과 지하수위는 높은 상관성을 보이지 않으며 지역적으로 표고와 지하수위가 반비례 특성이 나타나는 것으로 분석되었다. 즉, 표고와 지하수위가 제주도 한라산의 중심부로 진행될수록 상승패턴은 나타나지만 동일 표고지점에서 다양한 수위특성을 보이고 있어, 지표의 특성으로 구분한 유역을 지하수 유역으로 적용하기에 문제점이 있다.

지하수 유동 해석을 위해서는 3차원 수치해석 모형이 적용되는데 수치해석 모형에서의 활성화 경계(Boundary)는 소유역을 기준으로 설정된다. 이러한 조건에 따라 인접유역과의 지하수 유·출입은 제한되고, 지하수 흐름은 유역경계 내에서 형성되므로 지하수 유동해석 시 유역 경계설정은 매우 중요하다고 할 수 있다.

Na 등(2007)은 제주도의 지하수 해석을 위해 적용되는 유역설정은 지표유역을 기

준으로 분석되고 있어, 지하수 모델분석의 검·보정 과정과 결과에 대해 면밀한 검토가 필요하다고 제시하였으며, Kim 등(2015)과 Park 등(2016)은 수치해석 모형을 이용하여 성산유역과 대정유역의 유동특성을 해석한 바 있다. 이들의 연구결과에 의하면, 지표가 낮아지는 방향에 따라 지하수 유동이 발생되었으며, 실제 해당유역의 등수위선은 흐름방향과 상이한 결과를 보여 유역 경계 설정에 따라 분석결과는 실제 흐름과 상이한 결과가 도출 될 수 있다고 제시하였다(Fig. 4.27, Fig. 4.28).

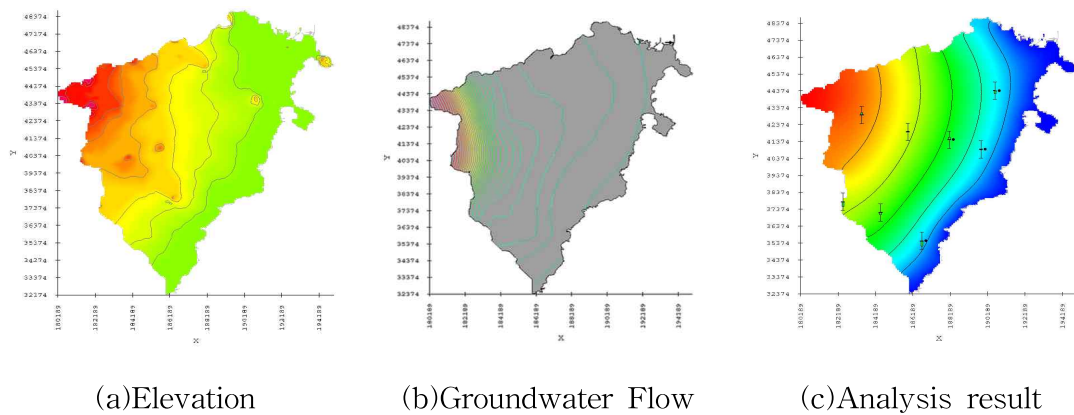


Fig. 4.27 Analysis of groundwater flow in Sung-san basin(Kim, 2015)

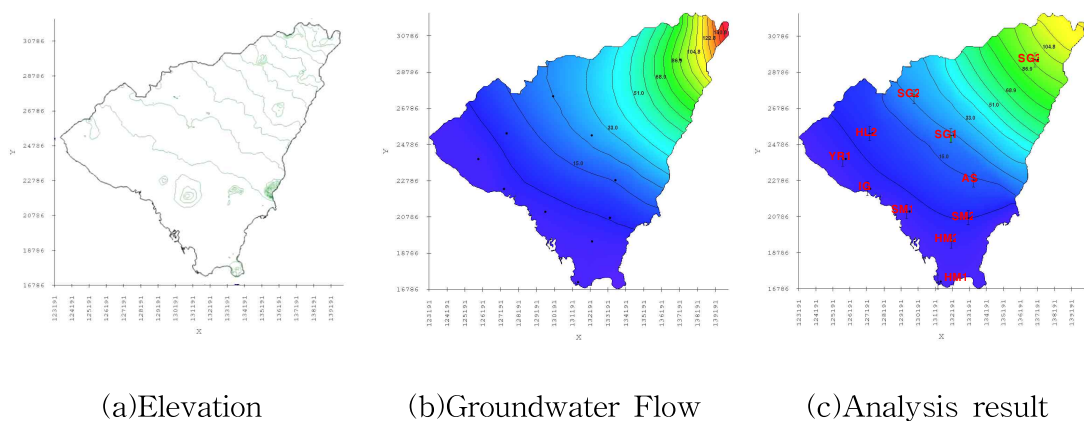


Fig. 4.28 Analysis of groundwater flow in Dae-jeong basin(Park, 2016)

### 3.3.4 제주도 지하수 유역 설정

제주지역의 지하수는 대기압의 영향과 중력에 의해 대수층 사이를 유동하는 자유 지하수(Free Groundwater)체로 수리학적 측면에서 지하수면 아래의 지하수는 포화 상태로 상류지역에서 하류지역으로 유동하며, 이 연구에서는 관측된 지하수위와 지하수 지하수면을 기준으로 유역을 세분화 하였다.

지하수 경계를 설정함에 있어 지하수면의 능선을 정확하게 예측할 수 없으므로 지하수의 흐름방향을 고려하였으며, 유역의 출구지점으로부터 지하수 흐름방향의 직각으로 유역경계선을 작도하였다. 제주도 등수위선은 제주도 중심부에서 해안으로 진행될수록 지하수위가 낮아지는 방사형 형태로 유역을 상세히 세분화하게 되면 유역상부로 진행될수록 폭은 좁아지고 길이는 길어지는 경향이 나타난다. 특히, 지하수 유동해석 등에서는 분석유역과 인접유역간의 유출입이 없기 때문에 단경이 짧아질 경우 지하수 흐름방향성에 대한 정확성이 떨어지게 되므로 유역의 장·단경(폭과 길이)의 차이를 고려하였다. 그리고 기존의 16개 소유역의 경우 지하수 해석 등 검증자료로 활용되는 지하수 관측정 지점의 편차가 소유역별로 매우 큰 것으로 확인되어(관측정 개소수가 5개 미만인 유역 : 서제주, 동제주, 안덕, 중서귀, 동서귀), 이 연구에서는 유역 내 최소 10개의 관측정이 분포될 수 있도록 고려하였다.

지하수 유역은 서제주, 동제주, 구좌, 표선-성산, 남원, 서귀, 대정-안덕, 한림-한경유역으로 총 8개의 유역으로 설정하였다(Table 4.15).

서제주유역은 제주시 서부지역과 애월읍지역이 포함되며, 동제주유역은 제주시 동지역과 조천읍지역을 포함하고 있다. 구좌유역은 구좌읍지역을 포함하고 있으며, 조천읍 동부지역 일부를 포함하고 있다. 표선-성산유역은 표선면지역과 성산읍지역을 포함하고 있으며, 남원유역은 남원읍지역을 포함하고 있다. 서귀유역은 서귀포시 대부분지역을 포함하며, 대정-안덕유역은 대정읍지역과 안덕면지역, 한경면 남부지역을 포함하고 있다. 한림-한경유역은 한림읍지역을 포함하고, 한경면 북부지역과 안덕면 북부지역을 포함하고 있다(Fig. 4.29).

유역별 둘레는 표선-성산유역이 117.7km로 가장 길고, 대정-안덕유역이 104.5km, 동제주유역 98.0km, 서제주유역 96.4km, 구좌유역 95.7km, 한림한경유역 88.4km, 서귀유역이 81.4km, 남원유역이 72.3km 순이다. 유역면적은 서제주유역이 292.8km<sup>2</sup>로 전체의 15.9%를 차지하고, 표선-성산유역이 257.2km<sup>2</sup>(14.0%), 동제주유역 252.4km<sup>2</sup>(13.7%),

대정-안덕유역 220.1km<sup>2</sup>(12.0%), 구좌유역 218.9km<sup>2</sup>(11.9%), 한림-한경유역 208.9km<sup>2</sup>(11.3%), 서귀유역 200.1km<sup>2</sup>(10.9%), 남원유역 190.2km<sup>2</sup>(10.3%) 순이다.

소유역별 관측정은 서귀유역이 12개소, 남원유역이 11개소, 표선-성산유역이 14개소, 구좌유역이 18개소, 동제주유역이 13개소, 서제주유역이 24개소, 한림-한경유역이 13개소, 대정-안덕유역이 20개소가 분포되었다.

Table 4.15 Groundwater basin of jejudo

Subwatershed	circumference(km)	area(km <sup>2</sup> )	area ratio(%)
Namwon watershed	72.3	190.2	10.3
Seogwi watershed	81.4	200.1	10.9
Pyoseon-Seongsan watershed	117.7	257.2	14.0
Kujwa watershed	95.7	218.9	11.9
East Jeju watershed	98.0	252.4	13.7
West Jeju watershed	96.4	292.8	15.9
Deajeong-Andeok watershed	104.5	220.1	12.0
Hanrim-Hankyeong watershed	88.4	208.9	11.3

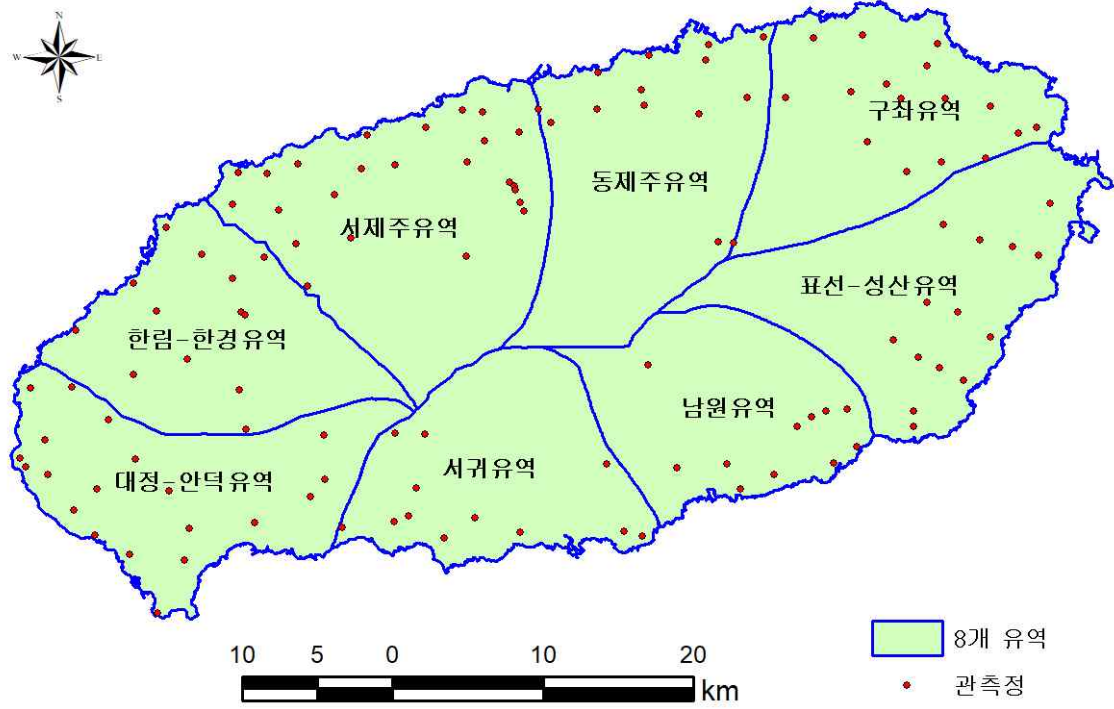


Fig. 4.29 Groundwater basin of jejudo

## 4. 지하수 유동특성과 수리전도도 해석

제주지역의 지하수 유동특성 해석을 위한 모형은 개념모델(conceptual model)을 이용한 MODFLOW 해석을 수행하였다. 개념모델을 이용하여 분석하는 방법은 Map module에서 GIS를 이용하여 모델 분석하고자 하는 지역의 개념모델을 생성한 후, 이 개념모델의 데이터를 Grid로 전환하는 방법이다. 모델경계 및 투수계수 등 유동해석에 필요한 모든 데이터와 일정수두경계 및 sources/sinks의 위치는 개념모델에서 정의된다. 개념모델이 생성된 후 구축된 개념모델은 Grid로 전환되며, 하나의 Cell에 적용된다. 본 연구에는 제주도의 개념모델 구성을 위해 GIS툴에서 획득한 Shapes File을 Feature Objects로 전환 후 Boundary Coverage와 Hydraulic Conductivity Coverage, Recharge Coverage, Observation Coverage 등 4개의 커버리지를 생성한 후 개념모델을 구축하였다.

### 4.1 MODFLOW 입력자료 분석

#### 4.1.1 Boundary Coverage

이 연구에 적용된 유역은 서제주, 동제주, 구좌, 표선-성산, 남원, 서귀, 대정-안덕, 한림-한경유역으로 총 8개에 해당한다. 유역에 대한 설명은 4장 지하수 유역설정 방법을 참고하기 바라며, 각각의 단일유역으로 분할 후 Boundary Coverage에 적용하였다(Fig. 4.30)

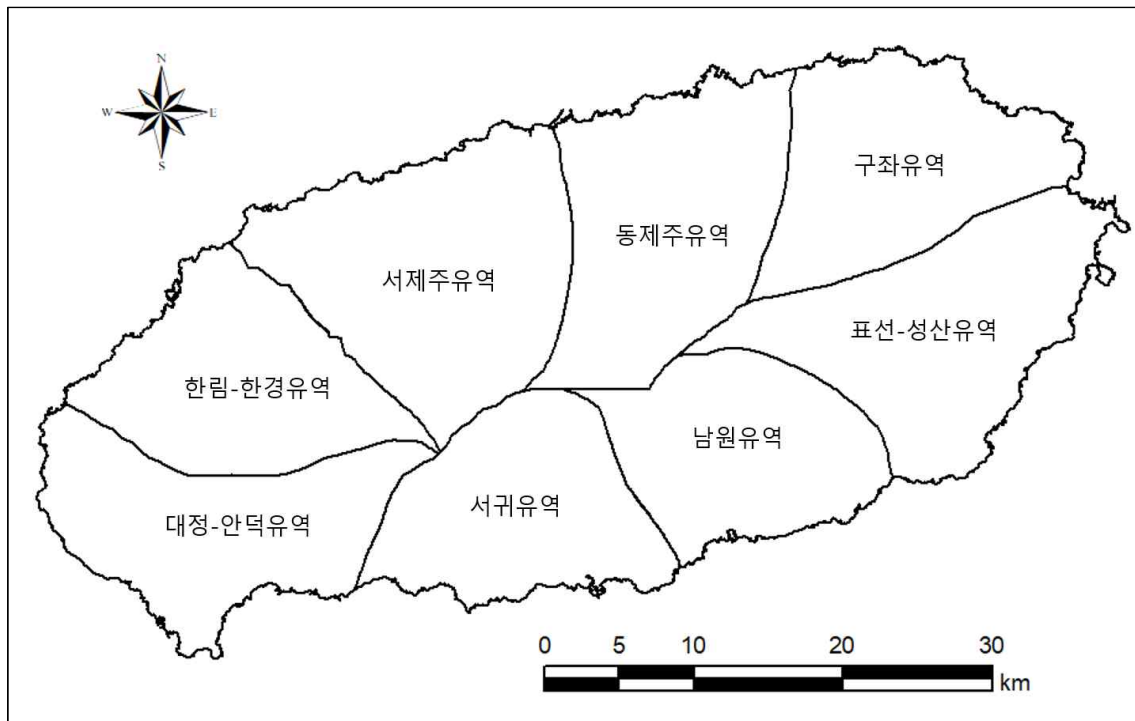


Fig. 4.30 Subwatershed classification of jeju do

#### 4.1.2 Hydraulic Conductivity Coverage

수리전도도는 매질 속을 통과하는 유체와 매질의 물리적 성질을 고려한 투수계수로서 대수층 내의 위치 및 방향에 따라 다양한 결과로 나타난다(USGS, 1998). 이전에는 투수계수(Coefficient of permeability)로 사용되었으나 1968년 USGS에서 제안한 이후 수리전도도의 용어로 광범위하게 사용되고 있다(Park, 2017). 수리전도도를 적용하기 위해서는 지층 및 대수층의 특성 등 다양한 수리학적 요소를 고려하여 적용해야 하지만 지하지질의 형태를 명확히 판단하기 어렵고, 매우 복잡한 구조로 형성되었기 때문에 정확한 값을 입력하기에는 한계가 있다(Kim, 1999).

제주도의 수리전도도 범위는 8.7~2,400m/day로 수리전도도의 편차는 매우 큰 특성을 나타낸다(제주도, 2003). 이 연구에서의 수리전도도 적용은 해석모델의 보정 방법 중 Regularization(정규화)라고 불리는 Pilot point 기법을 적용하였다. 정규화 방법은 균일한 제한을 통해 interpolation되는 인자의 값에 조밀한 데이터로 적용되



어야 하는 객체 함수로부터의 적절한 영향을 보이는 값이 부재한다면, 인근의 Pilot point들로부터 평균값을 제한하도록 하여 모델 자동보정의 과정을 더욱 안정하게 하도록 유도한다(Ko, 2016). 정규화를 이용한 Pilot point 기법을 이용하면, 관측정의 지하수위의 잔차를 현저하게 줄일 수 있는 복잡한 투수계수 분배를 정의 할 수 있다(Aquaveo, 2015).

제주도와 같이 수리전도도 값이 지역별로 차이가 크고 동일 유역 내에도 다른 지질구조를 보이는 등 동일 매질에서 동일 투수성을 보이지 않는 다양함으로 인해 실측값들을 적용하기에 어려운 곳에서 정규화라는 보정방법은 지하수 유동해석을 함에 있어 최적화된 방법이다(Ko, 2016). 통상적으로 40~50개 또는 그 이상의 지점을 사용하는 것이 적절하며, 이 연구에서는 Fig. 4.31과 같이 소유역별 면적을 고려하여 49~59개 지점을 유역 내에 분산화 하여 수리전도도 값을 설정하였다.

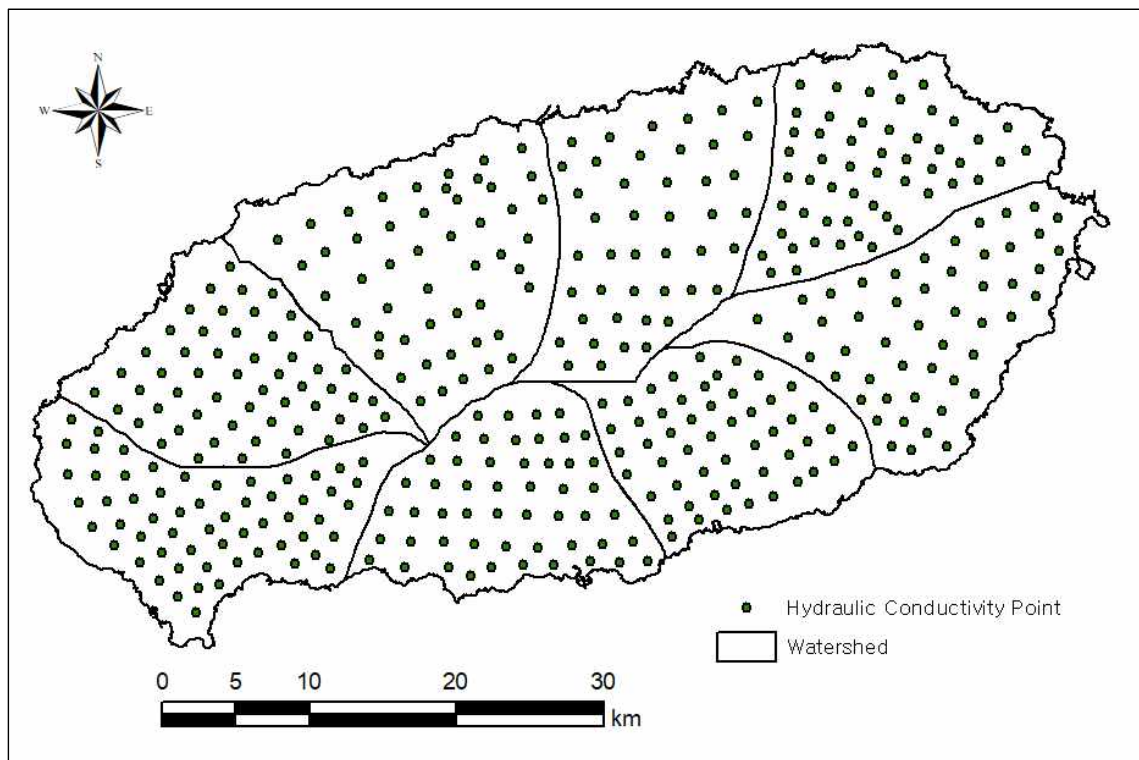


Fig. 4.31 Pilot point for hydraulic conductivity

### 4.1.3 Recharge Coverage

지하수 함양량을 추정하는 방법으로는 물수지, 토양수분수지, 기저유출분리, 지하수위 변동, 지하수위 감수곡선 등 다양한 방법이 있으며, 각각의 지하수 함양량 산정방법은 연구자, 또는 연구의 개념에 따라 상대적인 오차와 장단점이 있다(Yun 등, 2009). 본 연구에서는 강수분석을 수행한 후 제주특별자치도 수자원종합계획 2013-2022(2013)에서 물수지 방법으로 산정된 함양율 44.5%를 적용하여 구역별 함양량을 산정하였다.

도내에는 2016년 기준 총 91개소의(기상청(종관) 4개소, 기상청(방재) 34개소, 재난안전대책본부 53개소)강우관측소가 있으며, 이 연구에서는 지하수위의 관측 자료가 5년 평균자료임을 감안하여 2012년부터 2016년까지 측정된 강우관측소 71개소의 (종관 4개소, 방재 20개소, 재난 47개소)자료를 활용하였다(Fig. 4.32). 제주도의 강수특성은 고도에 의해 편차가 크게 나타나므로 등우선법(isohyetal method)적용하였다(Jung, 2013).

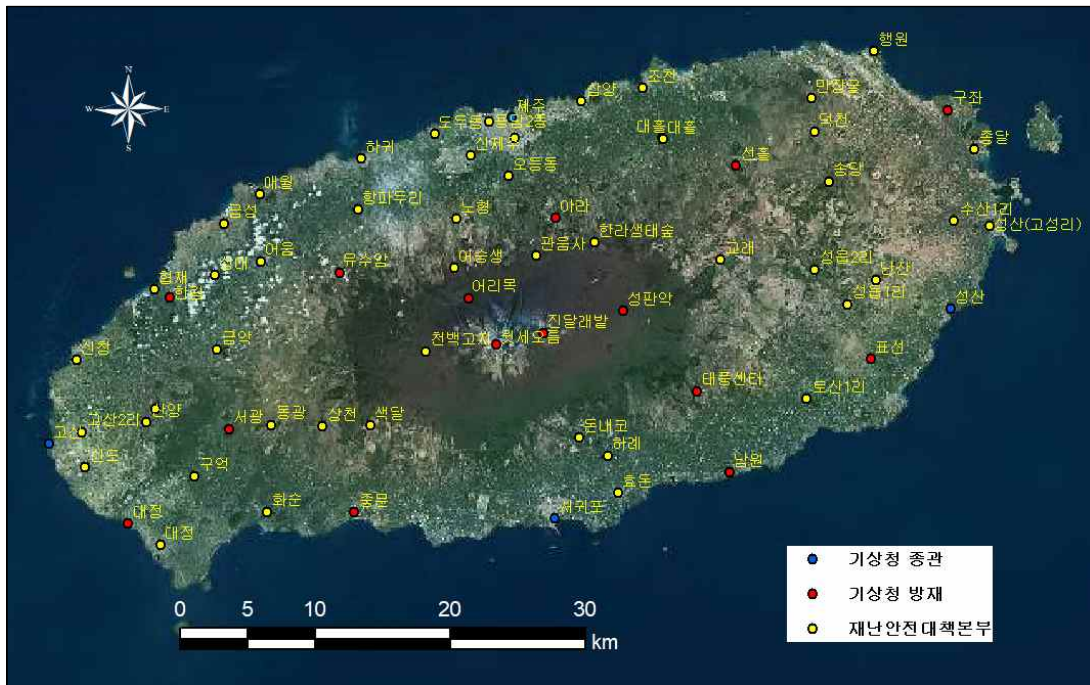


Fig. 4.32 Rainfall observation station in Jeju

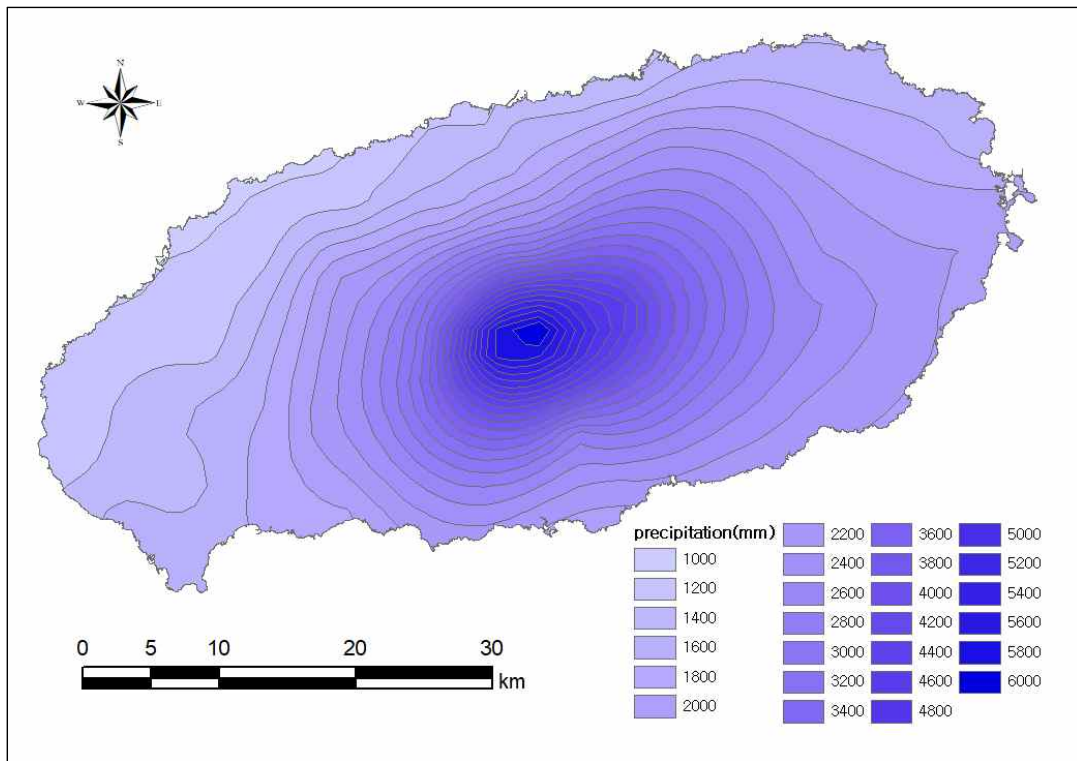
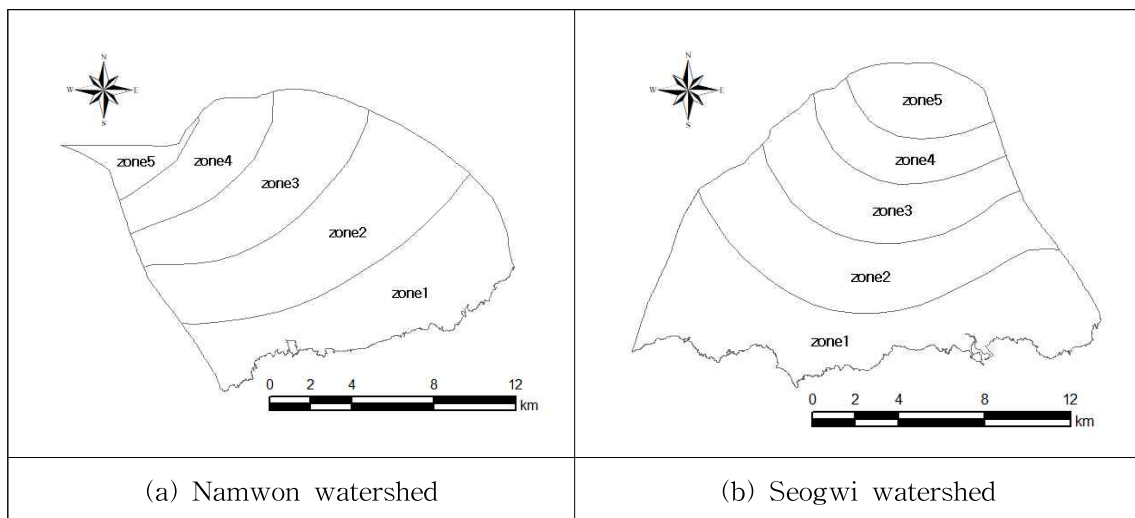


Fig. 4.33 Isohyetal map of Jeju (2012~2016year)

강우관측소의 지점별 데이터를 기반으로 Fig. 4.33과 같이 등우선을 구축한 후 각 지역의 소유역 면적에 따라 4~5개의 함양경계를 설정하고(Fig. 4.34), 경계지역의 면적을 고려하여 면적강우량을 산정하였다. 산정된 면적강우량에 제주도의 평균 함양율 44.5%를 적용하여 소유역별 지하수 함양량을 산정하였다(Table 4.16).



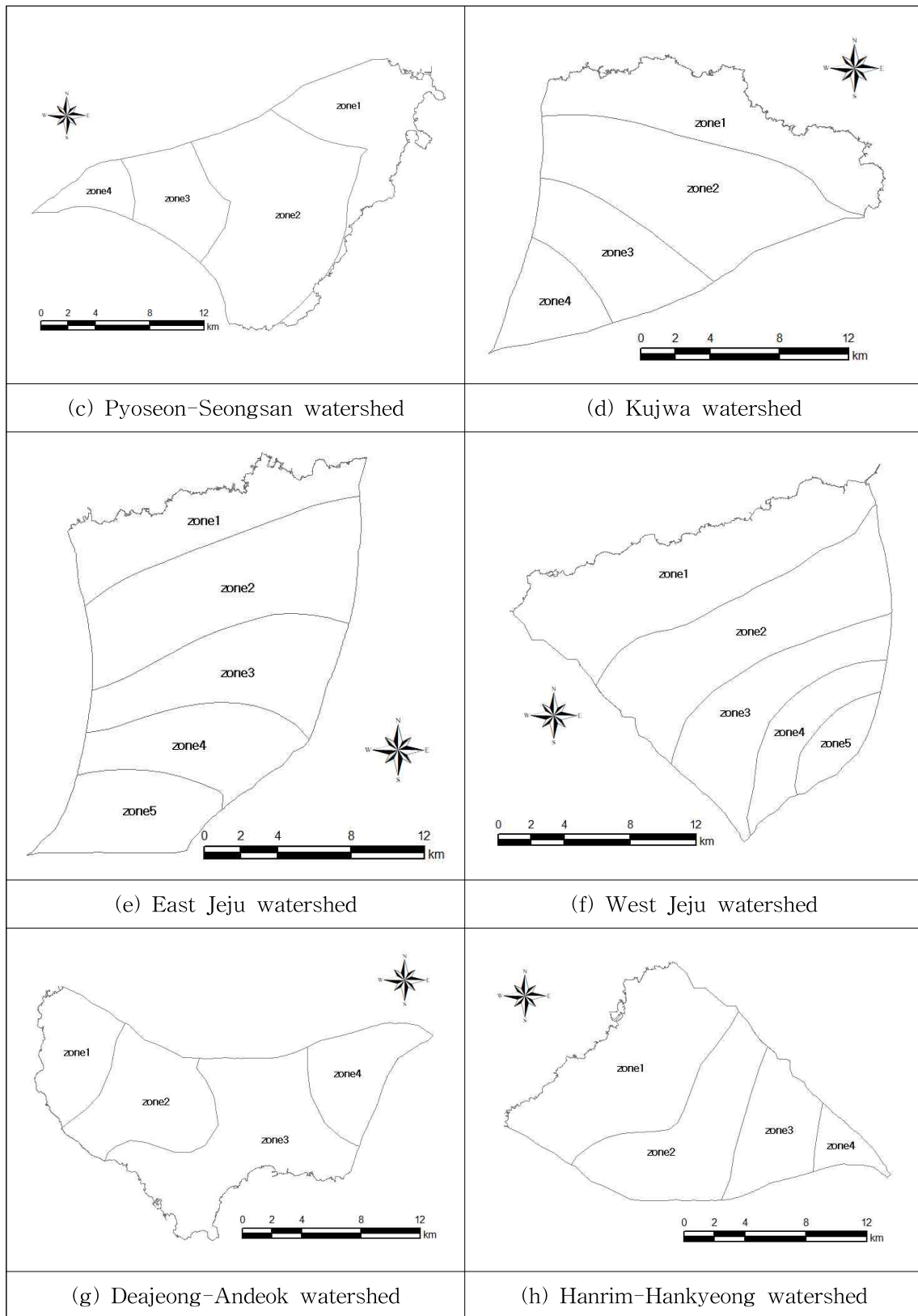


Fig. 4.34 Groundwater recharge area by subwatershed

Table 4.16 Groundwater recharge by subwatershed

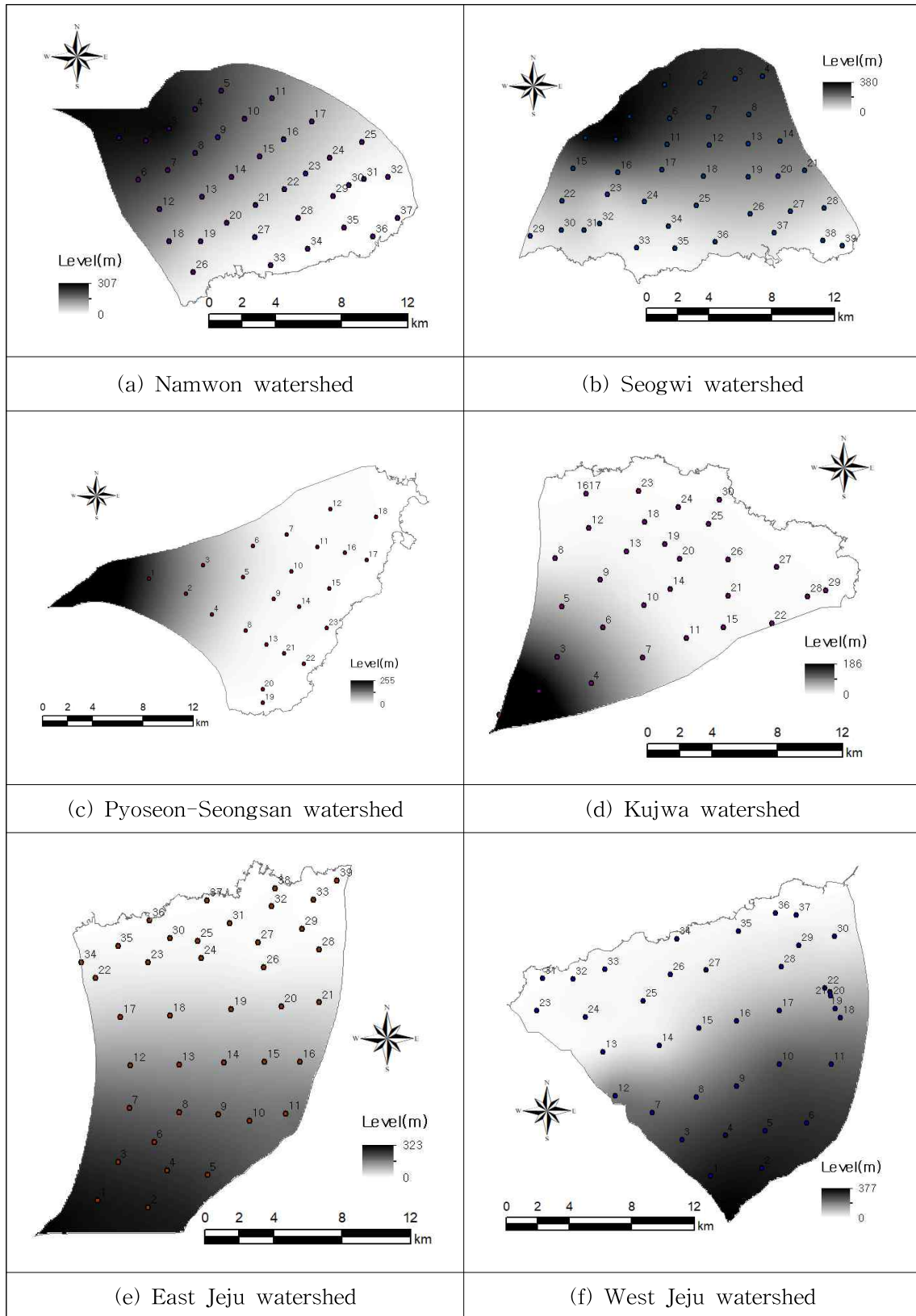
unit : cm/s

Subwatershed	zone1	zone2	zone3	zone4	zone5
Namwon watershed	3.26.E-06	3.91.E-06	4.88.E-06	6.02.E-06	7.25.E-06
Seogwi watershed	3.16.E-06	3.90.E-06	4.88.E-06	6.02.E-06	7.41.E-06
Pyoseon-Seongsan watershed	2.78.E-06	3.19.E-06	3.86.E-06	4.94.E-06	-
Kujwa watershed	2.25.E-06	2.65.E-06	3.22.E-06	3.90.E-06	-
East Jeju watershed	2.13.E-06	2.94.E-06	4.04.E-06	5.40.E-06	7.36.E-06
West Jeju watershed	1.78.E-06	2.62.E-06	3.77.E-06	4.96.E-06	6.65.E-06
Deajeong-Andeok watershed	1.69.E-06	1.98.E-06	2.36.E-06	3.12.E-06	
Hanrim-Hankyeong watershed	1.67.E-06	2.09.E-06	2.77.E-06	3.58.E-06	-

#### 4.1.4 Observation Coverage

도내 지하수위 관측정은 2016년 기준 총 133개소가 설치·운영 중에 있다. 그러나 지하수위 관측정은 대부분 표고 600m 이하에 위치하고 있으며, 중산간지역인 표고 600m이상 지역에는 총 3개소만 위치하고 있어 상류지역에 대한 모델링 결과 검증에 대한 한계가 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 Park 등(2016)과 Kim 등(2016)은 지하수 등수위선 자료를 활용하여 미계측지역의 수위를 예측한 후 모델 검증방안으로 제시한 바 있으며, 이 연구에서는 앞 절에서 구축된 지하수위 등수위선을 TIN (triangulated irregular network)형태로 생성하고, DEM자료로 구축하여 미계측지역의 지하수위를 추출한 후 모델의 검증자료로 활용하였다. 수치고도자료의 DEM(Digital Elevation Model)방식은 지형 고도자료를 처리하는 방법 중 최적의 방법으로 동일한 크기와 밀도를 가지는 격자망을 사용하여 지점별로 고도값을 추출한다. 지하수위의 산정지점은 기존의 지하수위 관측정의 위치를 포함하였으며, 미계측지역인 경우 유역별 면적과 산출지점간의 거리를 고려하여 유역별로 23~39

개소의 지하수위를 산출하였다(Fig. 4.35).



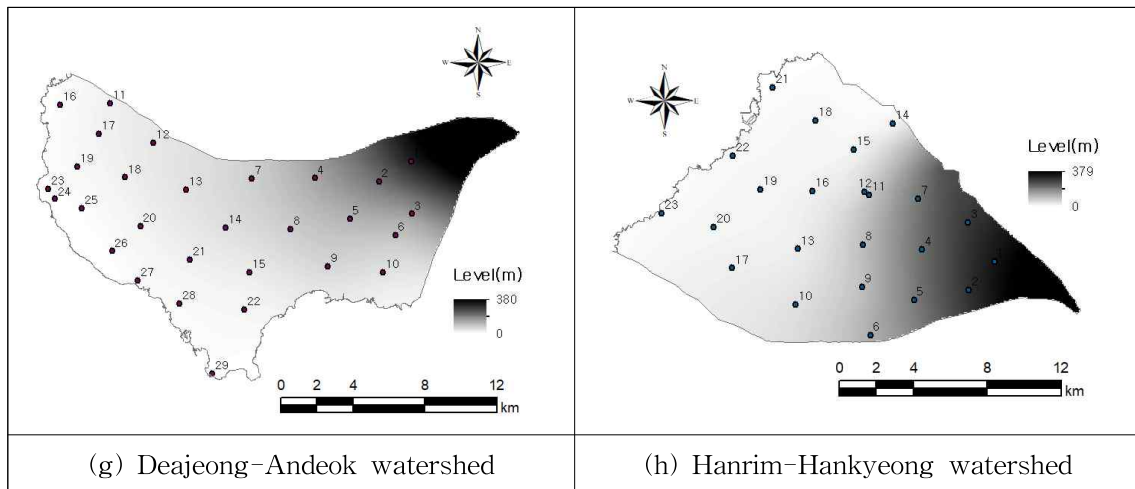


Fig. 4.35 Random points in subwatershed

#### 4.1.5 지층구조

제주도는 수습회의 용암분출로 형성된 화산섬으로 용암분출 시기에 따라 용암류의 특성이 다르고, 지층구조는 용암류의 특성에 따라 다층의 지질구조를 보이며, 지역적으로 상이하고 다양한 지질구조 특성을 보인다. 그러나 실제 수치해석 모형에서는 복잡한 지하지질구조를 표현하는데 어려움이 발생되기 때문에 이 연구에서는 현무암층과 저투수층 등 2개의 Layer로 단순화하여 설정하였다.

제주도의 수직적인 지층을 구성하기 위해 1 layer는 현무암층, 2 layer는 저투수층 2개의 layer로 구분하였으며, 1layer의 표면은 1:5,000의 수치지형도를 이용하여 생성한 수치표고자료(DEM)를 interpolation하여 소유역별로 실제 수직적인 층을 적용하였다.

Fig. 4.36은 하부의 저투수층(low permeable) 구조로 Kim 등(2015)이 지하수위 관측정 및 기설관정의 지질주상도로부터 저투수성 퇴적층인 서귀포층, 응회암, 고토양층의 포착심도를 고려하여 작성된 결과이며, 현무암층의 하부는 저투수층을 기준으로 구성하였다. 다만, 서귀유역의 하류 지역인 해안가 부근에는 일정수두경계면(Constant Head Boundary)으로 설정한 해안경계선의 지하수위(EL. 0.0 m)보다 하부의 Top elevation이 상부에 위치하여 해안가 인근의 Cell에서 Mark flooded cells

현상이 발생되기 때문에 해안가 인근 하부 현무암층 셀의 바닥 Elevation을 해수면 이하로 낮추어 분석하였다. 이는 MODFLOW의 층위가 연속성을 보이는 구조화된 Grid를 사용하기 때문에 서귀유역의 하류지역과 같이 현무암층이 단절 즉, pinchout과 같이 일반적인 현상을 명확히 표현하는데 제한되므로 유한 차분 격자들의 고도값들을 재설정하여 분석하였다

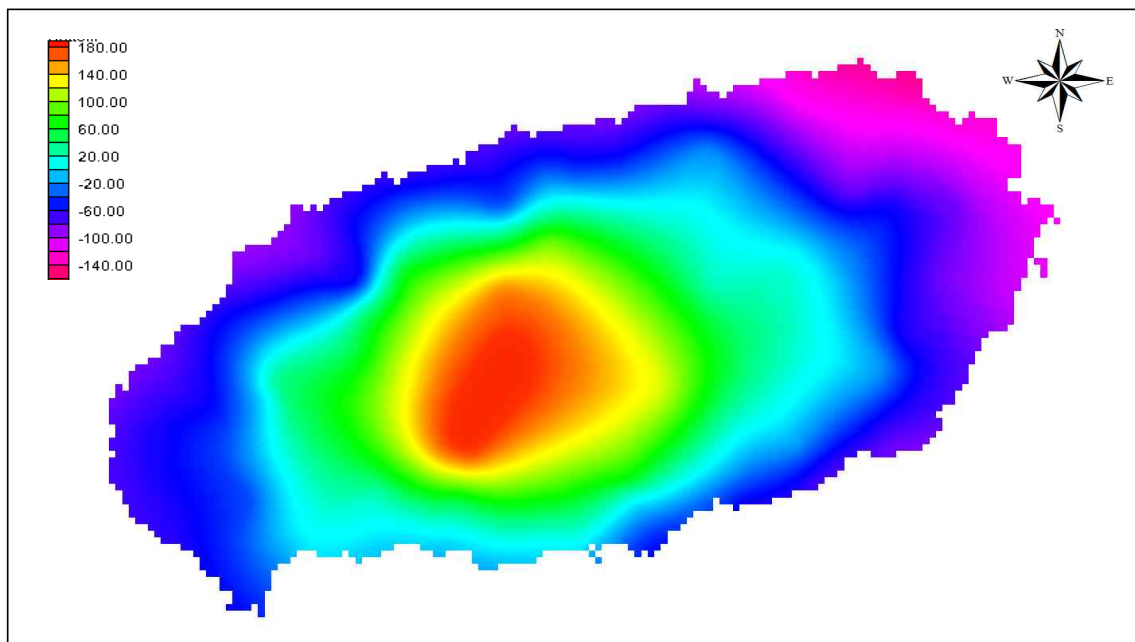


Fig. 4.36 Plan view of low permeability layer depth

#### 4.1.6 격자망 설정 및 모델의 구축

격자망을 구성하는 과정에서 각각의 연구유역과 인접한 유역의 경계면은 지하수 흐름에 의한 영향이 없는 NO-FLOW로 설정하고, 비활성화 셀(Inactive cells)로 설정하여 모델분석의 효율성을 높였으며 각각의 분석유역은 Active cell로 구성하였다.

각각의 소유역별 격자망을 구성하기 위해서는 유역경계 Coverage에서 Max size와 Base size를 적용하여 소유역별로 격자망을 200m × 200m로 설정하고, 연구대상 유역 이외의 지역은 비활성화 셀로 설정하였다. 표선-성산유역 내 활성화셀(active



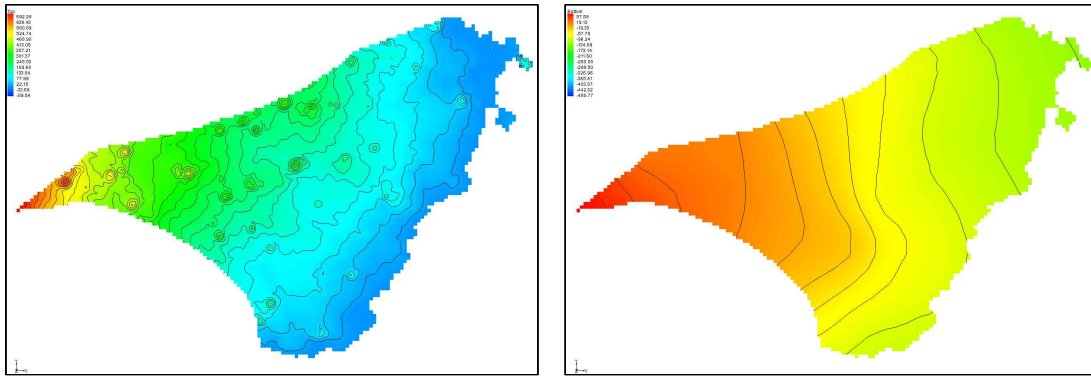
cells)은 2개의 layer를 포함하여 13,070개의 셀 격자망으로 구성되었으며, 구좌유역은 11,456개, 대정-안덕유역은 11,528개, 한림-한경유역은 10,782개, 남원유역은 9,664개, 서귀유역은 10,546개, 동제주유역은 13,062개, 서제주유역은 15,302개로 구성되었다(Table 4.17).

Table 4.17 Grid network configuration

class	Grid configuration
Cell refine	Base size: 200m, Bias : 1.0, Max. size: 200m
number of layers	2 layers
Pyoseon-Seongsan watershed	111 columns× 168 rows × 2 layers = 37,296 cell (Active cells: 13,070 cell / Inactive cells: 24,226 cell)
Kujwa watershed	96 columns× 127 rows × 2 layers = 24,384 cell (Active cells: 11,456 cell / Inactive cells: 12,928 cell)
Deajeong-Andeok watershed	95 columns× 149 rows × 2 layers = 28,310 cell (Active cells: 11,528 cell / Inactive cells: 16,782 cell)
Hanrim-Hankyeong watershed	87 columns× 140 rows × 2 layers = 24,360 cell (Active cells: 10,782 cell / Inactive cells: 13,578 cell)
Namwon watershed	82 columns× 122 rows × 2 layers = 20,008 cell (Active cells: 9,664 cell / Inactive cells: 10,344 cell)
Seogwo watershed	84 columns× 121 rows × 2 layers = 20,328 cell (Active cells: 10,546 cell / Inactive cells: 9,782 cell)
East Jeju watershed	121 columns× 103 rows × 2 layers = 24,926 cell (Active cells: 13,062 cell / Inactive cells: 11,864 cell)
West Jeju watershed	127 columns× 129 rows × 2 layers = 32,766 cell (Active cells: 15,302 cell / Inactive cells: 17,464 cell)

앞에서 생성된 격자망은 디폴트(default)의 상태로, x지점과 y 지점의 좌표 값만 적용되었기 때문에 지점별 값이 입력되지 않았고, 각각의 지층별로 Scatter points를 활용하여 지점 좌표에 따라 층별 고도값을 내삽 하여야 한다. default 상태의 격자망을 기초로 ArcGIS 에서 분석된 각각의 지층별 Ascii 결과값을 Low Data에 내삽 하여 연구지역의 층별 고도값을 나타내는 3D 격자망으로 구성한다.

표선-성산유역의 현무암층인 1 layer층의 최대 Top은 EL. 748.1 m이며, 최소 Bottom은 EL. -117.5 m이다(Fig. 4.37(a)). Fig. 4.37(b)는 저투수층인 2 layer층의 Top으로 EL - 117.5~96.0 m로 구성되었다.

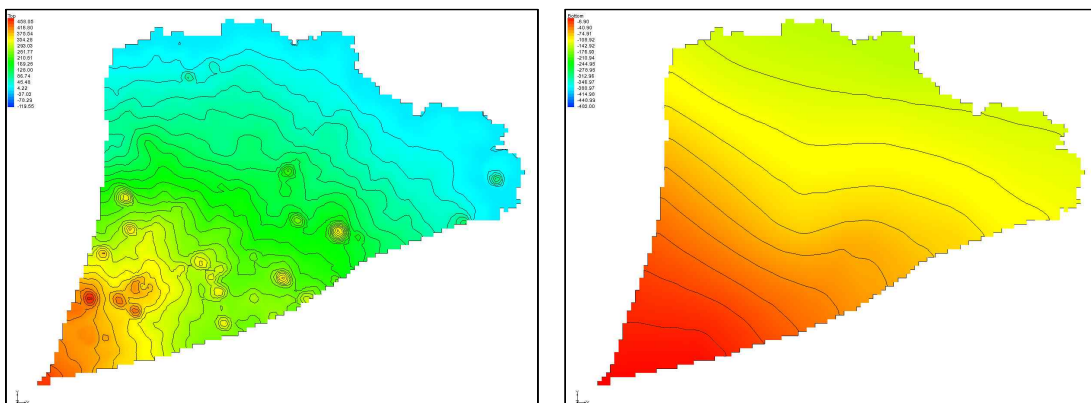


(a) Top surface Elevation of 1 layer

(b) Top surface Elevation of 2 layer

Fig. 4.37 Elevation analysis of layers(Pyoseon-Seongsan watershed)

구좌유역의 현무암층인 1 layer층의 최대 Top은 EL. 499.3 m이며, 최소 Bottom은 EL. -140.2 m이다(Fig. 4.38(a)). Fig. 4.38(b)는 저투수층인 2 layer층의 Top으로 EL - 140.2~27.1 m로 구성되었다.

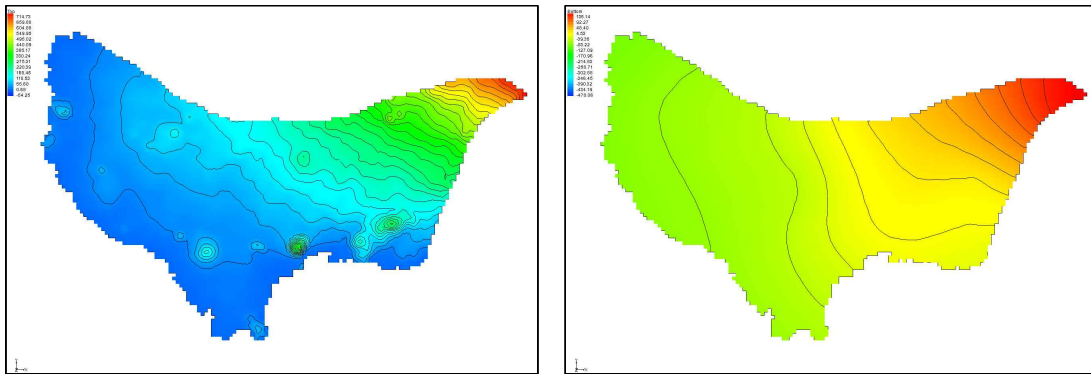


(a) Top surface Elevation of 1 layer

(b) Top surface Elevation of 2 layer

Fig. 4.38 Elevation analysis of layers(Kujwa watershed)

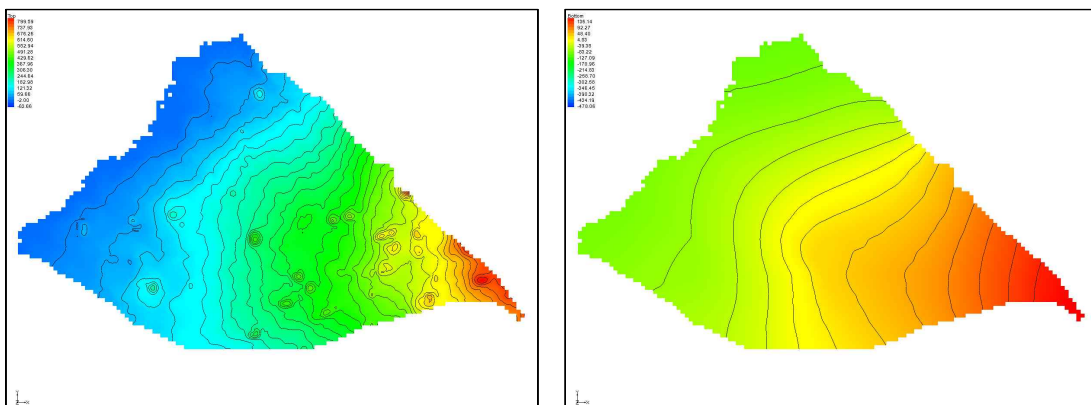
대정-안덕지역의 현무암층인 1 layer층의 최대 Top은 EL. 769.7 m이며, 최소 Bottom은 EL. -83.2 m이다(Fig. 4.39(a)). Fig. 4.39(b)는 저투수층인 2 layer층의 Top으로 EL -83.2~180.0 m로 구성되었다.



(a) Top surface Elevation of 1 layer      (b) Top surface Elevation of 2 layer

Fig. 4.39 Elevation analysis of layers(Deajeong-Andeok watershed)

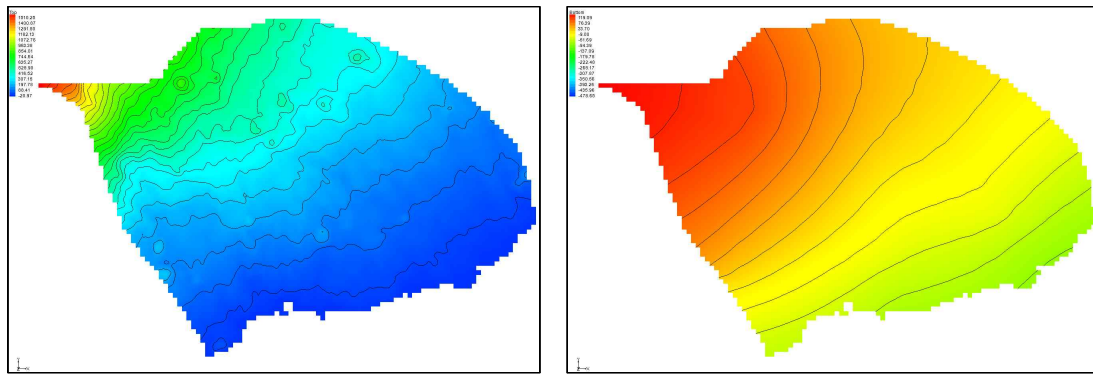
한림-한경지역의 현무암층인 1 layer층의 최대 Top은 EL. 861.2 m이며, 최소 Bottom은 EL. -94.5 m이다(Fig. 4.40(a)). Fig. 4.40(b)는 저투수층인 2 layer층의 Top으로 2 layer층의 최대 Top은 EL 180.0 m로 구성되었다.



(a) Top surface Elevation of 1 layer      (b) Top surface Elevation of 2 layer

Fig. 4.40 Elevation analysis of layers(Hanrim-Hankyeong watershed)

남원유역의 현무암층인 1 layer층의 최대 Top은 EL. 1,619.6 m이며, 최소 Bottom은 EL. -75.3 m이다(Fig. 4.41(a)). Fig. 4.41(b)는 저투수층인 2 layer층의 Top으로 EL -75.3~162.7 m로 구성되었다.

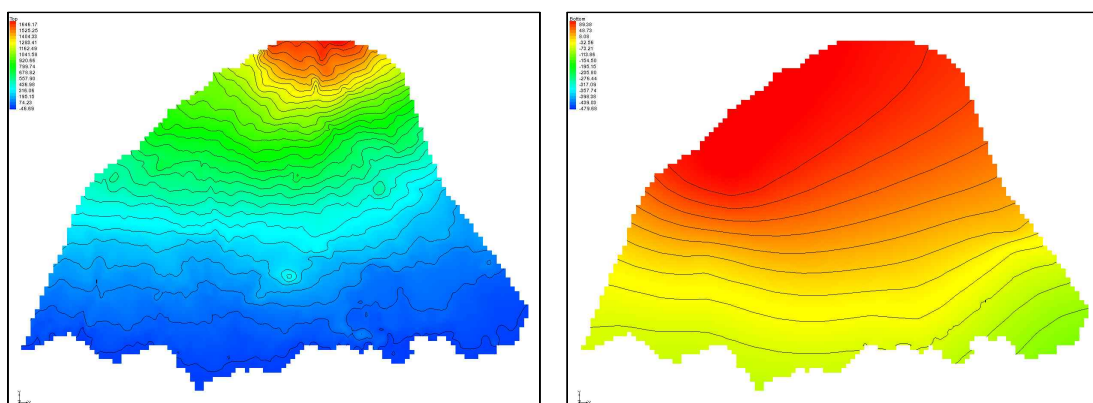


(a) Top surface Elevation of 1 layer

(b) Top surface Elevation of 2 layer

Fig. 4.41 Elevation analysis of layers(Namwon watershed)

서귀유역의 현무암층인 1 layer층의 최대 Top은 EL. 1,767.1 m이며, 최소 Bottom은 EL. -8.3 m이다(Fig. 4.42(a)). Fig. 4.42(b)는 저투수층인 2 layer층의 Top으로 EL -8.3~180.0 m로 구성되었다.

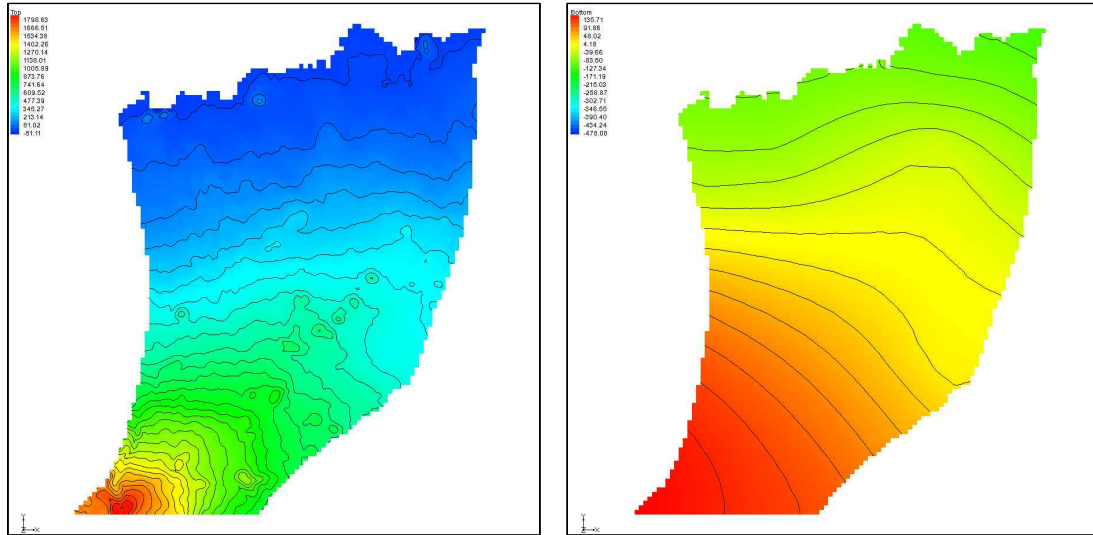


(a) Top surface Elevation of 1 layer

(b) Top surface Elevation of 2 layer

Fig. 4.42 Elevation analysis of layers(Seogwi watershed)

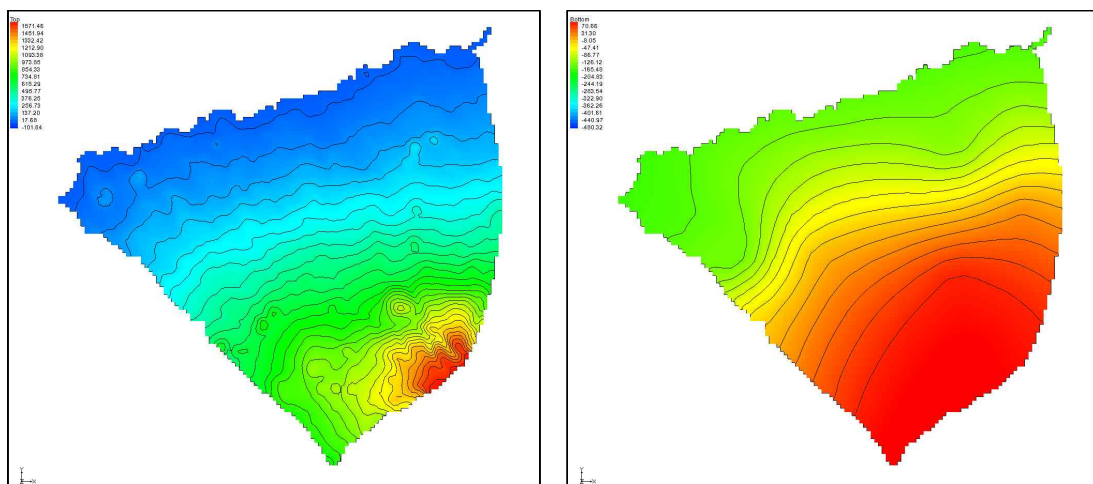
동제주유역의 현무암층인 1 layer층의 최대 Top은 EL. 1,930.8 m이며, 최소 Bottom은 EL. -117.2 m이다(Fig. 4.43(a)). Fig. 4.43(b)는 저투수층인 2 layer층의 Top으로 EL - 117.2~179.5 m로 구성되었다.



(a) Top surface Elevation of 1 layer      (b) Top surface Elevation of 2 layer

Fig. 4.43 Elevation analysis of layers(East Jeju watershed)

서제주유역의 현무암층인 1 layer층의 최대 Top은 EL. 1,691.0 m이며, 최소 Bottom은 EL. -91.6 m이다(Fig. 4.44(a)). Fig. 4.44(b)는 저투수층인 2 layer층의 Top으로 EL - 91.6~180.0 m로 구성되었다.



(a) Top surface Elevation of 1 layer      (b) Top surface Elevation of 2 layer

Fig. 4.44 Elevation analysis of layers(West Jeju watershed)

Table 4.18 Grid network configuration

유역	basaltic layer		low permeability layer
	Top	Bottom	
Pyoseon-Seongsan watershed	748.1	-117.5	96.0
Kujwa watershed	499.3	-140.2	27.1
Deajeong-Andeok watershed	769.7	-83.2	180.0
Hanrim-Hankyeong watershed	861.2	-94.5	180.0
Namwon watershed	1619.6	-75.3	162.7
Seogwi watershed	1767.1	-8.3	180.0
East Jeju watershed	1930.8	-117.2	179.5
West Jeju watershed	1691.0	-91.6	180.0

## 4.2 지하수 유역별 유동 특성 해석

### 4.2.1 표선-성산유역

Fig. 4.45는 표선-성산유역의 표고 특성으로 유역의 최상류에서 동남쪽 해안방향으로 완만하게 낮아지는 경향을 보이고, Fig. 4.46은 지하수위 관측 자료를 통해 산출된 표선-성산유역의 등수위선으로 표고분포와 동일하게 상류지역에서 해안방향으로 완만하게 낮아지는 경향을 보인다. 그러나 유역의 등고선과 등수위선의 방향성

을 Y축을 기준으로 비교해보면, 등고선의 경우 약 31° 기울어 동남방향으로 낮아지는 경향을 보이고 있으며, 등수위선의 경우 약 14° 기울어 동남방향으로 낮아지고 있어 흐름방향은 유사하지만 등고선과 등수위선의 기울기는 차이를 보인다.

유역의 정상류 상태의 지하수 흐름분석 결과 관측수위와 계산수위의 잔차는 0.03 ~3.11m 범위로 나타났고, RMSE(Root Mean Square Error)는 1.616으로 분석되었다(Table 4.19). 지하수 흐름에 대한 방향성 분석 결과 등수위선의 기울기는 약 15°로 동남방향으로 낮아지는 경향을 보이고 있어 관측 자료를 이용하여 산출된 등수위선과 유사한 흐름을 보인다(Fig. 4.47).

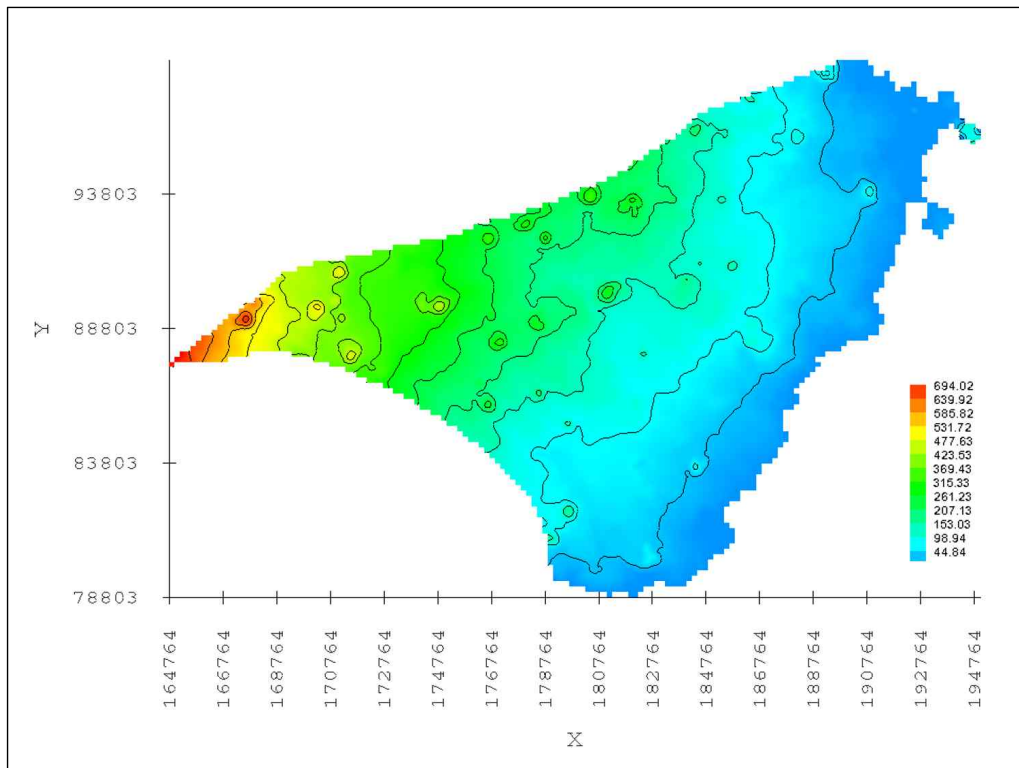


Fig. 4.45 Elevation of Pyoseon-Seongsan watershed

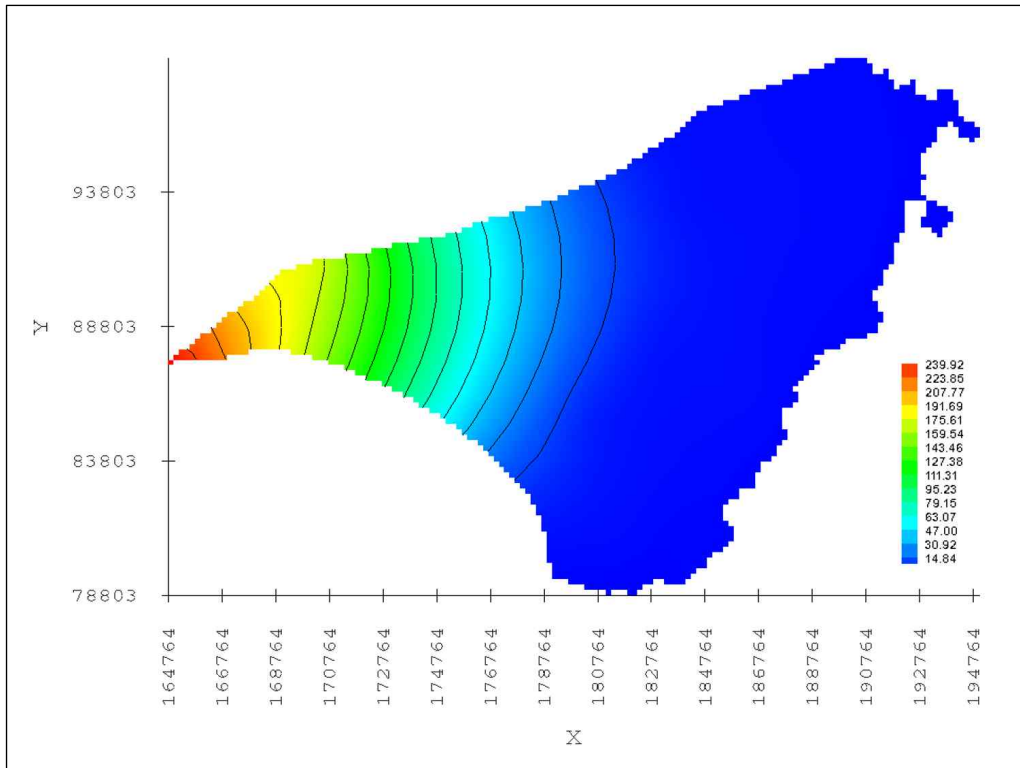


Fig. 4.46 Groundwater flow of Pyoseon-Seongsan watershed

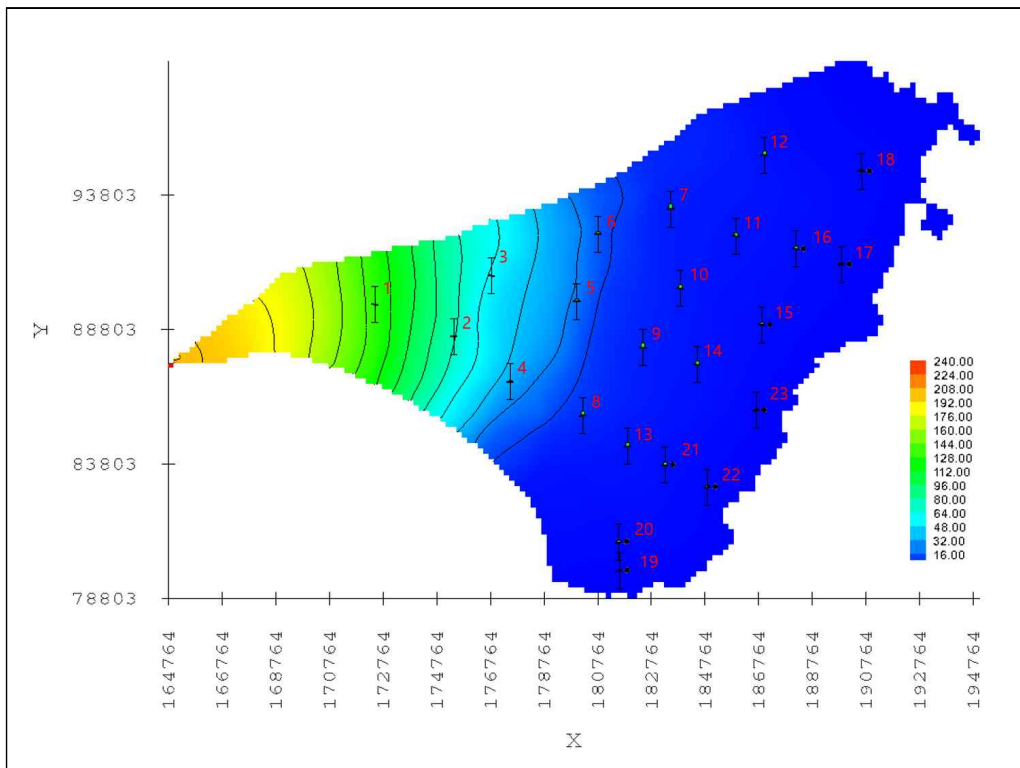


Fig. 4.47 Groundwater flow analysis results of Pyoseon-Seongsan watershed



Table 4.19 Comparison results between observation and computed water level of Pyoseon-Seongsan watershed

NO	observation(m)	calculation(m)	residual(m)
1	131.66	131.68	0.03
2	75.03	75.32	0.30
3	58.22	58.54	0.32
4	37.81	38.26	0.45
5	22.26	23.67	1.40
6	16.84	18.04	1.20
7	3.25	6.36	3.11
8	6.92	9.58	2.66
9	4.15	6.64	2.49
10	3.66	5.76	2.10
11	1.84	4.23	2.40
12	1.31	3.67	2.35
13	2.53	4.67	2.14
14	2.20	4.12	1.92
15	1.11	2.37	1.26
16	1.20	2.83	1.64
17	0.56	1.29	0.73
18	0.76	1.55	0.78
19	0.26	0.57	0.31
20	1.02	1.83	0.80
21	1.31	2.93	1.62
22	0.45	1.13	0.68
23	0.89	1.16	0.26

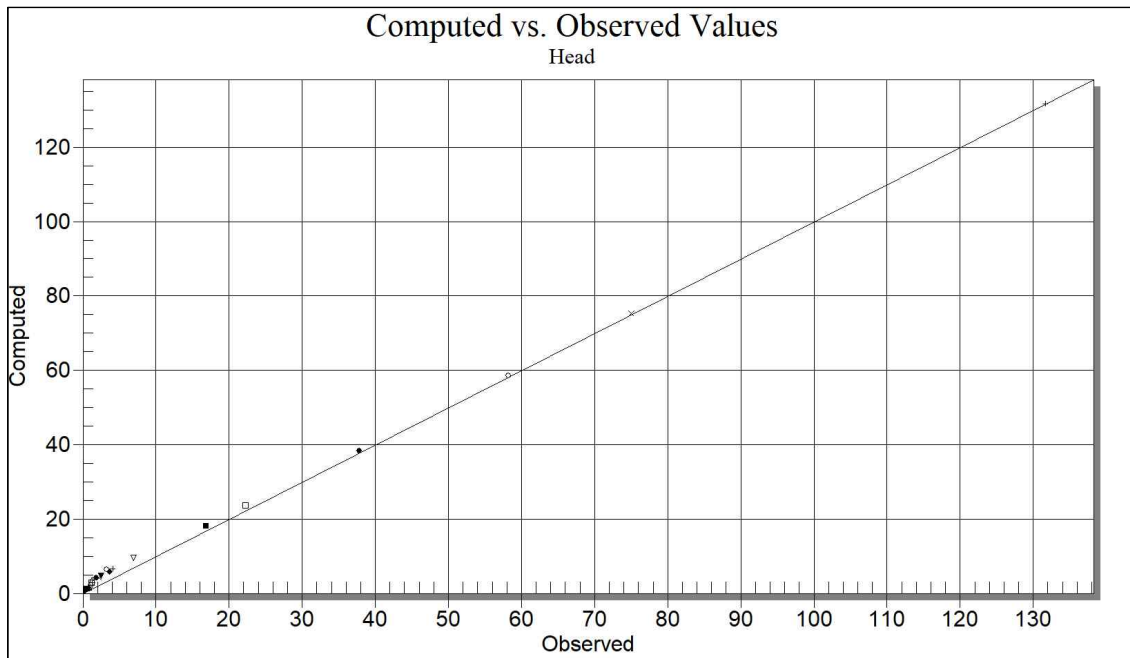


Fig. 4.48 Computed vs. Observed Values (Pyoseon-Seongsan watershed)

## 4.2.2 구좌유역

Fig. 4.49는 구좌유역의 표고 특성으로 유역의 최상류에서 동북쪽 해안방향으로 완만하게 낮아지는 경향을 보이고, Fig. 4.50은 지하수위 관측 자료를 이용하여 산출된 구좌유역의 등수위선으로 표고분포와 동일하게 상류지역에서 동북쪽 해안방향으로 완만하게 낮아지는 경향을 보인다. 유역의 등고선과 등수위선의 방향성을 X축을 기준으로 비교해보면, 등고선의 경우 약 19° 기울어 동북방향으로 낮아지는 경향을 보이고 있으며, 등수위선의 경우 약 35° 기울어 동북방향으로 낮아지고 있어 흐름방향은 유사하지만 등고선과 등수위선의 기울기는 차이를 보인다.

유역의 정상류 상태의 지하수 흐름분석 결과 관측수위와 계산수위의 잔차는 -4.57~2.54m 범위로 나타났고, RMSE는 1.864로 분석되었다(Table 4.20). 지하수 흐름에 대한 방향성 분석 결과 등수위선의 경사는 약 35°로 동남방향으로 낮아지는 경향을 보이고 있어 관측 자료를 이용하여 산출된 등수위선과 유사한 흐름을 보인다(Fig. 4.51).

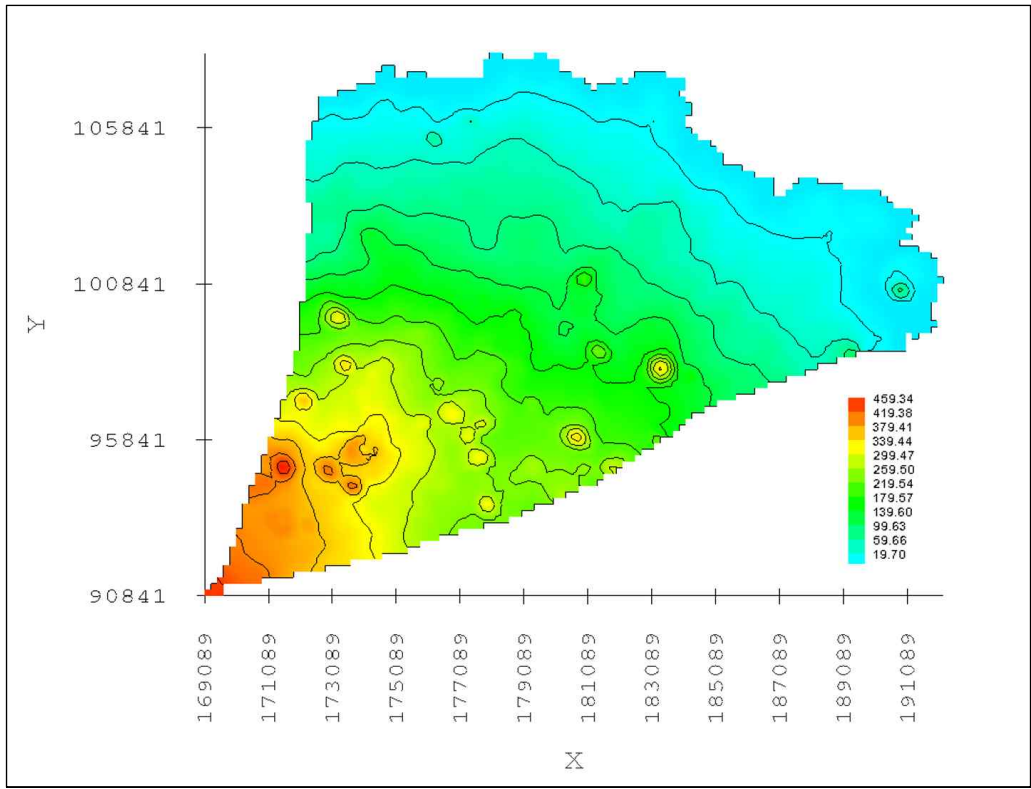


Fig. 4.49 Elevation of Kujwa watershed

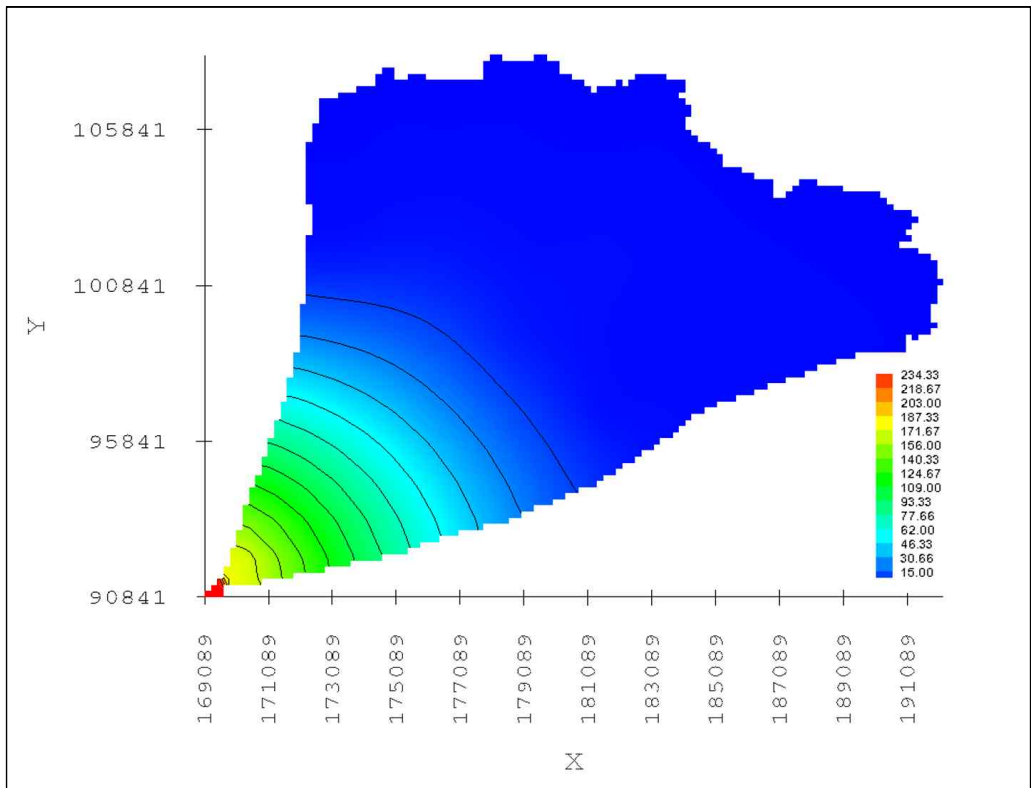


Fig. 4.50 Groundwater flow of Kujwa watershed

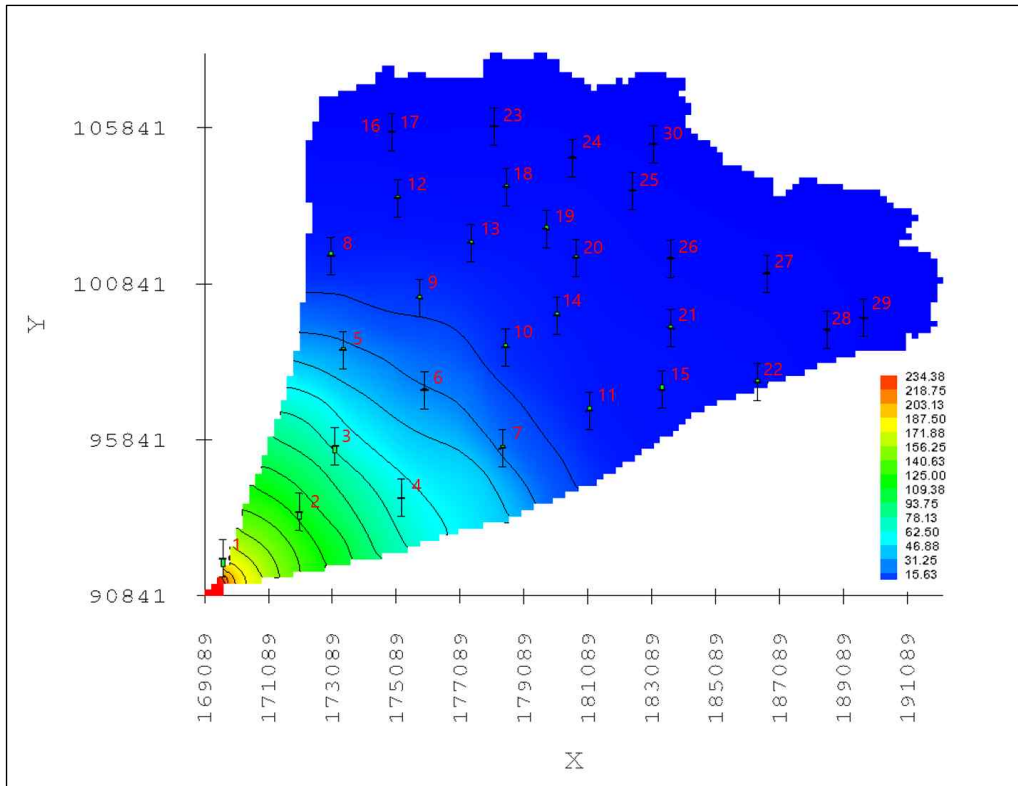


Fig. 4.51 Groundwater flow analysis results of Kujwa watershed

Table 4.20 Comparison results between observation and computed water level of Kujwa watershed

NO	observation(m)	calculation(m)	residual(m)
1	181.03	176.45	-4.57
2	119.10	115.43	-3.67
3	75.05	71.38	-3.66
4	67.71	66.96	-0.75
5	32.16	33.38	1.23
6	30.18	31.27	1.09
7	23.63	25.10	1.47
8	4.73	6.83	2.10
9	10.54	12.19	1.65
10	6.71	8.81	2.10

NO	observation(m)	calculation(m)	residual(m)
11	2.81	5.36	2.54
12	1.60	3.19	1.59
13	2.90	4.64	1.74
14	2.55	4.74	2.19
15	1.54	4.04	2.50
16	0.69	1.25	0.56
17	0.69	1.25	0.56
18	1.28	2.54	1.26
19	1.48	3.41	1.93
20	2.00	3.38	1.38
21	1.49	3.11	1.62
22	1.27	2.90	1.63
23	0.63	1.19	0.55
24	0.66	1.65	0.99
25	1.11	1.70	0.59
26	1.42	2.27	0.85
27	1.02	1.76	0.74
28	1.00	1.59	0.59
29	0.57	0.80	0.23
30	0.47	0.50	0.03

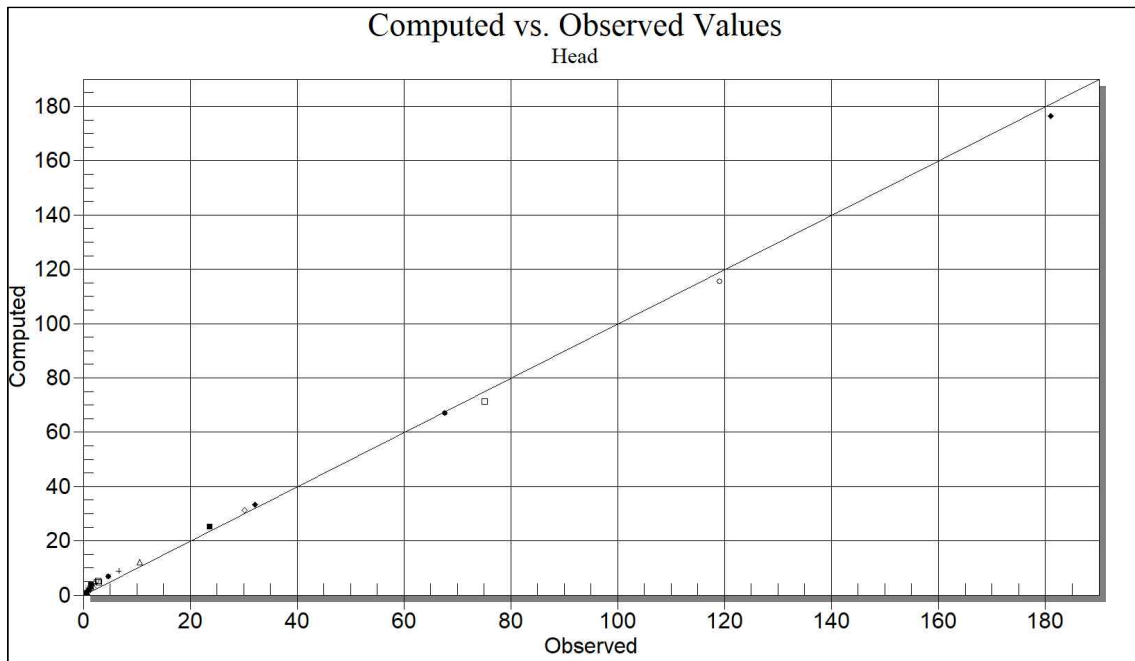


Fig. 4.52 Computed vs. Observed Values (Kujwa watershed)

### 4.2.3 대정-안덕유역

Fig. 4.53은 대정-안덕유역의 표고 특성으로 유역의 최상류에서 서남쪽 해안방향으로 완만하게 낮아지는 경향을 보이고, Fig. 4.54는 지하수위 관측 자료를 이용하여 산출된 대정-안덕유역의 등수위선으로 표고분포와 동일하게 상류지역에서 해안방향으로 완만하게 낮아지는 경향을 보인다. 유역의 등고선과 등수위선의 방향성을 X축을 기준으로 비교해보면, 등고선의 경우 약 22° 기울어 서남방향으로 낮아지는 경향을 보이고 있으며, 등수위선의 경우 약 27° 기울어 서남방향으로 낮아지고 있어 등고선과 등수위선의 기울기는 유사하게 나타난다.

유역의 정상류 상태의 지하수 흐름분석 결과 관측수위와 계산수위의 잔차는 -4.32~4.72m 범위로 나타났고, RMSE는 1.941으로 분석되었다(Table 4.21). 지하수 흐름에 대한 방향성 분석 결과 등수위선의 경사는 약 26°로 서남방향으로 낮아지는 경향을 보이고 있어 관측 자료를 이용하여 산출된 등수위선과 유사한 흐름을 보인다(Fig 4.55).

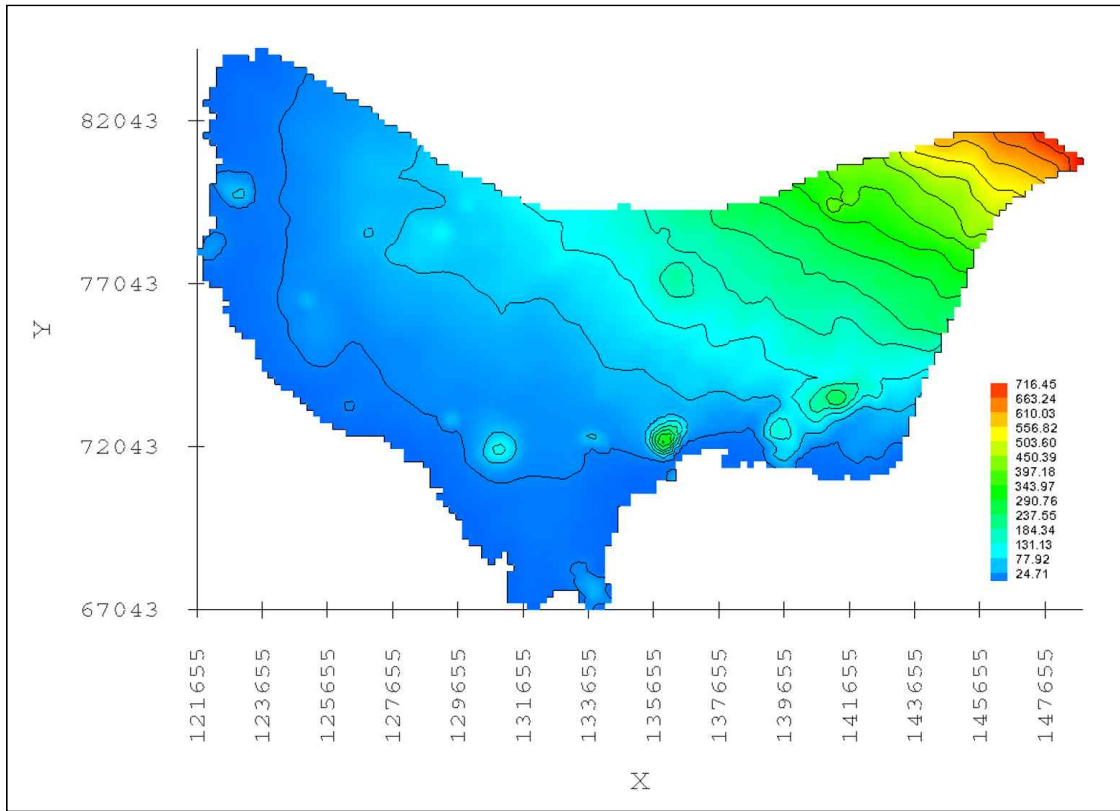


Fig. 4.53 Elevation of Deajeong-Andeok watershed

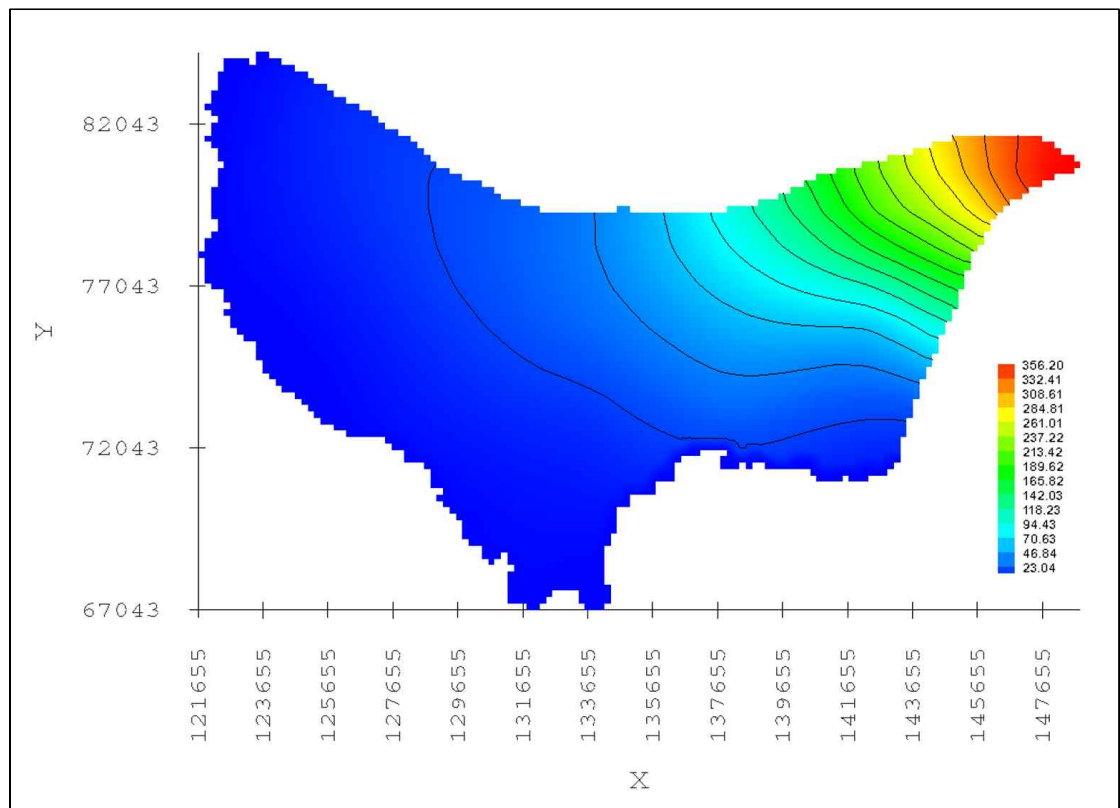


Fig. 4.54 Groundwater flow of Deajeong-Andeok watershed

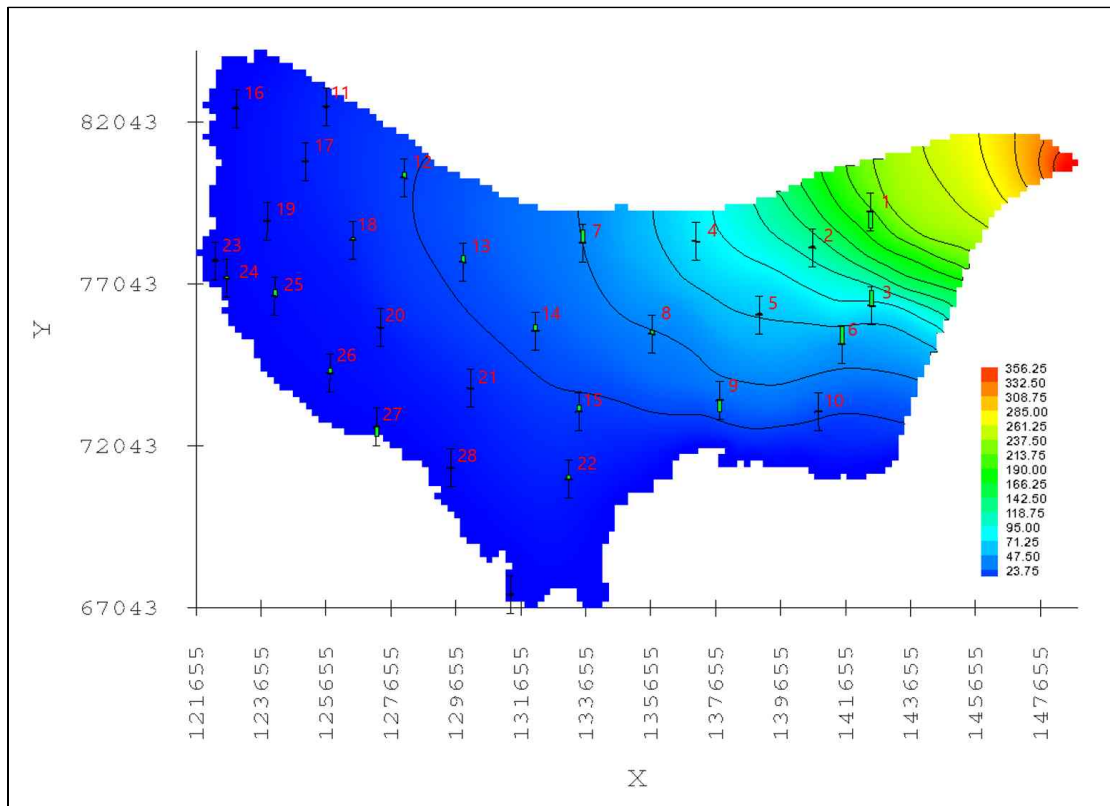


Fig. 4.55 Groundwater flow analysis results of Deajeong-Andeok watershed

Table 4.21 Comparison results between observation and computed water level of Deajeong-Andeok watershed

NO	observation(m)	calculation(m)	residual(m)
1	215.96	211.64	-4.32
2	135.54	136.08	0.54
3	97.28	101.51	4.24
4	85.42	85.51	0.09
5	73.13	73.49	0.36
6	57.93	62.65	4.72
7	46.14	49.61	3.47
8	47.22	48.28	1.06
9	38.30	35.15	-3.15



NO	observation(m)	calculation(m)	residual(m)
10	27.85	28.07	0.22
11	13.69	13.34	-0.36
12	21.93	23.43	1.50
13	27.13	28.92	1.79
14	30.18	31.86	1.68
15	18.02	19.79	1.78
16	2.05	2.71	0.66
17	11.33	11.44	0.11
18	13.81	14.70	0.88
19	5.43	5.54	0.11
20	10.41	10.33	-0.08
21	14.34	14.07	-0.27
22	7.50	8.59	1.09
23	0.39	0.78	0.39
24	0.43	1.05	0.62
25	1.63	3.51	1.88
26	1.64	3.12	1.47
27	3.38	0.90	-2.48
28	3.73	3.49	-0.24
29	0.51	0.06	-0.45

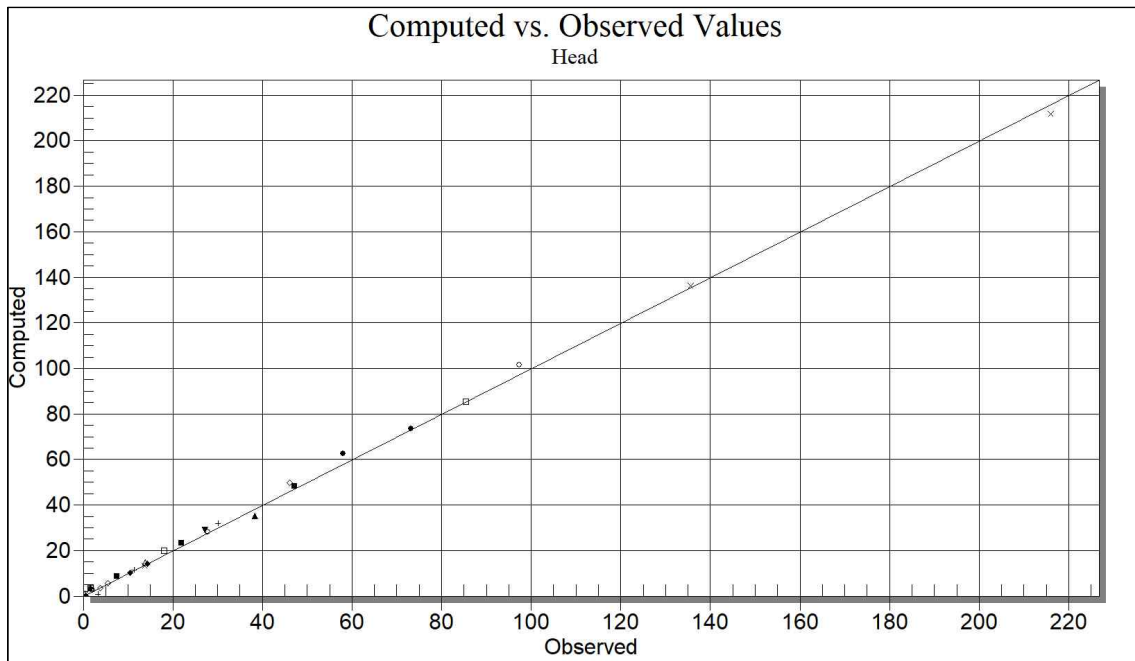


Fig. 4.56 Computed vs. Observed Values (Deajeong-Andeok watershed)

#### 4.2.4 한림-한경구역

Fig. 4.57은 한림-한경구역의 표고 특성으로 구역의 최상류에서 북서쪽 해안방향으로 완만하게 낮아지는 경향을 보이고, Fig. 4.58은 지하수위 관측 자료를 이용하여 산출된 한림-한경구역의 등수위선으로 표고분포와 동일하게 상류지역에서 해안방향으로 완만하게 낮아지는 경향을 보인다. 구역의 등고선과 등수위선의 방향성을 Y축을 기준으로 비교해보면, 등고선의 경우 약 19° 기울어 서남방향으로 낮아지는 경향을 보이고 있으며, 등수위선의 경우 약 19° 기울어 서남방향으로 낮아지고 있어 등고선과 등수위선의 기울기는 유사하게 나타난다.

구역의 정상류 상태의 지하수 흐름분석 결과 관측수위와 계산수위의 잔차는 -15.69~10.14m 범위로 나타났고, RMSE는 3.410으로 분석되었다(Table 4.22). 지하수 흐름에 대한 방향성 분석 결과 등수위선의 경사는 약 19°로 북서방향으로 낮아지는 경향을 보이고 있다(Fig. 4.59).

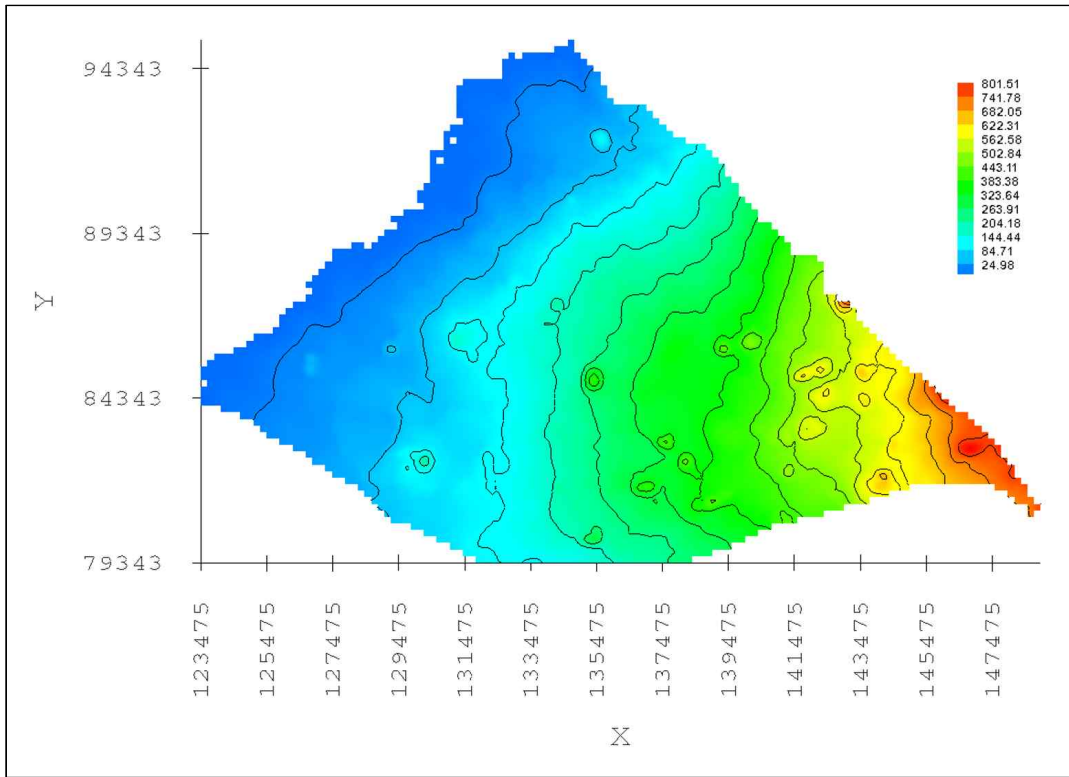


Fig. 4.57 Elevation of Hanrim-Hankyeong watershed

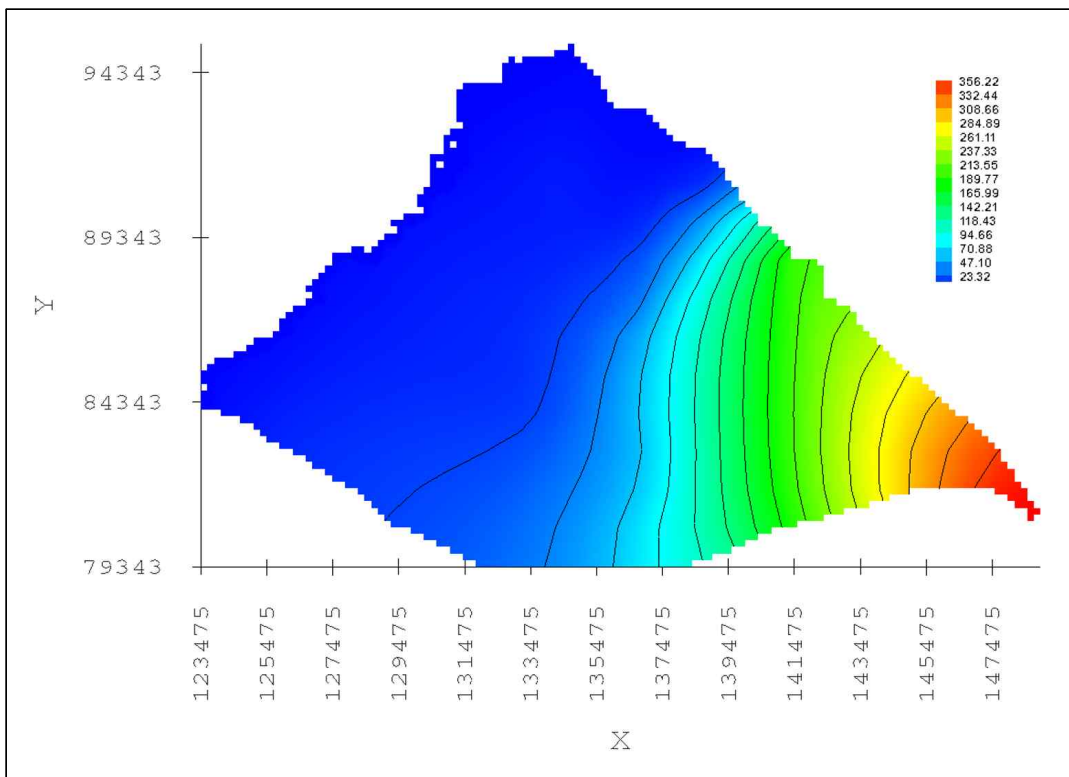


Fig. 4.58 Groundwater flow of Hanrim-Hankyeong watershed

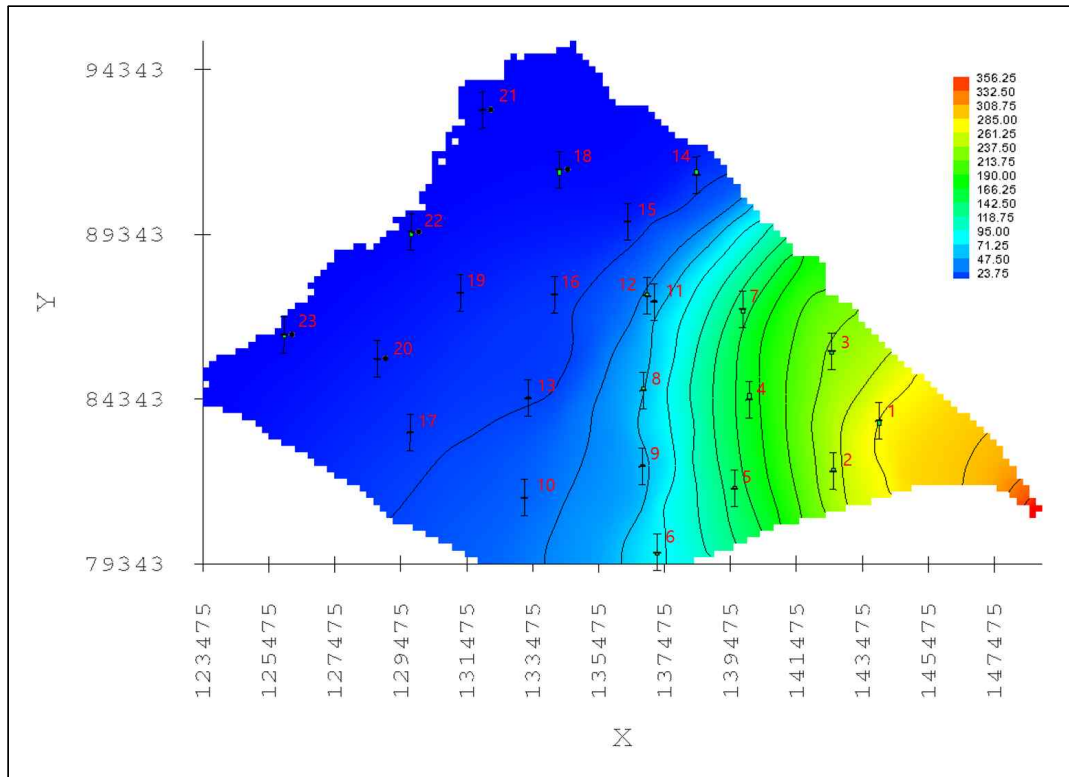


Fig. 4.59 Groundwater flow analysis results of Hanrim-Hankyeong watershed

Table 4.22 Comparison results between observation and computed water level of Hanrim-Hankyeong watershed

NO	observation(m)	calculation(m)	residual(m)
1	286.05	283.77	-2.28
2	251.11	256.24	5.13
3	242.66	233.03	-9.63
4	177.34	182.48	5.14
5	160.12	169.28	9.15
6	97.78	101.52	3.74
7	164.03	148.34	-15.69
8	76.77	84.89	8.12
9	77.22	87.36	10.14

NO	observation(m)	calculation(m)	residual(m)
10	37.35	36.60	-0.75
11	67.32	70.14	2.81
12	56.93	62.05	5.12
13	21.59	23.79	2.20
14	13.28	22.24	8.96
15	13.07	16.00	2.93
16	18.10	19.54	1.44
17	18.47	18.33	-0.15
18	7.85	2.92	-4.94
19	10.94	9.45	-1.49
20	10.98	8.54	-2.44
21	1.08	0.19	-0.89
22	5.53	1.06	-4.46
23	3.76	0.37	-3.39

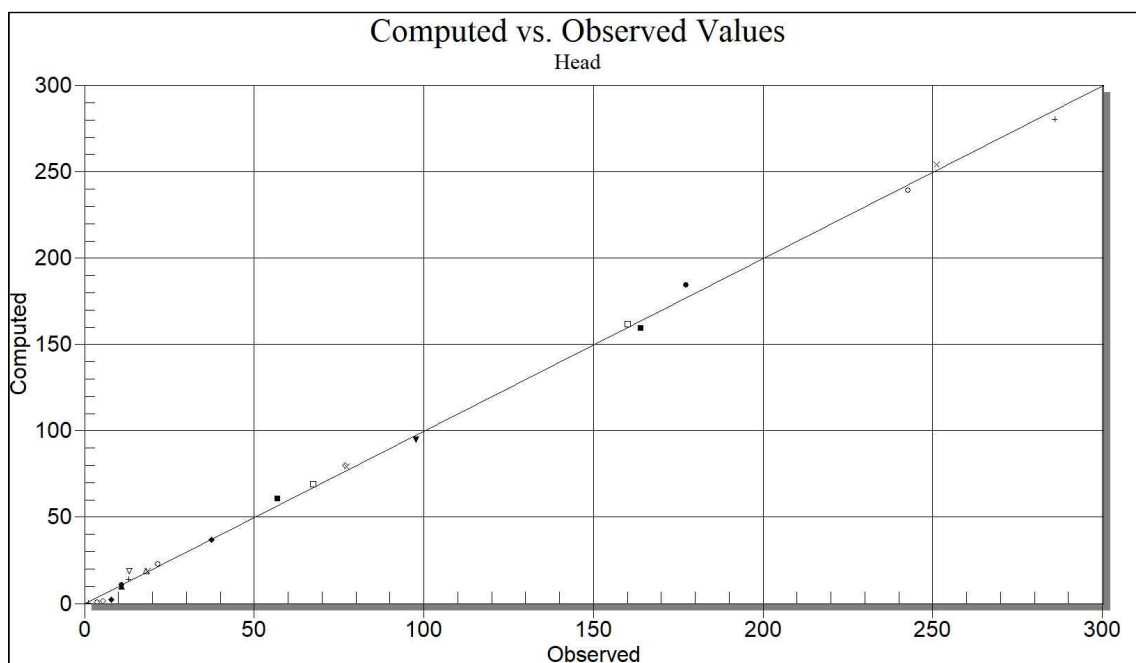


Fig. 4.60 Computed vs. Observed Values

#### 4.2.5 남원유역

Fig. 4.61은 남원유역의 표고 특성으로 유역의 최상류에서 동남쪽 해안방향으로 급격하게 낮아지는 경향을 보이고, Fig. 4.62는 지하수위 관측 자료를 이용하여 산출된 남원유역의 등수위선으로 표고분포와 동일하게 상류지역에서 동남쪽 해안방향으로 낮아지는 경향을 보인다. 유역의 등고선과 등수위선의 방향성을 Y축을 기준으로 비교해보면, 등고선의 경우 약 60° 기울어 동남방향으로 낮아지는 경향을 보이고 있으며, 등수위선의 경우 약 47° 기울어 동남방향으로 낮아지고 있어 방향은 유사하지만 등고선과 등수위선의 기울기는 차이를 보인다.

유역의 정상류 상태의 지하수 흐름분석 결과 관측수위와 계산수위의 잔차는 -15.11~5.01m 범위로 나타났고, RMSE는 2.943으로 분석되었다(Table 4.23). 지하수 흐름에 대한 방향성 분석 결과 등수위선의 경사는 약 47°로 동남방향으로 낮아지는 경향을 보이고 있어 관측 자료를 이용하여 산출된 등수위선과 유사한 흐름을 보인다(Fig. 4.63).

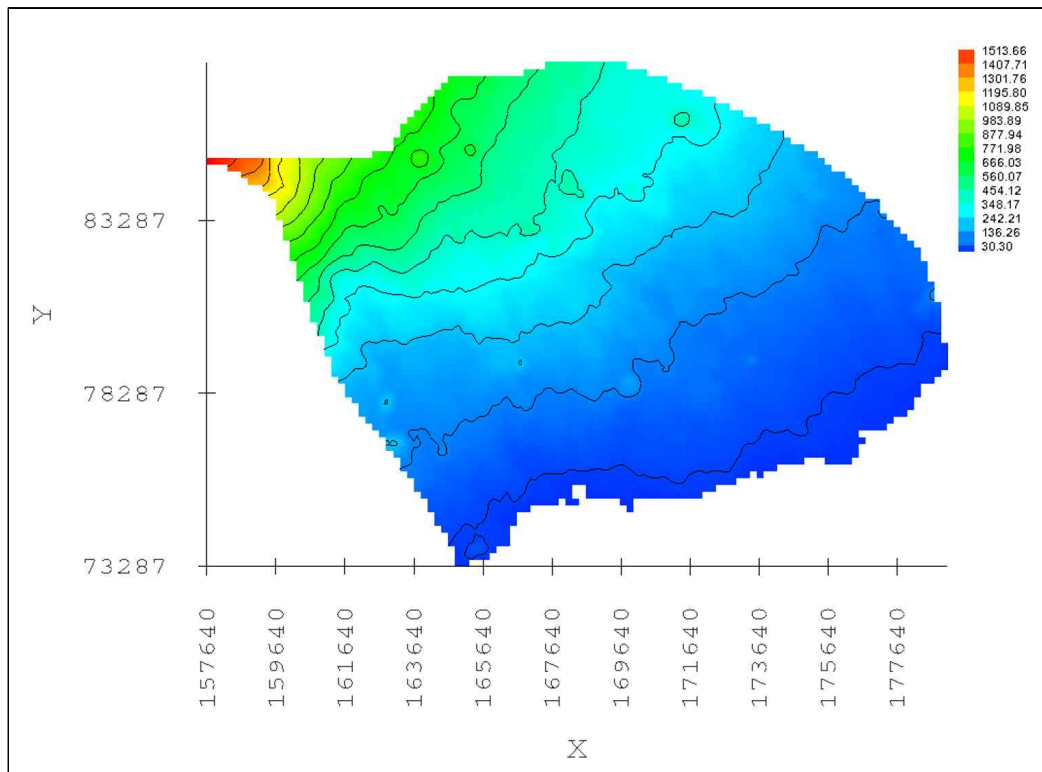


Fig. 4.61 Elevation of Namwon watershed

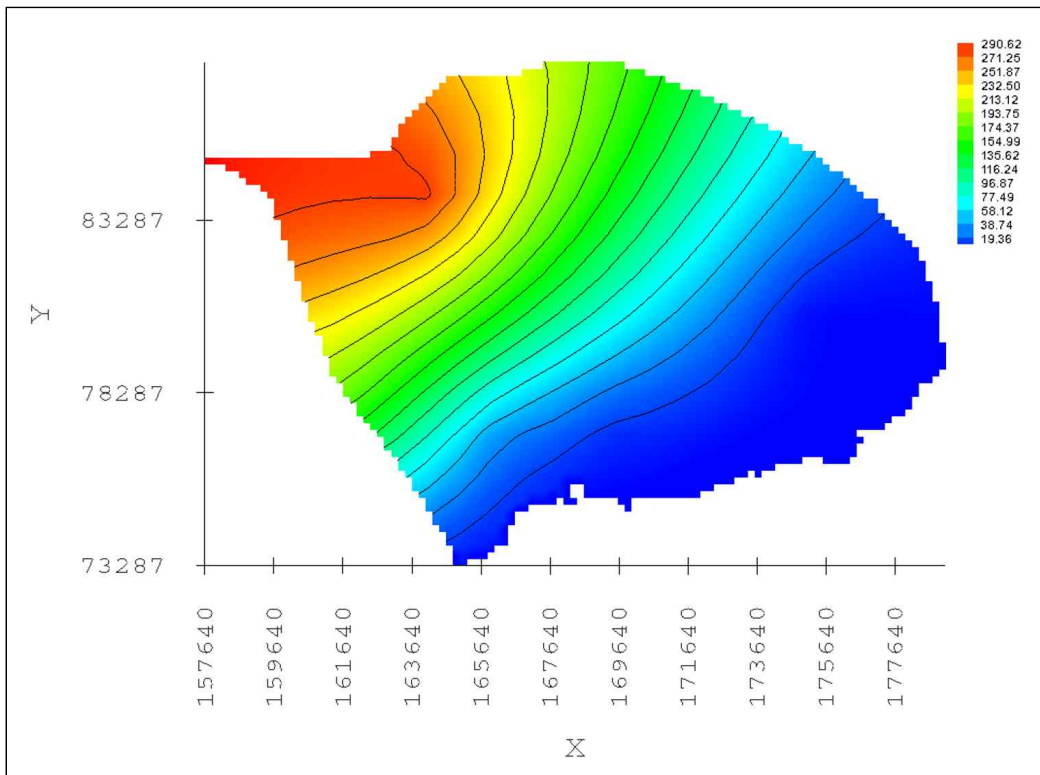


Fig. 4.62 Groundwater flow of Namwon watershed

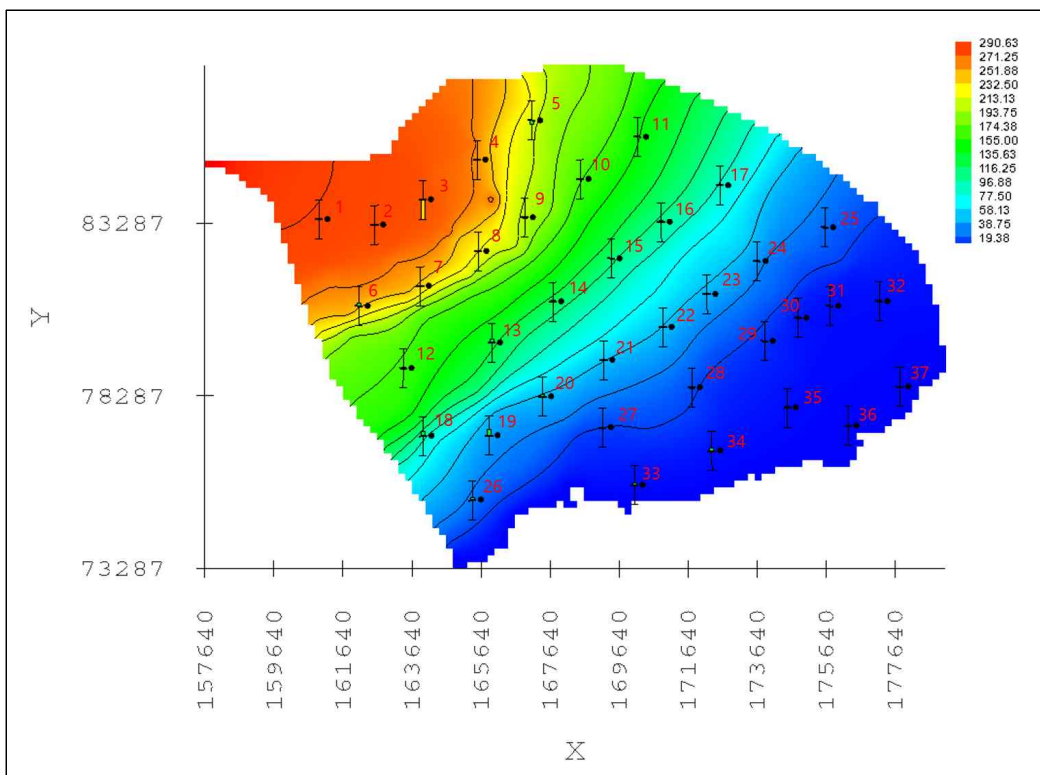


Fig. 4.63 Groundwater flow analysis results of Namwon watershed

Table 4.23 Comparison results between observation and computed water level of Namwon watershed

NO	observation(m)	calculation(m)	residual(m)
1	286.42	287.43	1.01
2	281.50	281.42	-0.08
3	290.43	275.32	-15.11
4	251.04	251.11	0.08
5	216.74	214.47	-2.27
6	235.32	238.13	2.82
7	225.81	226.39	0.58
8	214.78	215.54	0.76
9	198.86	198.42	-0.44
10	171.99	171.90	-0.09
11	150.84	151.69	0.85
12	166.42	166.95	0.53
13	129.15	132.39	3.24
14	123.59	124.71	1.12
15	115.59	115.90	0.32
16	105.03	106.61	1.59
17	88.17	89.34	1.17
18	97.92	101.24	3.32
19	49.11	54.12	5.01
20	56.67	58.44	1.77
21	58.36	59.12	0.76
22	53.59	53.66	0.07
23	50.39	50.60	0.21
24	40.56	41.50	0.94



NO	observation(m)	calculation(m)	residual(m)
25	29.11	28.94	-0.17
26	28.58	30.68	2.10
27	18.97	19.21	0.24
28	20.01	19.26	-0.74
29	12.37	11.56	-0.81
30	4.25	5.57	1.33
31	4.25	4.03	-0.22
32	2.95	3.88	0.92
33	0.88	2.53	1.66
34	1.43	3.84	2.41
35	1.33	2.87	1.54
36	0.43	0.34	-0.09
37	0.54	0.29	-0.25

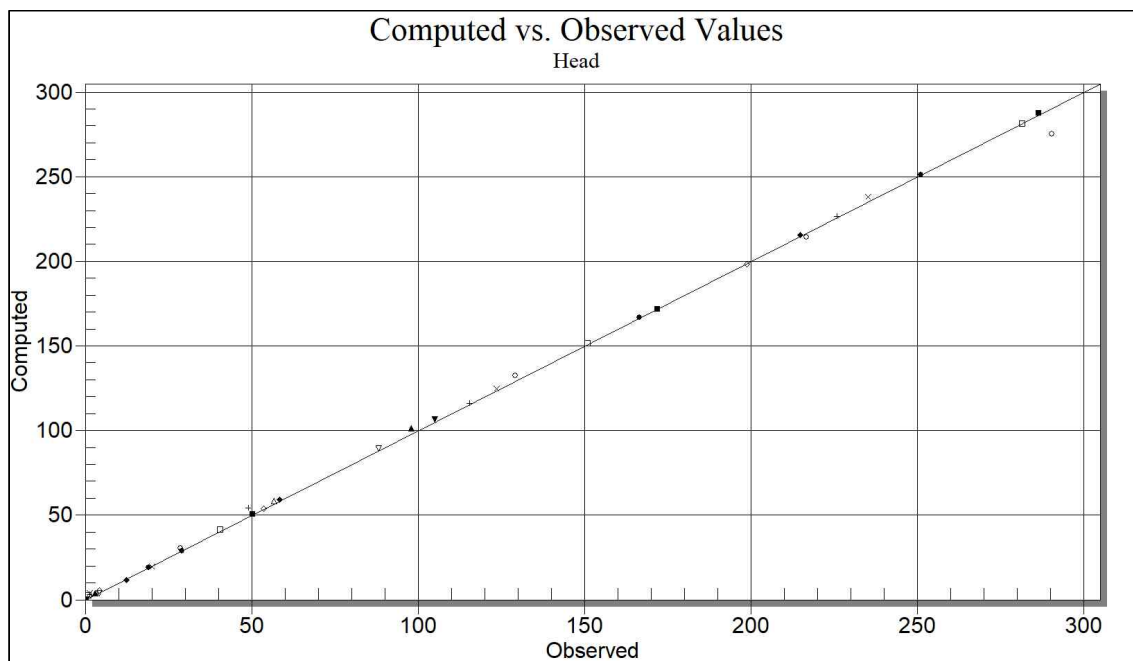


Fig. 4.64 Computed vs. Observed Values

## 4.2.6 서귀유역

Fig. 4.65는 서귀유역의 표고 특성으로 유역의 최상류에서 남쪽 해안방향으로 급격하게 낮아지는 경향을 보이고, Fig 4.66은 지하수위 관측 자료를 이용하여 산출된 대정-안덕유역의 등수위선으로 표고분포와 동일하게 상류지역에서 해안방향으로 낮아지는 경향을 보인다. 유역의 등고선과 등수위선의 방향성을 X축을 기준으로 비교해보면, 등고선의 경우 약 7° 기울어 서남방향으로 낮아지는 경향을 보이고 있으며, 등수위선의 경우 약 3° 기울어 서남방향으로 낮아지고 있어 등고선과 등수위선의 기울기는 유사하게 나타난다.

유역의 정상류 상태의 지하수 흐름분석 결과 관측수위와 계산수위의 잔차는 -19.87~18.13m 범위로 나타났고, RMSE는 6.177으로 분석되었다(Table 4.24). 수위 차이가 많이 나는 지점은 10번과 23번으로 두 지점의 거리는 2.1km의 짧은 거리지만, 지하수위 차이는 276.93m로 큰의 잔차가 발생되어 상류지역에 위치한 10번은 지하수위가 비교적 낮게 산출되고, 중하류지역에 위치한 23번은 지하수위가 비교적 높게 산출되었다. 지하수 흐름에 대한 방향성 분석 결과 등수위선의 경사는 약 3°로 서남방향으로 낮아지는 경향을 보이고 있어 관측 자료를 이용하여 산출된 등수위선과 유사한 흐름을 보인다(Fig. 4.67).

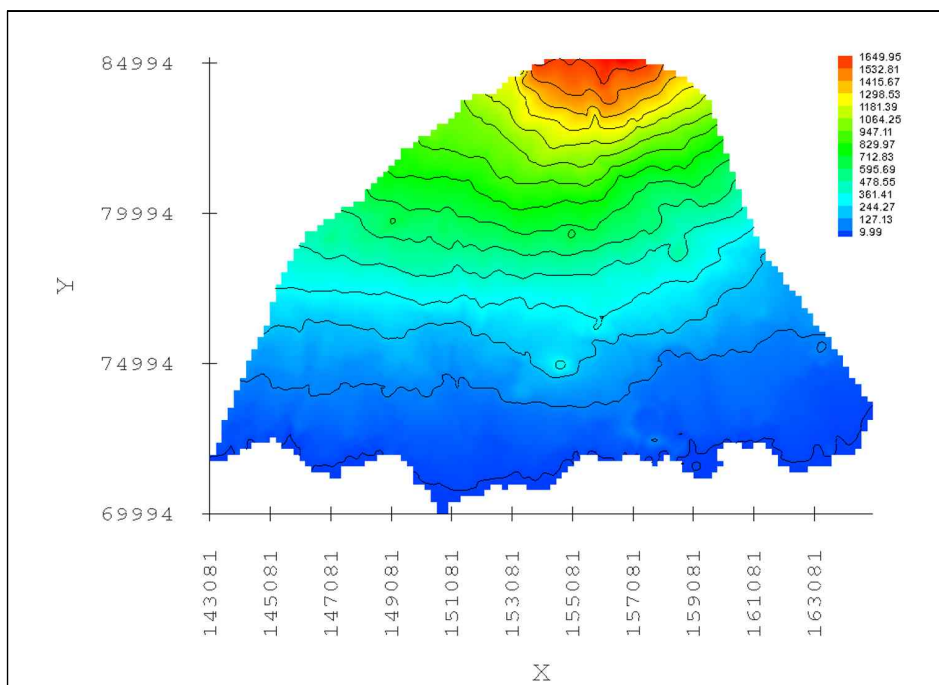


Fig. 4.65 Elevation of Seogwi watershed

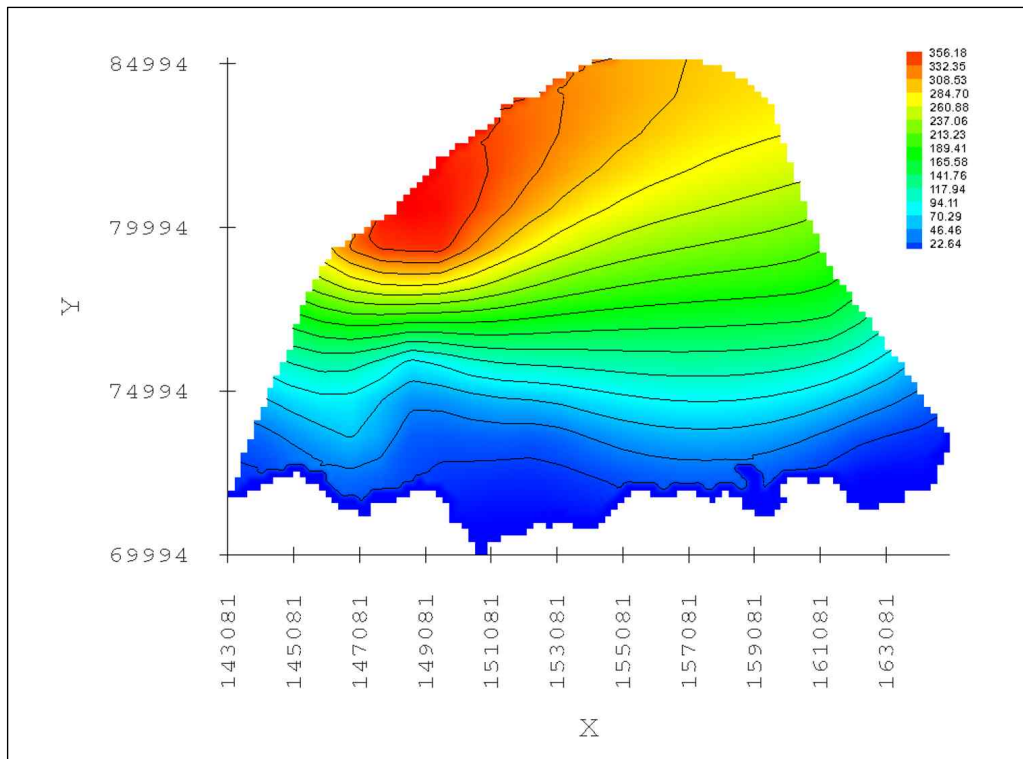


Fig. 4.66 Groundwater flow of Seogwi watershed

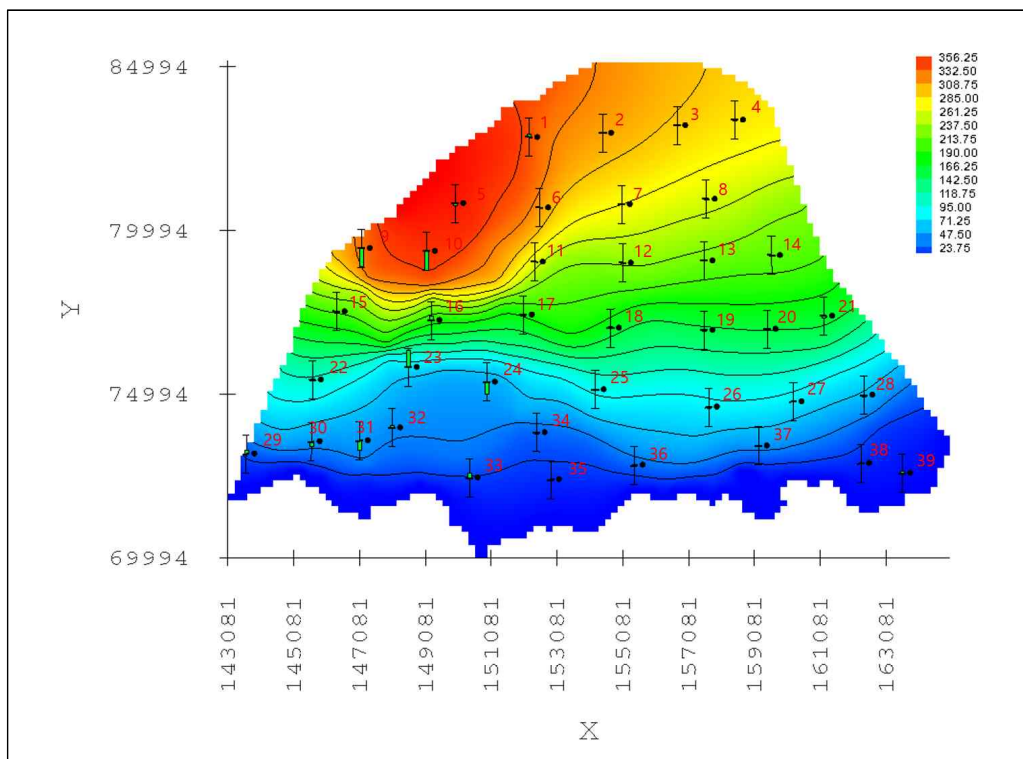


Fig. 4.67 Groundwater flow analysis results of Seogwi watershed

Table 4.24 Comparison results between observation and computed water level of Seogwi watershed

NO	observation(m)	calculation(m)	residual(m)
1	339.48	343.39	3.92
2	316.45	317.07	0.61
3	301.74	302.02	0.28
4	294.30	293.39	-0.91
5	365.05	362.75	-2.30
6	311.59	312.38	0.79
7	281.44	280.97	-0.47
8	266.13	265.79	-0.34
9	352.94	333.97	-18.96
10	364.03	344.16	-19.87
11	266.13	266.79	0.66
12	237.50	237.26	-0.23
13	226.65	226.50	-0.15
14	220.72	220.28	-0.45
15	222.44	222.56	0.11
16	204.41	208.68	4.27
17	200.76	199.44	-1.33
18	171.24	173.25	2.01
19	164.54	163.71	-0.83
20	164.17	164.28	0.12
21	165.55	163.55	-2.00
22	113.15	113.87	0.72
23	87.10	105.24	18.13
24	94.33	81.84	-12.49
25	101.84	102.42	0.58

NO	observation(m)	calculation(m)	residual(m)
26	91.03	90.02	-1.00
27	84.13	83.56	-0.57
28	65.89	64.38	-1.51
29	29.93	34.14	4.21
30	59.81	54.65	-5.17
31	64.24	54.14	-10.10
32	48.70	51.13	2.44
33	17.26	22.58	5.32
34	41.37	39.98	-1.39
35	17.01	15.53	-1.48
36	41.04	40.02	-1.02
37	54.08	53.29	-0.79
38	11.86	11.99	0.13
39	1.25	3.59	2.34

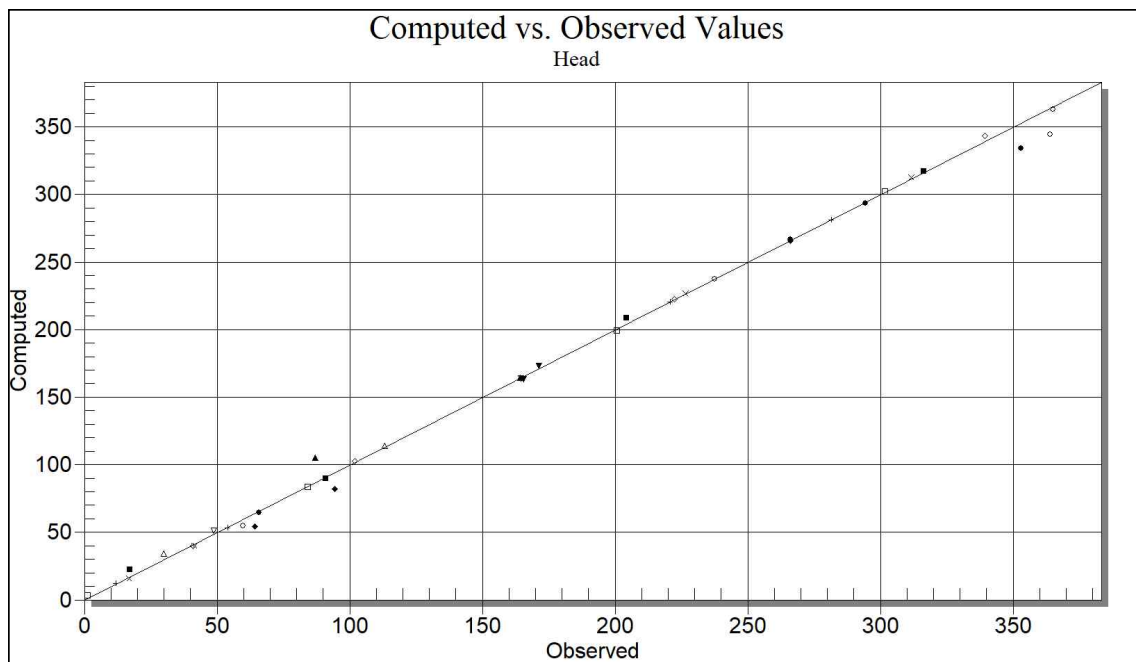


Fig. 4.68 Computed vs. Observed Values (Seogwi watershed)

## 4.2.7 동제주유역

Fig. 4.69는 동제주유역의 표고 특성으로 유역의 최상류는 북동방향으로, 중하류지역은 북쪽방향으로 급격하게 낮아지는 경향을 보인다. Fig. 4.70은 지하수위 관측 자료를 이용하여 산출된 동제주유역의 등수위선으로 상류지역에서 북쪽 해안방향으로 낮아지는 경향을 보인다. 유역의 등고선과 등수위선의 방향성을 Y축을 기준으로 비교해보면, 등고선의 경우 상류지역은 약 126° 기울어 북동방향으로, 중하류 지역은 약 81° 기울어 북쪽방향으로 낮아지는 경향을 보이고 있으며, 등수위선의 경우 약 94° 기울어 북쪽방향으로 낮아진다.

유역의 정상류 상태의 지하수 흐름분석 결과 관측수위와 계산수위 차이는 -1.06 ~1.54m 범위로 나타났고, RMSE는 0.544으로 분석되었다(Table 4.25). 지하수 흐름에 대한 방향성 분석 결과 등수위선의 경사는 약 94°로 북쪽방향으로 낮아지는 경향을 보이고 있어 관측 자료를 이용하여 산출된 등수위선과 유사한 흐름을 보인다 (Fig. 4.71).

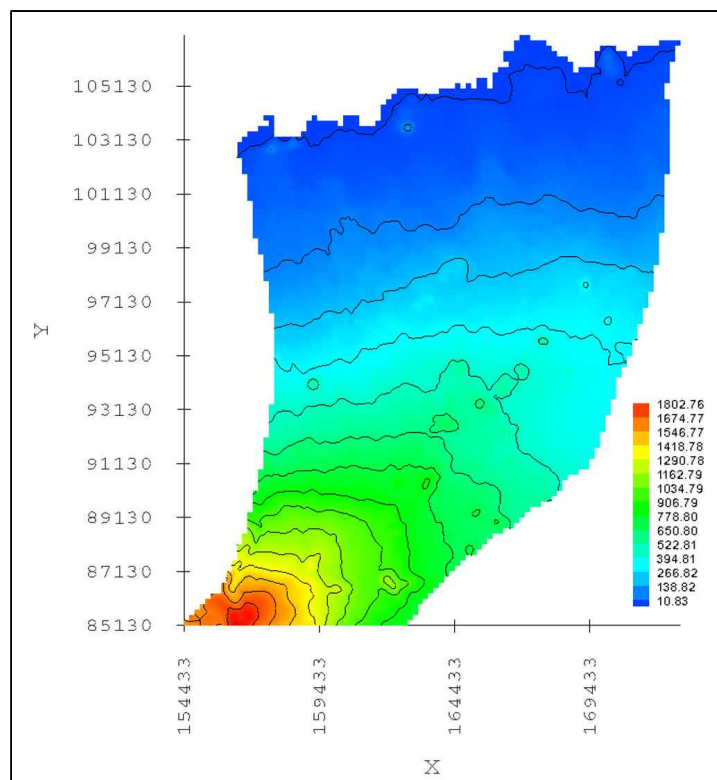


Fig. 4.69 Elevation of East Jeju watershed

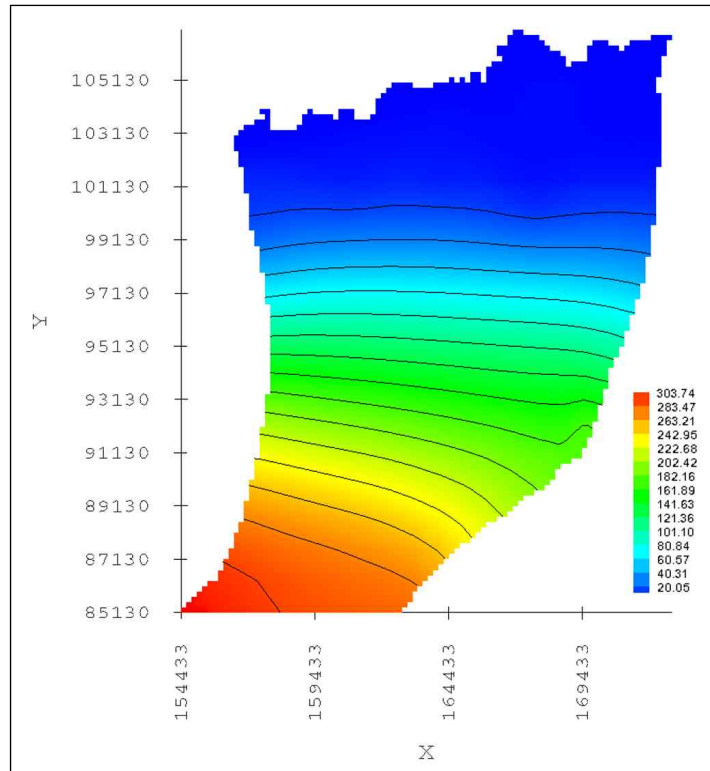


Fig. 4.70 Groundwater flow of East Jeju watershed

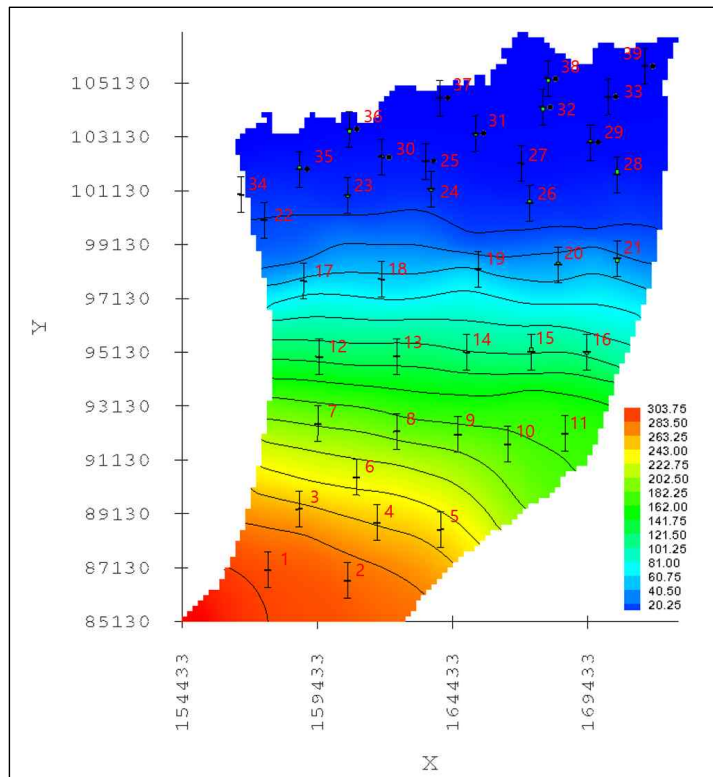


Fig. 4.71 Groundwater flow analysis results of East Jeju watershed

Table 4.25 Comparison results between observation and computed water level of East Jeju watershed

NO	observation(m)	calculation(m)	residual(m)
1	295.92	295.99	0.07
2	288.46	288.36	-0.10
3	263.47	263.47	-0.01
4	258.73	258.78	0.05
5	246.89	246.83	-0.06
6	233.64	233.65	0.01
7	198.52	198.53	0.01
8	193.81	193.76	-0.05
9	187.91	188.11	0.20
10	185.50	185.62	0.11
11	175.67	175.37	-0.30
12	136.76	136.77	0.01
13	132.61	132.65	0.05
14	124.20	123.93	-0.27
15	120.46	121.53	1.06
16	116.00	115.52	-0.48
17	65.94	65.95	0.01
18	66.31	66.29	-0.02
19	56.61	56.27	-0.34
20	49.76	50.48	0.73
21	42.73	41.67	-1.06
22	20.97	20.91	-0.05
23	12.06	11.69	-0.37
24	11.00	10.49	-0.50
25	5.96	5.91	-0.05



NO	observation(m)	calculation(m)	residual(m)
26	10.40	11.22	0.82
27	2.88	2.95	0.07
28	5.33	6.87	1.54
29	1.50	2.19	0.69
30	4.99	5.56	0.57
31	2.18	1.59	-0.59
32	1.77	0.94	-0.83
33	0.60	0.84	0.24
34	12.69	12.42	-0.27
35	6.16	7.17	1.02
36	1.20	0.25	-0.96
37	0.27	0.20	-0.07
38	1.13	0.25	-0.88
39	0.20	0.29	0.08

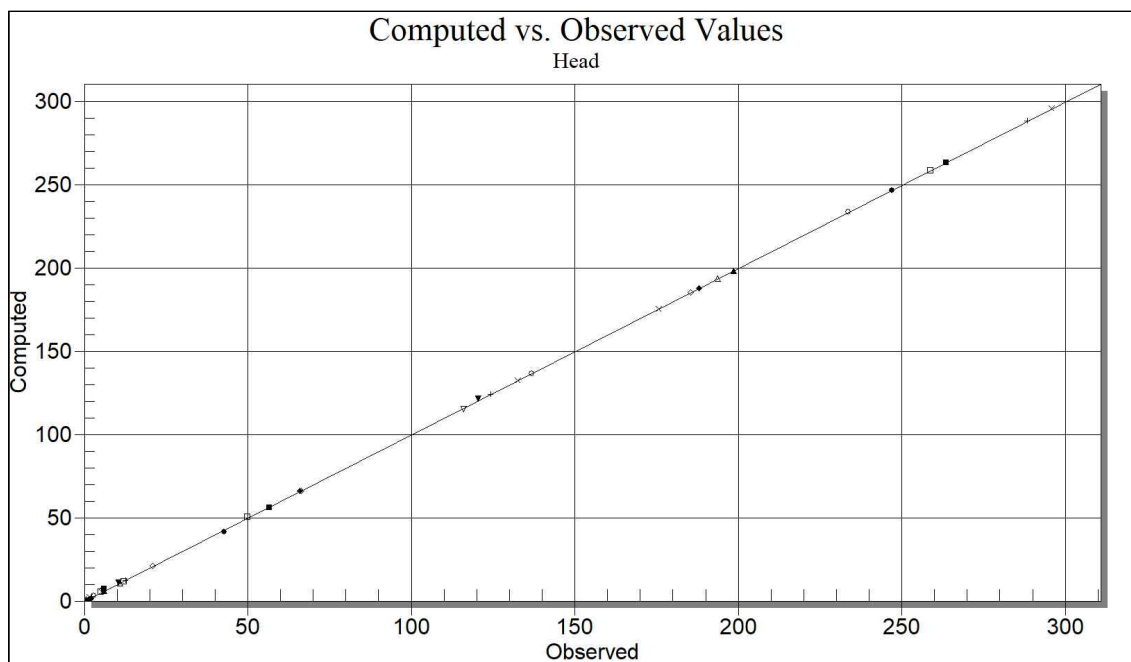


Fig. 4.72 Computed vs. Observed Values (East Jeju watershed)

## 4.2.8 서제주유역

Fig. 4.73은 서제주유역의 표고 특성으로 유역의 최상류는 북서방향으로, 중하류지역은 북쪽방향으로 급격하게 낮아지는 경향을 보인다. Fig. 4.74는 지하수위 관측 자료를 이용하여 산출된 동제주유역의 등수위선으로 상류지역에서 북쪽 해안방향으로 낮아지는 경향을 보인다. 유역의 등고선과 등수위선의 방향성을 Y축을 기준으로 비교해보면, 등고선의 경우 상류지역은 약 45° 기울어 북동방향으로, 중하류 지역은 약 70° 기울어 북쪽방향으로 낮아지는 경향을 보이고 있으며, 등수위선의 경우 약 75° 기울어 북쪽방향으로 낮아진다.

유역의 정상류 상태의 지하수 흐름분석 결과 관측수위와 계산수위 차이는 -20.82 ~14.48m 범위로 나타났고, RMSE는 6.005로 분석되었다(Table 4.26). 수두차이가 높게 나타나는 13번과 14번 지점과 수두차이가 낮게 나타나는 12번 지점의 경우 지점간 거리는 2.9km이지만 관측수위의의 잔차는 151.51m와 170.76m로 거리에 비해 수위차이가 매우 큰 것으로 확인되어 상류지역에 위치한 12번은 계산수위가 관측수위보다 높게 산출되고, 하류지역에 위치한 13, 14번은 계산수위가 관측수위보다 낮게 산출되었다. 지하수 흐름에 대한 방향성 분석 결과 등수위선의 경사는 약 73°로 북쪽방향으로 낮아지는 경향을 보이고 있어 관측 자료를 이용하여 산출된 등수위선과 유사한 흐름을 보인다(Fig. 4.75).

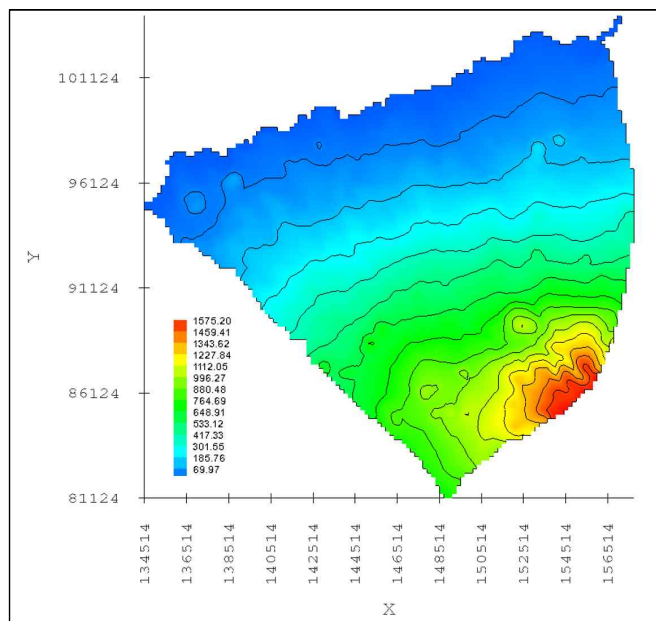


Fig. 4.73 Elevation of West Jeju watershed

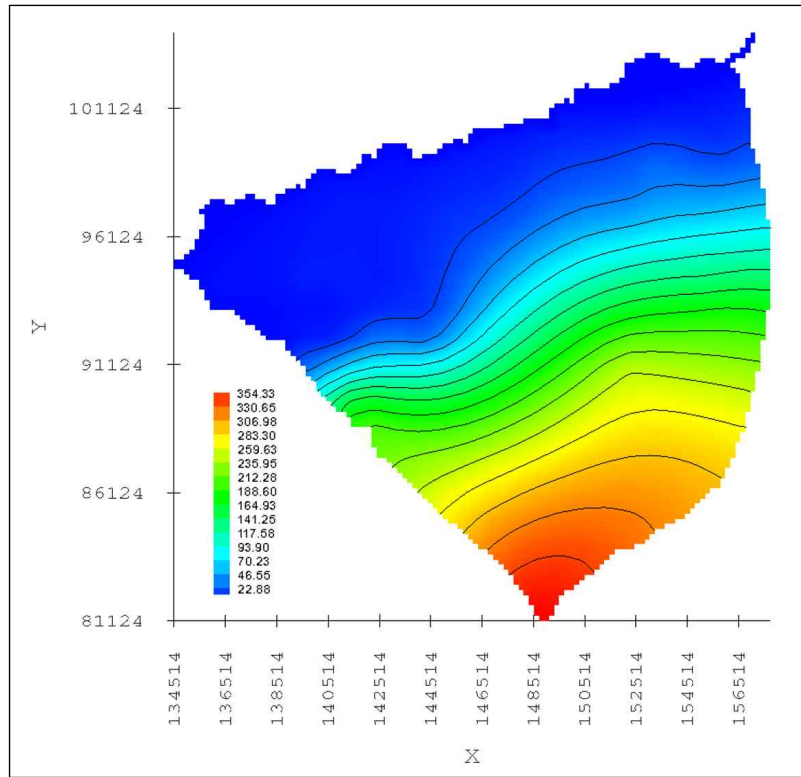


Fig. 4.74 Groundwater flow of West Jeju watershed

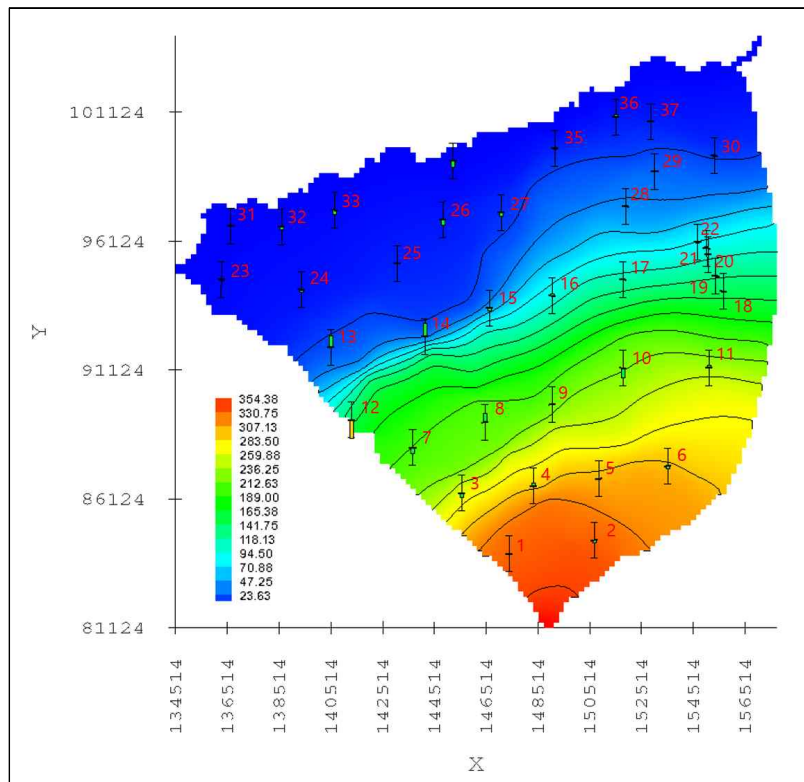


Fig. 4.75 Groundwater flow analysis results of West Jeju watershed

Table 4.26 Comparison results between observation and computed water level of West Jeju watershed

NO	observation(m)	calculation(m)	residual(m)
1	341.23	339.81	-1.41
2	341.76	338.27	-3.49
3	277.37	272.40	-4.96
4	301.69	304.70	3.01
5	311.26	309.62	-1.65
6	307.78	303.99	-3.80
7	221.30	214.60	-6.70
8	212.63	222.17	9.55
9	233.73	234.26	0.53
10	245.79	234.51	-11.28
11	242.21	244.44	2.23
12	188.85	168.04	-20.82
13	18.09	30.87	12.79
14	37.34	51.82	14.48
15	72.82	69.22	-3.59
16	111.07	113.01	1.94
17	125.62	127.23	1.61
18	158.39	157.43	-0.96
19	138.63	139.84	1.22
20	112.60	113.31	0.71
21	104.04	106.27	2.23
22	97.29	96.66	-0.63
23	3.47	2.29	-1.18
24	9.00	6.49	-2.51

NO	observation(m)	calculation(m)	residual(m)
25	10.75	11.31	0.56
26	15.22	8.39	-6.83
27	22.69	18.72	-3.96
28	49.29	50.64	1.35
29	37.00	36.45	-0.55
30	21.37	20.88	-0.49
31	0.95	0.42	-0.53
32	4.66	1.55	-3.11
33	7.17	2.42	-4.76
34	7.19	0.58	-6.61
35	13.51	12.52	-0.99
36	4.42	8.25	3.83
37	8.98	10.38	1.40

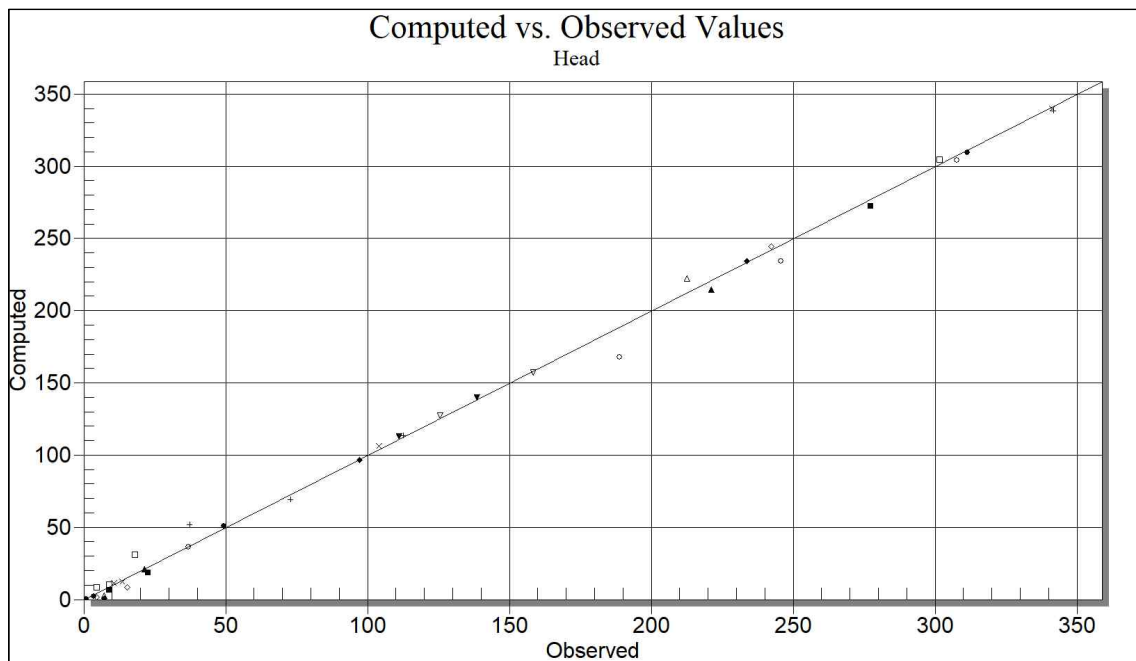


Fig. 4.76 Computed vs. Observed Values

### 4.3 제주도 수리전도도 특성

#### 4.3.1 수리전도도 분포 특성

Fig. 4.77은 제주도 8개 유역을 대상으로 모델분석을 통해 산출된 수리전도도 결과이다. 전반적으로 해안지역은 100 m/d 이상의 수리전도도 특성을 보이며, 중 상류지역은 1 ~ 45 m/d의 수리전도도 결과가 산출되었다.

동제주유역, 구좌유역, 표선-성산유역, 남원유역의 하류지역은 수리전도도가 500 m/d 이상 크게 분포하고 있는 반면, 표고 약 200m이상지역과 대정-안덕지역의 경우 500 m/d의 이하의 결과가 산출되었다. 특히, 동부지역의 경우 해안에서 내륙으로 약 12 km까지 수리전도도가 500 m/d이상 분포하는 것으로 분석되었다.

표선-성산유역의 평균 수리전도도는 227.67 m/d로 8개 유역 중 가장 크게 산출되었으며, 구좌유역 186.24 m/d, 남원유역 112.42 m/d, 동제주유역 110.89 m/d로 동부지역의 평균 수리전도도가 비교적 크게 분포하였다. 서부지역의 서제주유역, 한림-한경유역, 대정-안덕유역, 서귀유역은 각각 39.37 m/d, 78.85 m/d, 26.79 m/d, 60.92 m/d로 동부지역에 비해 비교적 작게 분포하였다.

수리전도도의 범위가 가장 큰 유역은 남원유역으로 동부 해안지역에서 가장 큰 수리전도도(2,770.84 m/d)가 산출되었다. 표선-성산유역은 2,707.61 m/d, 구좌유역은 2,625 m/d, 동제주유역은 2,205.77 m/d, 한림-한경유역 1,533.35 m/d, 서귀유역 1,525.48 m/d, 서제주유역 874.30 m/d, 대정-안덕유역 444.41 m/d로 분석되었다 (Table 4.27).

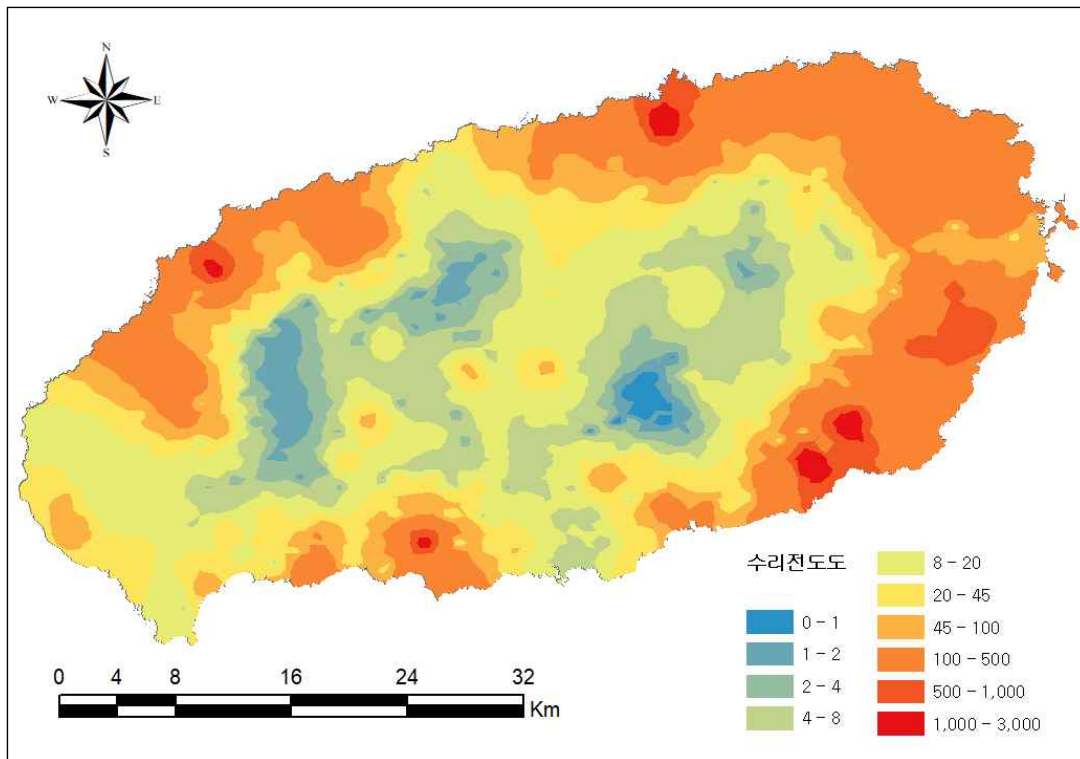


Fig. 4.77 Hydraulic conductivity distribution map of Jeju

Table 4.27 Hydraulic conductivity results by subwatershed

unit : m/d

classification	Deajeong-Andeok watershed	Hanrim-Hankyeong watershed	Seogwi watershed	Namwon watershed
maximum	445.41	1,534.35	1,525.48	2,771.84
range	444.41	1,533.35	1,525.48	2,770.84
average	26.79	78.85	60.92	112.42
median value	8.18	10.80	7.72	8.12
standard deviation	60.98	229.31	226.62	403.86

classification	Kujwa watershed	Pyoseon-Seongsan watershed	West Jeju watershed	East Jeju watershed
maximum	2,626.39	2,707.61	875.30	2,205.77
range	2,625.39	2,705.53	874.30	2,204.77
average	186.26	227.67	39.37	110.89
median value	53.37	33.23	3.43	16.65
standard deviation	403.24	456.98	133.16	348.85

#### 4.3.2 지하수 부존형태 및 등수위선 분포와의 비교·검토

Fig. 4.78a는 제주도의 지하수 부존형태로서 동부지역에 기저지하수체가 광범위하게 분포하며, Fig. 4.78b는 지하수 등수위선으로 동부지역에는 해안선 12km까지 10m 이내의 지하수위를 나타내고 있다.

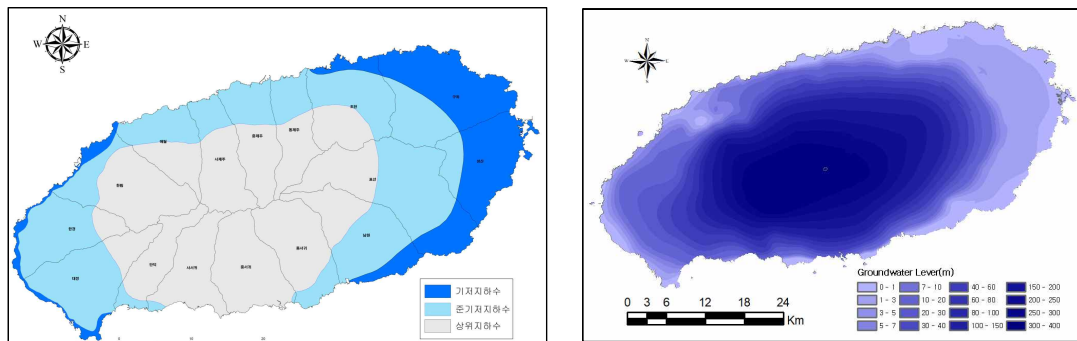
제주도의 지하수 부존형태는 G-H원리와 현무암층 하부의 저투수층 구조에 따라 기저지하수, 준기저지하수, 상위지하수로 구분되는데, 동부지역과 서부해안지역에서는 담수지하수 하부에 염지하수가 부존하고 있어 기저지하수로 분류된다. 특히, 동부지역은 해안에서 내륙지역으로 9 ~ 12km의 범위의 투수성이 좋은 현무암류가 누층을 이루고 있으며, 해수의 압력에 의해 바닷물이 내륙으로 유입할 수 있는 공극 또는 틈이 잘 발달되어 있는 특성을 보인다(Kho, 2003). 수리전도도 산출결과에 의하면, 기저지하수체가 분포하고 있는 동부지역의 경우 타 지역에 비해 비교적 높은 500m/d 이상의 수리전도도 특성이 광범위하게 나타났다.

제주도의 지하수위는 제주도 중심에서부터 해안지역으로 진행될수록 낮아지는 경향을 보인다. 특히, 동부지역은 전반적으로 완만한 수두경사특성을 보이고, 북서부와 남부 일부지역의 상류부에서는 급격한 수위특성을 보이다가 하류부에서는 완만한 수두경사특성을 보이고 있다. 수리전도도는 대수층 내의 지하수가 단위면적의 면을 통과할 수 있는 척도로서 균일한 층의 단면적과 길이가 동일하다고 할 때 지



하수의 이동속도는 수두차(수두경사)와 수리전도도에 의해 결정된다(Park, 2016). 즉, 이 연구에서 수리전도도 결과가 높게 나타난 서북부와 남부지역과 같은 경우 상류부의 급격한 수위경사특성에 반해 갑작스럽게 완만해진 수위에 영향으로 국소적으로 수리전도도가 500 ~ 1,500 m/d로 산출되었다.

제주도의 수리전도도특성과 지하수 부존특성, 등수위선 분포특성을 종합적으로 비교·검토한 결과, 비교적 높은 수리전도도 산출특성이 광역적으로 분포하는 지역은 완만한 지하수위 분포특성을 보이며, 기저지하수가 광범위하게 분포하는 지역이다. 즉, 지하 대수층의 수리전도도 특성은 지하수위와 지하수 부존형태와의 상호 연계 가능성이 나타나는 것으로 판단된다.



(a) Groundwater Occurrence

(b) Groundwater table contour map

Fig. 4.78 Groundwater Occurrence and Groundwater table contour map in Jeju

### 4.3.3 양수시험의 수리전도도 결과와 비교·검토

Table 4.28은 제주도 동부, 서부, 남부, 북부지역에 위치한 광역상수도 취수정 84공과 해수침투 감시 관측정 4공의 양수시험을 통해 산정된 수리전도도 결과이다 (Jejudo, 2003). 동부지역의 27개공 대상 수리전도도는 평균 839.0m/d, 최대 2,266.2 m/d이며, 서부지역은 4개공 대상 평균 199.20 m/d, 최대 385.00 m/d, 남부지역은 21개공 대상 평균 637.50 m/d, 최대 2,400.00 m/d, 북부지역은 36개공 대상 평균 358.40 m/d, 최대 1,650.10 m/d이다.

Table 4.29는 본 연구에서 산출된 수리전도도 결과로 동부(표선-성산, 구좌유역), 서부(대정-안덕, 한림-한경유역), 남부(남원, 서귀유역), 북부(동제주, 서제주유역)지역으로 구분하여 2003년에 분석된 수리전도도와 비교하였다.

동부지역의 평균 수리전도도는 206.36 m/d, 최대 2,707.61 m/d이며, 서부지역의 평균 수리전도도는 51.91 m/d, 최대 1,534.35 m/d이다. 남부지역의 평균 수리전도도는 86.67 m/d, 최대 2,771.84 m/d, 북부지역의 평균 수리전도도는 72.85 m/d, 최대 2,205.77 m/d로 분석되었다.

전반적으로 2003년에 분석된 지역별 평균 수리전도도가 본 연구의 평균 수리전도도에 비해 3.8배 ~ 7.4배 크게 나타난다. 2003년에는 실제 굴착된 지하수 및 관측정에 한하여 조사된 결과로 상류지역(표고 600 m이상)의 자료는 부재하고, 하류지역의 표본을 대상으로 하고 있어 비교적 높은 수리전도도가 산출되었으며, 본 연구에서는 유역전체를 바탕으로 수리전도도를 산출하였기 때문에 비교적 낮게 산출된 것으로 판단된다. 그러나 수리전도도의 최대값은 본 연구에서 산출된 결과가 1.15배 ~ 3.98배 크게 나타났으며, 2003년의 경우 양수시험 표본수가 4개공 ~ 36개공에 반해 본 연구에서는 94지점 ~ 114지점으로 일정간격으로 광범위하게 조사하였기 때문에 수리전도도의 범위는 비교적 크게 산출된 것으로 판단된다.

Table 4.28 Hydraulic conductivity results by pumping test

unit : m/d

classification	East	West	South	North
average	839.00	199.20	637.50	358.40
maximum	2,266.20	385.00	2,400.00	1,650.10
data (point)	27	4	21	36

\* 자료 : 제주도 수문지질 및 지하수자원종합조사(Ⅲ)

Table 4.29 Hydraulic conductivity results by modeling

unit : m/d

classification	East	West	South	North
average	206.36	51.91	86.67	72.85
maximum	2,707.61	1,534.35	2,771.84	2,205.77
ata (point)	103	114	104	94

## V. 결 론

제주도 지하수위 자료와 표고와의 상관관계를 분석하고, 지하수 등수위선의 지하수면을 기준으로 수리학적인 유역을 설정하였다. 이같이 설정된 지하수 유역에 대해 3차원 수치해석 모형을 사용하여 지하수 유동특성을 해석하고, 모델에서 산출된 수리전도도 특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 2001년~2016년까지 제주도의 연평균 지하수위의 변동 범위는 0.16 ~ 48.84m이며, 10m이내의 변동 폭을 보이는 관측정은 86.4%이다. 기저지하수 분포지역의 수위 변동 범위는 0.16 ~ 2.73m, 준기저지하수 지역은 0.47 ~ 12.56m, 상위지하수 지역은 0.62 ~ 48.84m로 관정별 수두 범위가 매우 크게 변동하고 있었다.

2) 해안거리와 표고와의 상관분석결과  $R^2$ 는 0.7056로서 비교적 높은 상관을 보이며, 해안거리와 지하수위 상관분석결과  $R^2$ 는 0.3265로 비교적 낮은 상관을 보였다. 표고별 100m 단위로 표고와 지하수위와의 상관관계를 분석한 결과  $R^2$ 이 0.1653 ~ 0.8011로 나타나고 있어 표고와 지하수위와의 뚜렷한 상관성을 확인할 수는 없었다. 또한, 동부와 서부지역은 표고와 지하수위와의 반비례특성이 크게 나타나고, 남부와 북부지역은 일부 지역에서 반비례특성이 나타났다.

3) 제주도 전역에 대한 등수위선을 구축하기 위하여 지하수위 자료를 Kriging기법으로 분석하고, 지하수의 흐름방향, 지하수위 관측정 위치, 유역의 장·단경 등을 고려하여 총 8개의 지하수 유역으로 설정하였다. 서제주유역이 292.8km<sup>2</sup>으로 가장 넓고, 표선-성산(257.2km<sup>2</sup>), 동제주(252.4km<sup>2</sup>), 대정-안덕(220.1km<sup>2</sup>), 구좌(218.9km<sup>2</sup>), 한림-한경(208.9km<sup>2</sup>), 서귀(200.1km<sup>2</sup>), 남원(190.2km<sup>2</sup>) 유역 순이다.

4) 기존 16개의 소유역 중 6개 유역에서 장경과 단경의 비율이 3배에서 4배까지의 차이가 발생되었으나, 금회 설정한 8개 소유역은 전체적으로 1:1의 비율로 적용

되었다. 기존 16유역 내 관측정수는 5개소 미만인 5개 유역, 5~10개소가 9개 유역이며, 금회 설정된 8유역에는 전체적으로 10개 이상 관측정이 분포하였다.

5) 지하수 수리학적 특성에 의해 설정된 8개의 지하수 유역에 대해 강우특성을 고려한 지하수 함양량, 지점단위 수리전도도, 소수의 관측자료를 보완하여 3차원 수치해석을 실시한 결과 지하수위 결과와 관측수위의 결과는 전반적으로 유사하게 나타났다. 반면 서귀와 서제주유역의 일부지역에서는 잔차가 비교적 크게 산출되는데 이는 관측정간의 거리에 비해 수두차가 크게 나타난 지역이다. 결과적으로 RMSE는 0.554 ~ 6.177이며, 지하수 흐름방향성 또한 지하수 등수위선과 유사하게 나타나고 있어 유동해석의 신뢰도를 향상시켰다.

6) 제주도 전역의 지하수 유동모의 결과로부터 수리전도도 분포를 분석한 결과, 해안지역은 100m/d이상, 상류지역은 1 ~ 45m/d로 나타났다. 특히, 동부지역 저지대에서는 500m/d이상의 수리전도도를 보였으며, 북부와 남부 일부지역에서는 비교적 높게 나타나고 있다. 이러한 특성은 지하수 등수위선 분포와 부존형태 등과의 관련이 있는 것으로 나타났다.

제주지역은 기후변화와 이상기후로 인해 수자원 특성이 급변하고 있어 미래 기후변화에 대비한 지하수 자원의 분석·예측에 관한 연구는 필수적이다. 이러한 연구결과들은 지하수 유동모델 분석의 기초자료 검정과 신뢰도를 향상시킬 수 있는 방안이 되며, 제주도 지하수의 개발·이용과 관리정책 등을 수립하는데 기초자료로 활용될 수 있다. 특히, 지하수 수리학적인 특성에 따른 지하수 유역설정과 유동해석 모델의 분석과 검증방법 등은 지하수위 관측 결과를 기반으로 하고 있어 보다 넓은 지역으로 관측망의 확대·조사가 필요하며, 지속적·정기적 데이터 구축으로 보다 개선된 연구가 진행되어야 한다.

## 참고문헌

- 강동환, 양성일, 김태영, 박현주, 권병혁, 2008, 제주도 지역의 해안선에서 이격거리  
에 따른 지하수위 변동특성, 대한지질공학회지, Vol.18, No.2, 157-166.
- 고건, 2005, 제주도 지하수의 개발과 원상복구기술에 관한 연구, 제주대학교 대학원  
석사학위 논문.
- 고기원, 1991, 제주도 서귀포층의 지하분포 상태와 지하수와의 관계, 지질학회지, 제  
27권, 제5호, 552.
- 고기원, 1997, 제주도의 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성, 부산  
대학교 박사학위논문.
- 고기원, 강봉래, 문덕철, 2006, 제주도의 수문지질과 지하수 관리제도, 제주·하와이  
물포럼, pp. 134-166.
- 고기원, 박윤석, 박원배, 문덕철, 2003, 제주도 동부지역의 수문지질에 관한 연구  
(Ⅱ), 한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회, 67-72.
- 고병련, 1985, 濟州島의 地下水 賦存形態와 地下水位 변동에 관한 研究, 건국대학교  
산업대학원, 학술저널, 26, 205-230.
- 고재욱, 2016, 제주도 중서귀유역의 관측자료 기반 지표수-지하수 유동특성 해석,  
제주대학교 박사학위 논문.
- 김남원, 정일문, 나한나, 2013, 제주 천미천 유역의 간헐하천 유출특성 모의 방안,  
한국환경과학회지, 22(5), 523-531.
- 김남원, 정일문, 원유승, 2006, 완전연동형 SWAT-MODFLOW 모형을 이용한 지표  
수-지하수 통합 유출모의, 대한토목학회지, Vol.26, No.5, 481-488.
- 김남원, 정일문, 유상연, 이정우, 양성기, 2009, 제주 지역 지표수-지하수 연계 해석,  
한국환경과학회지 18(9), 1017-1026.
- 김민철, 양성기, 오승태, 2015, 제주도 성산유역의 저투수층 구조에 따른 지하수 흐  
름 분석, 한국환경과학회, 24(3), 353-358.
- 김민철, 양성기, 이준호, 이광배, 2016, 수리전도도 적용방법에 따른 제주도의 지하  
수 흐름특성, 한국환경과학회 학술발표회, Vol. 25, 163.
- 김봉상, 함세영, 이충모, 옥순일, 차은지, 고영실, 2011, 제주도 화산암의 광역정 수리  
지질과 지하수 분포 특성, 지질학회지, 제47권, 제3호, 263-276.

- 김석우, 2007, 기초통계학, 학지사, 96-127.
- 김수민, 이상일, 김병찬, 2004, 지표수-지하수를 연계한 수자원의 효율적 이용-(II) 적용, 한국수자원학회 논문집, Vol.37, No.10, 799-812.
- 김영기, 1976, 반야월층(半夜月層)의 지하수운동(地下水運動)에 관(關)한 연구(研究), 대한자원환경지질학회, 9권 4호, 225-240.
- 김재광, 2001, 지하수 유동시스템 해석을 위한 유한요소법의 적용에 관한 연구, 경 일대학교 산업대학원 석사학위 논문.
- 김현수, 2011, 물 용어사전.
- 박원배, 강봉래, 2017, 제주지역의 가뭄 발생 특성과 중장기 대응방안, 제주연구원, 정책이슈브리프, Vol. 271.
- 박원배, 김기표, 이준호, 문덕철, 김수정, 고기원, 방성준, 방익찬, 2011, 제주도 지하 수위의 변화와 지하수 함양부피, 한국환경화과학회지, 제20권, 제7호, 857-872.
- 박원배, 양성기, 고기원, 1994, 제주도 지하수의 수위변동에 관한 연구, 한국환경과 학회지, 제3권 제4호, 333-348.
- 박준경, 박영진, 위용곤, 이상호, 홍창수, 추석연, 2002, Kriging 기법을 이용한 지하 수위 분포 추정, 터널기술학회지, 제4권, 제3호, 217-227.
- 박정식, 윤영선, 박래수, 2012, 현대통계학 제 5판, 332-339.
- 박재규, 김민철, 양성기, 이준호, 김용석, 2016, 제주도 대정유역의 수리전도도 적용 에 따른 지하수 모델링 결과 평가, 한국환경과학회지, 25(12).
- 배상근, 1992, 大邱地域 地下水流動系の 變動, 계명대학교 산업기술 연구소, Vol.15-2, 73-86.
- 성태재, 2011, 현대 기초통계학-이해와 적용(6판), 25-27.
- 송성호, 안중기, 이규상, 2015, 유출특성을 고려한 산지지역의 물수지 평가-제주도 표선유역을 중심으로, 한국환경과학회지, Vol.24, No.4, 505-514.
- 송성호, 이규상, 안중기, 전선금, 이명재, 제주도 표선유역의 물수지 평가를 위한 지 하수 유동 모델링, 한국환경과학회지, Vol.24, No.4, 495-504.
- 송성호, 최광준, 김진성, 2012, 변동유형 분석법을 이용한 제주도 지하수위 관측자료 평가, 한국환경과학회 정기학술발표회 논문집, 21, 377-378.
- 송성호, 최광준, 김진성, 2013, 시계열 자료를 이용한 제주도 지하수위의 지역별 특 성 분석, 한국환경과학회, 22(5), 609-623.

- 안승섭, 박동일, 오영훈, 2013, 지하수 양수량에 따른 지하수유동 및 포획구간 특성 변화, 한국환경과학회, Vol.22, No.7, 895-903.
- 안승섭, 박동일, 고병련, 오영훈, 2016, 공동크리깅기법을 이용한 제주도 지하수위 분포 분석, 한국환경과학회 정기학술대회, Vol 25, 171.
- 안종성, 김재성, 동위원소를 이용한 지표수와 지하수의 상호관계연구, 한국토양비료 학회 학술발표회, Vol.1982, No.29, 21.
- 오영훈, 박동일, 고병련, 2016, 크리깅기법을 이용한 지하수위 분포추정, 한국수처리 학회지, Vol.24, No.6, 137-148.
- 용재경, 2003, 변동 유한 요소법을 이용한 부정류 상태의 지하수 유동 모델 개발, 경일대학교 산업대학원 석사학위 논문.
- 원유승, 2007, 지표수와 지하수를 연계한 장기 강우-유출 모형의 개발, 아주대학교 일반대학원 박사학위 논문.
- 원제무, 이수일, 2007, SPSS를 활용한 그림으로 쉽게 배우는 통계분석, 55-66.
- 윤상용, 조운주, 이진용, 2009, 양구 해안분지에서 지하수위 변동과 하천유출을 이용한 지하수 함양율 추정 비교, 대한지질학회지, 45(4), 391-404.
- 윤선, 고기원, 박원배, 1994, 제주도 서귀포층의 지하분포상태와 지하수 부존특성과의 관계, 지하수자원의 농업용수 활용방안과 수질보전에 관한 학술심포지엄, 97-132.
- 이강원, 손호웅, 2016, 지형 공간정보체계 용어사전, 구미서관.
- 이남훈, 2010, 도서지역의 지하수 유동특성에 관한 연구 : 지하수 함양특성을 중심으로, 경일대학교 석사학위 논문.
- 이병대, 2001, 영천댐 도수로터널 굴착과 관련된 수리지질학적 특성연구, 부산대학교 박사학위논문.
- 이병철, 화산도서유역에서의 수치모형을 이용한 지하수 유동해석, 경일대학교 박사학위논문.
- 이상일, 김병찬, 김수민, 2004, 지표수-지하수를 연계한 수자원의 효율적 이용 1 : 방법론, 한국수자원학회 논문집, Vol.37, No.10, 789-798.
- 이상일, 이상일, 김병찬, 2004, 지표수-지하수를 연계한 수자원의 효율적 이용 2 : 적용, 한국수자원학회 논문집, Vol.37, No.10, 799-812.
- 이상일, 이상신, 2004, 지표수-지하수 연계 이용을 위한 적지분석 시스템 개발, 한국



- 수자원학회 학술발표회 논문집, Vol.2004, No.1, 878-882.
- 이용두, 함진규, 2000, 제주도 중산간 지역의 지하수위 변동 특성, 환경연구논문집, 제8권, 101-114.
- 정도준, 2008, 화산도서 지역에서의 지하수 유동특성에 관한 연구, 경일대학교 석사학위 논문.
- 정복선, 2003, MODFLOW Program을 이용한 터널 굴착 시 발생하는 지하수 유동 체계 변화 분석, 공주대학교 석사학위논문.
- 정상용, 심병완, 강동환, 김병우, 박희영, 원종호, 김규범, 2001, 크리깅에 의한 장기 관측 지하수위 결측자료 보완, 지질학회지, 37(3), 421-430.
- 정상용, 유인걸, 윤명재, 권해우, 허선희, 1999, 불균질, 이방성 대수층의 지하수 유동 분석에 지구통계기법의 응용, 대한지질공학회지, 9(2), 147-159.
- 정수일, 2003, MODFLOW 모형을 이용한 지표수와 지하수사이의 유동에 관한 연구, 경일대학교 대학원 석사학위 논문.
- 정우열, 2013, 제주도 하천 관측자료 기반 유출특성 매개변수 도출 및 홍수유출량 산정, 제주대학교 박사학위논문.
- 정우열, 양성기, 2009, SWAT 모형을 이용한 제주도 하천의 유출량 모의, 한국환경과학회지 18(9).
- 정일문, 이정우, 김지태, 김남원, 2016, 제주도 강수량변화에 따른 지하수위 예측, 대한토목학회 학술대회, 154-155.
- 정일문, 이정우, 장선우, 2016, 인공신경망 모형을 이용한 제주 지하수위의 장기예측, 대한토목학회논문집, 37(6), 981-987.
- 조병욱, 2001, 부산지역 지하수의 수리지질학적 특성, 경북대학교 박사학위논문.
- 진기욱, 양성기, 2011, 제주도 중산간지대 지하수의 부존특성, 해양과환경연구논문집, 제25권, 31-39.
- 진기욱, 양성기, 2011, 제주도 중산간지대 지하수의 수리특성, 해양과환경연구논문집, 제25권, 41-53.
- 최경창, 2010, 도서지역 해안 저지대의 지형특성에 따른 지하수 유동 특성, 경일대학교 박사학위논문.
- 최병수, 1999, 제주도 지하수의 우물 비양수량자료를 이용한 대수층상수 결정방법, 한국지하수토양환경학회, Vol.6, NO.4, 180-187.

- 최승배 · 문승호 · 강창완 · 조장식 · 이정형, 2008, SAS/STAT를 이용한 공간예측, 자유아카데미.
- 최정현, 2008, 지하수 양수량 변화에 따른 자유지하수위 거동에 대한 연구, 수원대학교 석사학위 논문.
- 제주도, 2003, 제주도 수문지질 및 지하수자원종합조사(Ⅲ).
- 제주특별자치도, 2013, 제주특별자치도 수자원관리종합계획(2013-2022).
- 제주특별자치도, 2014, 지하수조사연보.
- 제주특별자치도, 제주연구원, 2017, 제주의 물.
- 한국자원연구소, 2000, 1:250,000 제주(백아도, 진남포) 지질도폭 설명서.
- 한정상, 1999, 지하수 환경과 오염.
- Chiles, J. P., and Delfiner, P., 1999, Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty.
- Davis, B. M., 1987, Eses and Abises od Cross-Validation in Geostatistics, *Mathematical Geology*, 19(3), 241-248.
- Dreher, J., and Gunathilaka, A., 1996, Groundwater management in the city of Vienna. Modeling testing & monitorring for hydropower plants-II, *Int. Journal of Hydropower & Dams*, 2, 545-554.
- Franke, O.L. and Reilly, T.E., 1987, The effects of boundary conditions on the steady-state response of three hypothetical ground-water systems-Results and implications of numerical experiments.
- Franke, O.L., Reilly, T.E., and Bennett, G.D., 1987, Definition of boundary and initial conditions in the analysis of saturated ground-water flow systems - An introduction.
- 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, 623-634.
- Gribov. A., and K. Krivoruchko., 2012, New Flexible Non-parametric Data Transformation for Trans-Gaussian Kriging, *Quantitative Geology and Geostatistics*, (17), 51-65.
- 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.
- Journel, A.G, and Huijbregts, CH.J., 1978, Mining geostatistics Academic Press, 600.
- King Hubbert M., 1940, Theory of Ground-water Motion, The journal of Geology, 48(8), 785-944.
- McDonald, Michael, G., Harbaugh, Arlen, W., 1988, A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey.
- Samper, F. J., 1986, Statistical Methods of Analyzing Hydrological, Hydrochemical, and Isotopic Data fro, Aquifers, Ph. D. Dissertation, Dept. of Hydrology and water Resources, University of arizona, Tucson.
- Solow, A. R., 1990, Geostatistical Cross-Validation: A Cautionary Note, Mathematical Geology, 22(6), 637-639.
- Shepard, D, 1968, A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data, Proceedings of the 1968 ACM National Conference, 517-524.
- Toth, J., 1963, A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins, Journal of Geology.
- USGS, 1988, Basic Ground-Water Hydrology.
- Webster, R., and Oliver, M. A, 2001, Geostatistics for environmental scientists, statistics in practice. Wiley, Chichester, 265.
- 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.
- Aquaveo, 2015, MODFLOW-USG, Manual.
- <http://211.184.196.131>
- <http://www.candh.co.kr>
- <http://www.geography.hunter.cuny.edu>
- <http://www.gisresources.com>
- <https://www.gims.go.kr/>
- <http://www.water.or.kr>