

ORIGINAL ARTICLE

지하수 개발 및 양수기간에 따른 수위 변동특성 분석

김민철 · 양성기* · 이준호

제주대학교 토목공학과

Analysis of Water Level Fluctuations according to Groundwater Development and Pumping Duration

Min-Chul Kim, Sung-Kee Yang*, Jun-ho Lee

Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

Abstract

This study analyzed fluctuations of ground water level of ground water wells developed in Seongsan watershed of Jeju Island until 2013 using MODFLOW, a numerical analysis model. Ground water level shows greater fluctuations from increase of pump capacity compared to the number of ground water wells. The development of ground water at the top of watershed was found to have direct influence on ground water level. Ground water wells developed until 2013 were used to continue pumping for 50 days, and ground water level of coastal region was reduced below 50% compared to the standard water level. In addition, the range of fluctuation of water level was large in the east coast region, which represents the direction of flow of ground water.

Key words : MODFLOW, Ground water level, Continued pumping, Seongsan watershed

1. 서론

제주도는 대부분 하천이 건천 형태로 유지되고 있어 지표수를 활용한 수자원 확보는 매우 어려운 실정이다 (Jung and Yang, 2013). 그러나 함양률이 높은 지질특성으로 인해 지하수자원이 풍부하게 확보되고 있어 제주 지역의 주요 수자원은 지하수로 이용되고 있다.

기후변화에 따라 제주지역의 연평균 강우량은 매년 증가하고 있으나 강우일수는 줄고 있어 집중호우 및 가뭄재해에 대한 피해가 우려되고 있다(Lee et al., 2015). 특히 제주지역의 지하수는 기후변화인자의 변동성에 매우 취약하므로 대수층으로부터 지하수를 지속적으로 양

수하면 지하수위 하강과 함께 해수침투 및 지하수 고갈 등 다양한 문제가 발생할 수도 있다(Jeju Development Institute, 2012; Song and Choi, 2012).

최근 관광산업의 활성화와 도시화로 인해 용수수요가 매년 증가하고 있으며, 안정적인 용수 확보를 위한 지하수 개발은 지속적으로 진행되고 있다. 그러나 신규 지하수 개발 시에는 시설관정의 양수가능량을 정확하게 고려하여야만 한다. 제주지역 지하수의 지속이용가능량(sustainable yield)은 1993년 수자원종합개발계획 수립 시 처음으로 도입되어 적정량을 산정하고, 10년 주기로 재평가 하여 수립되고 있다. 실제 지하수 이용량은 허가량의 30% 이하로 지속이용가능량에 비해 비교적 낮은

Received 20 October, 2015; Revised 19 January, 2016;

Accepted 20 January, 2016

*Corresponding author : Sung-Kee Yang, Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea
Phone: +82-64-754-3451
E-mail: skyang@jeju.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이용률을 보이고 있다(Jeju Special Self-Governing Province, 2013a). 그러나 극심한 가뭄재해 발생 시 지하수 함양량은 급격하게 감소하는 반면 농업용수 및 생활용수 등 용수사용량의 급증으로 지하수 이용가능량의 한계를 넘어설 수도 있다. 따라서 극한 가뭄사상에 따른 지하수 영향 평가는 정량적으로 연구되어야 하며 체계적인 지하수 개발·이용 및 관리가 필요하다.

제주의 지하수는 지질, 환경, 기상 등 여러 가지 환경적 요소에 급격하게 변동되는 독특한 특성을 가지고 있어 많은 연구자들에 의해 다양한 연구가 진행되어 왔다. 최근 Song et al.(2014)은 강수량 자료와 지하수 관측망 수위자료를 비교하여 여름철 강수량 감소에 따른 가뭄발생은 권역별 지하수계에 직접적인 영향이 발생하는 것으로 제시한 바 있다. Park et al.(2013)은 담수와 염수 지하수 개발이 해수침투에 미치는 영향을 평가하였으며, 염지하수의 개발은 해수침투 면적 감소, 해수빼기의 두께감소 등 긍정적 영향과 지하수위를 낮추는 부정적 영향이 함께 나타나는 것으로 제시하였다. 또한 Kang et al.(2008)은 제주지역 풍수기와 갈수기에 관측된 지하수위 자료를 이용하여 이격거리에 따른 수위변화특성을 제시하였으며, Ahn et al.(2013)은 지하수 수치해석모형을 이용하여 지하수 양수량에 따른 지하수 유동 및 포획구간을 분석하였고, Kim et al.(2009, 2013, 2015b)은 지표의 장기유출 해석모형과 지하수 해석모형을 적용하여 제주지역의 통합 물수지 분석을 수행 한 바 있다. 제주도

의 지하수 개발은 지속적으로 증가하고 있어 지하수분포 및 양수능력을 고려한 지하수위 변동의 평가는 필요하며, 극한상황에 대비한 지하수위의 변동예측은 지하수관리에 매우 중요하다.

이 연구는 제주도 성산유역의 2013년까지 연도별 지하수 개발량을 파악하고 관정의 양수능력을 고려한 지하수위의 변동특성을 분석하였다. 또한 기후변화에 의한 가뭄사상에 따른 지하수 흐름의 분포특성을 재현하기 위하여 2013년까지 개발된 지하수 관정을 적용하여 양수 지속기간에 따른 수위변동의 특성을 분석하였다.

2. 연구방법

2.1. 대상유역

연구대상 지역은 제주도 16개의 소유역 중 성산유역으로 연구대상지역이 위치한 제주도 동부지역은 4개의 기상대 기준 30년 평균 강수량이 1,966.8 mm로 가장 많은 강수율을 보이고, 풍갈수기의 지하수위 변동폭은 제주지역에서 가장 낮은 특성을 보인다(Jeju Special Self-Governing Province, 2013a). 유역의 면적은 114.9 km², 표고분포는 0~355 m로 해안저지대 및 중산간 지대로 구분되며, 0~200 m의 해안저지대 지역이 94.67%로 대부분 농경지로 활용되고 있다. 경사도는 0~4°구간이 95.64 km²로 유역의 83.24%를 차지하고 대부분 평탄한 지형경사를 보이는 것으로 조사되었다(Table 1). 성

Table 1. Altitude and slope analysis of Seongsan watershed

Elevation(m)	area(km ²)	ratio(%)	Slope(°)	area(km ²)	ratio(%)
0 - 50	42.30	36.82	0 - 4	95.64	83.24
50 - 100	28.68	24.96	4 - 8	12.40	10.80
100 - 150	26.39	22.97	8 - 12	2.55	2.22
150 - 200	11.40	9.92	12 - 16	1.41	1.22
200 - 250	4.98	4.33	16 - 20	0.95	0.83
250 - 300	0.95	0.82	20 - 24	0.81	0.71
300 - 350	0.19	0.17	24 - 28	0.59	0.51
350 - 400	0.01	0.01	28 - 32	0.26	0.22
total	114.90	100.00	over 32	0.29	0.25
			total	114.90	100.00

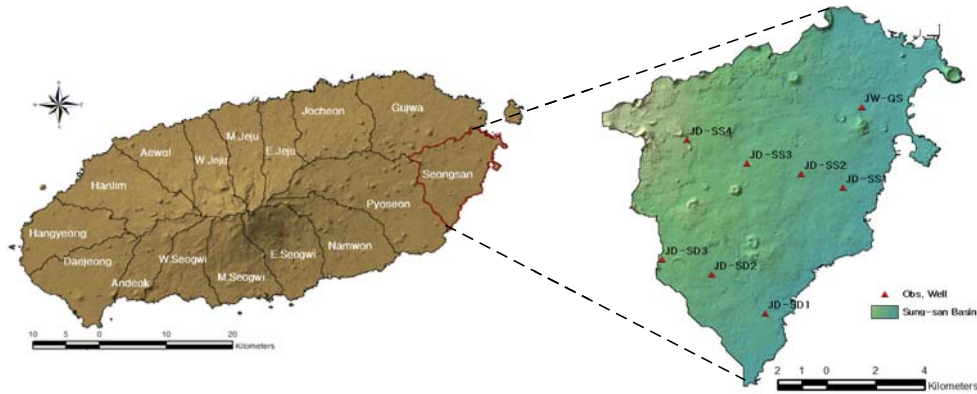


Fig. 1. Groundwater observation point in Seongsan watershed.

산유역은 유역특성상 비포화대가 얇아 강우에 따른 지하수위 변동은 빠르게 나타나지만 저투수층이 깊게 분포하고 있어 포화대는 매우 두꺼운 특성을 보이고 있다(Kim, 2011; Jeju Development Institute, 2012).

본 연구대상지역인 성산유역에는 제주특별자치도 수자원본부에서 운영·관리하고 있는 지하수 관측정 8개소(JW-GS, JD-SS1~SS4, JD-SD1~SD3)가 일정하게 위치하고 있어, 유역 내 지하수위 파악이 비교적 용이한 유역이다(Fig. 1).

2.2. 지하수 개발현황

제주도는 2013년 말 4,824개소(염지하수, 조사관측공 제외)의 지하수관정이 개발되었으며 생활용, 농업용, 공업용, 먹는샘물 제조용으로 구분되어 이용되고 있다(Jeju Special Self-Governing Province, 2013b). 전체 지하수관정 중 농업용 지하수관정은 67.7%로 높은 비중

을 차지하고 있으나(Table 2) 대부분 소규모 관정이 주를 이루고 있다(Fig. 2).

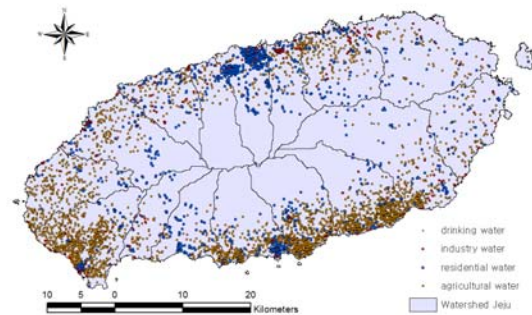


Fig. 2. Distribution of groundwater system in Jeju Island.

성산유역 내 개발된 지하수 관정은 총 120개소로 2003년까지 지하수 개발은 활발히 진행되었고, 2003~

Table 2. Status of groundwater development in Jeju Island

(Unit: point. m³/day)

Classification		residential water	agricultural water	industry water	drinking water	total
Groundwater development	number	1,380	3,266	171	7	4,824
	ratio(%)	28.61	67.70	3.54	0.15	100.00
Pumping ability	pumping ability	553,000	874,000	26,000	4,000	1,457,000
	ratio(%)	37.95	59.99	1.78	0.28	100.00

※ 염지하수, 조사관측공 제외

Table 3. Status of groundwater development in Seongsan watershed

(Unit: point. m³/day)

Year	residential water	agricultural water	industry water	total	
~1993	17	29	9	55	
Groundwater tube well	1993~2003	6	47	0	53
	2003~2013	2	8	2	12
	total	25	84	11	120
Pumping ability	~1993	9,191	6,982	1,587	17,760
	1993~2003	3,180	21,865	0	25,045
	2003~2013	475	5,960	200	6,635
	total	12,846	34,807	1,787	49,440

2013년까지 개발된 관정은 12개소로 과거에 비해 개발률은 감소되었다. 유역 내 총 양수능력은 49,440 m³/day이며, 농업용 관정이 34,807 m³/day로 전체 대비 70% 이상을 차지하고 있다(Table 3).

1993년 이전 개발된 지하수 관정은 55개소로 총 양수능력은 17,760 m³/day로 조사되었다. 200 m³/day 이하의 소규모 지하수 관정은 37개소로 주로 해안지역에 위치하고, 대규모 관정은 공공용 지하수로 유역 상류에 위치하며, 농업용 29개소, 생활용 17개소, 공업용 9개소가 개발되었다(Fig. 3(a)).

1993년~2003년 개발된 지하수관정은 대부분 200 m³/day 이상의 공공용 지하수 관정으로 총 53개소, 양수능력 25,045 m³/day의 규모로 파악되었다. 2003년까지

의 지하수 개발 관정은 1993년 이전에 비해 약 2배 증가되었으나, 양수능력은 2.4배 증가되어 관정 수 대비 용수 공급량이 크게 증가된 것으로 확인되었다(Fig. 3(b)).

2003~2013년의 지하수 개발은 총 12개소로 2003년까지의 개발특성에 비해 현저히 감소되고, 시설관정이 밀집된 하류부 보다는 상류부지역에 개발되었으며, 개발에 따른 양수능력 증가량은 6,635 m³/day이다(Fig. 3(c)).

개발연도에 따른 관정별 평균 양수능력은 1993년 323 m³/day, 2003년 473 m³/day, 2013년 553 m³/day로 점차적으로 증가되는 양상을 보였다.

2.3. 정상류 상태의 지하수흐름

일반적으로 실제 자연현상은 매우 많은 불확실성이

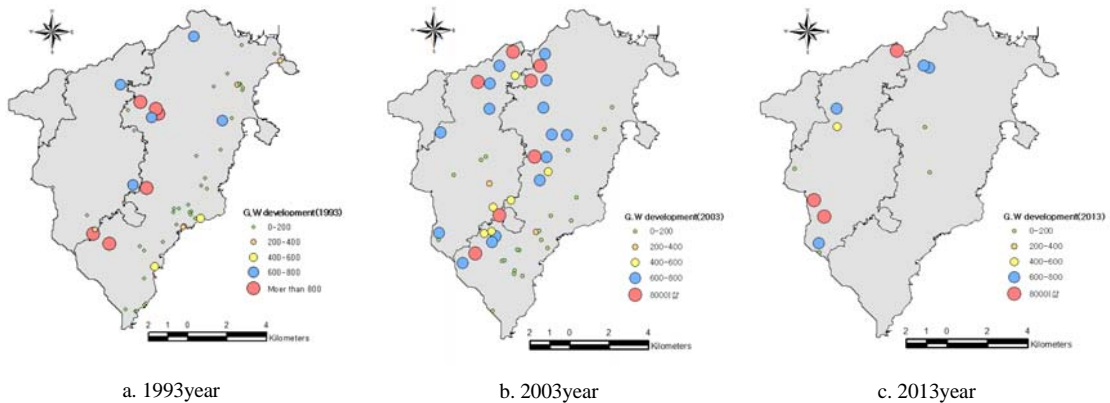


Fig. 3. Groundwater development in Seongsan watershed.

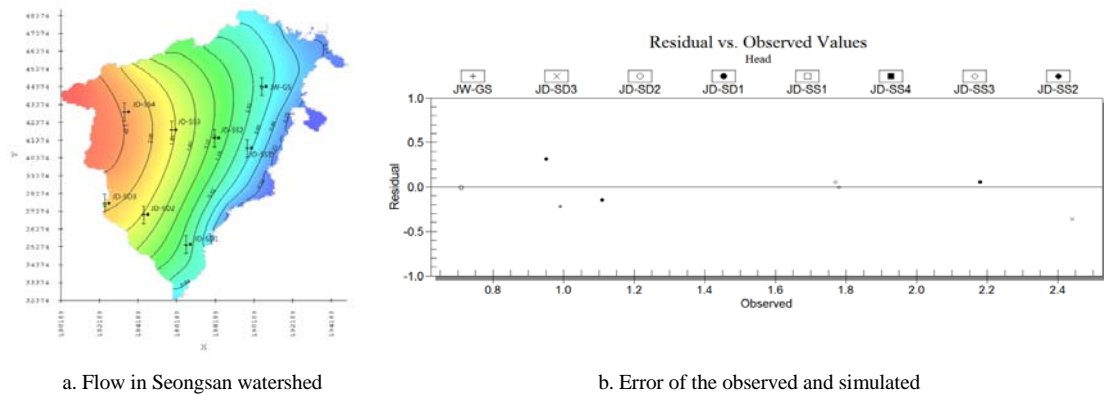


Fig. 4. Analysis to steady-state in Seongsan watershed (Kim, 2015).

내재되어 있어 정확히 묘사하는 것은 불가능하다. 복잡한 실제 현상을 모델로 재현하기 위해서는 단순한 가정을 사용할 수 없으며, 실제 상황과 근사하게 나타내기 위해서는 수치기법을 사용하여 계략적인 수학적 모델 (athemathical model)로 다루어야 한다(Han, 1999).

본 연구에서는 수리지질학적 구조를 보다 손쉽게 구현하여 해석할 수 있고, 과학적 타당성과 현장 적용성이 높아 지하수 전문 연구기관 및 미국지질조사국(USGS)에서 주로 사용되고 있는 MODFLOW(McDonald와 Harbaugh, 1988)를 적용하였다.

2.3.1. 정상류 상태의 모형구축

지하수위 변동 특성 분석을 위하여 Kim et al.(2015a)의 성산유역 정상상태모의에서 계산된 지하수위를 기준

으로 설정하였다. 모델구축 자료로는 지층, 함양량, 공극률, 수리전도도가 입력되었으며, 1층은 투수성이 양호한 현무암층, 2층은 투수성이 저조한 저투수층으로 1개의 자유면 대수층으로 설정하였다. 유역 내 격자망은 50×50 m, 대상유역을 제외한 지역은 비활성화 셀(inactive cells)로 구분하였다. 모델보정을 위한 관측수위는 제주 특별자치도 수자원본부에서 제공하는 2013년 전체 평균 수위를 산출하고, 모델에 적용하여 실제 지하수 흐름과 유사하도록 구축하였다.

성산유역의 지하수흐름은 한라산을 기준 유역의 동쪽 해안방향으로 진행되고(Fig. 4), 실제 2013년 평균지하수위와 계산된 지하수위의 오차는 -0.36~0.29 m(Table 4), R²와 RMSE는 각각 0.903과 0.195로 분석되었다.

Table 4. Comparison results between observation and computed water level

Observation wells	Observation head (EL.m)	Computed head (EL.m)	Residual head (m)
JW-GS	0.99	0.77	-0.22
JD-SS1	0.71	0.70	-0.01
JD-SS2	0.95	1.24	0.29
JD-SS3	1.77	1.83	0.06
JD-SS4	2.18	2.22	0.04
JD-SD1	1.11	0.96	-0.15
JD-SD2	1.78	1.76	-0.02
JD-SD3	2.44	2.08	-0.36

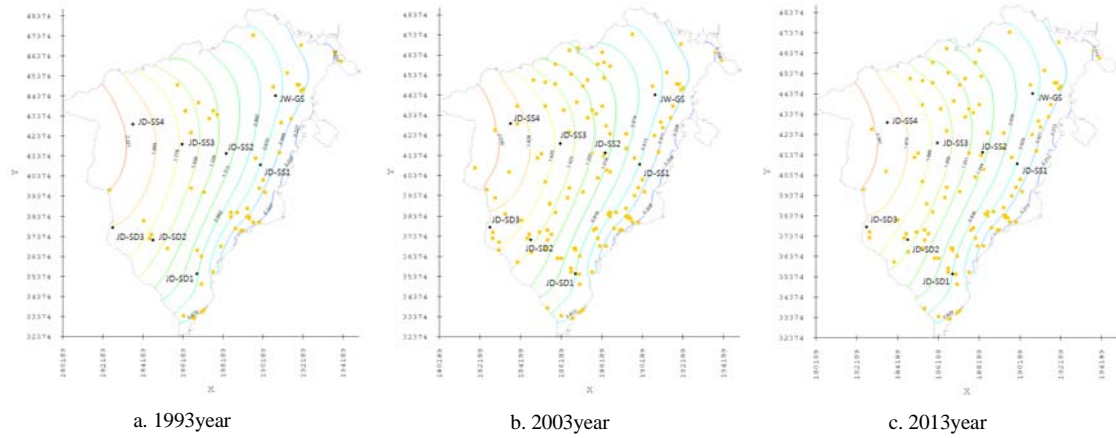


Fig. 5. Level variation according to groundwater development.

2.3.2. 지하수 개발에 따른 수위분석

전체 120공의 지하수관정 중 개발에 따른 지하수위 변화를 분석하기 위해 1993년, 2003년 2013년 개발 당시의 지하수관정을 적용하여 수위분석을 실시하였으며, 유역 내 지하수위를 정량적으로 비교하기 위하여 정류상태에서 계산된 관측정의 수위를 기준으로 분석하였다. 1993년 이전까지 개발된 지하수 관정은 총 55개소로 총 양수능력 17,760 m³/day, 2003년까지 개발된 지하수관정 108개소(총 양수능력 25,045 m³/day), 2013년까지 개발된 지하수관정 120개소(총 양수능력 49,440 m³/day)를 각각 적용하여 개발관정에 따른 수위특성을 분석하였다(Fig. 5).

2.4. 부정류상태의 지하수 흐름

2013년을 기준으로 성산유역에 개발된 120개소의 지하수관정과 양수능력을 적용하여 극한기름사상 시 동시

양수에 따른 지하수위 변동 분석을 실시하였다. 양수량은 각 관정별 최대치인 1일 양수능력을 양수기간에 따라 지속적으로 이용되는 것으로 양수기간은 50일까지 적용하였으며, 초기 지하수위는 정상류상태의 모형구축에서 산출된 결과를 기준수위로 적용하여 지하수밀집지역 및 유역 상·하류부의 지하수 흐름특성을 분석하였다.

부정류상태의 지하수 흐름을 해석하기 위해 수리전도도, 저류계수, 비산출률 등 다양한 수리지질학적 매개변수가 적용되지만, 취득할 수 있는 자료는 제한적이며, 정확한 매개변수의 산정은 매우 어렵다(Kim, 2015c). 제주지역은 화산활동에 의한 화산암질의 대수층으로, 투수성이 매우 좋아 수위하강에 따른 회복시간이 매우 짧은 특성을 보인다. 특히, 제주도의 대수층은 자유면대수층으로 물입자의 팽창과 대수층의 수축은 무시할 수 있으므로 저류계수는 비산출률과 동일한 0.1~0.3 의 범위에

Table 5. Hydrologic constant of subsoil for basalt

Rock	Aquifer	Storage Coefficient
Basalt	FOB	0.12
	FB	0.14
	PAB	0.17
	PFB	0.03
	OAB	0.10

*. 자료: 수문지질 및 지하수자원 종합조사(제주도, 2003)

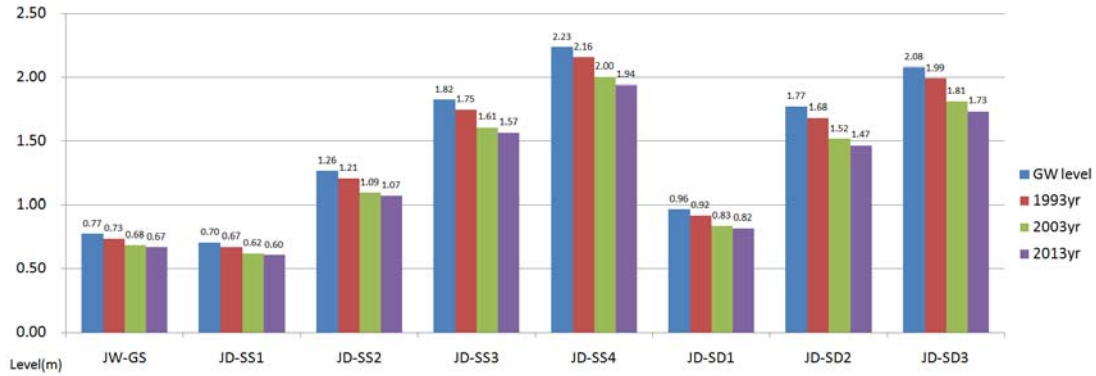


Fig. 6. Groundwater level variation graph (1993, 2003, 2013).

서 적용될 수 있다(USGS, 1998). 본 연구에 적용된 수리전도도는 Kim(2015a)에 의해 산출된 성산유역 수리전도도를 적용하였으며, 저류계수는 Jeju(2003)에서 제시된 결과를 인용하였다. 성산유역에 위치한 관측공의 주 대수층은 휘석암암석현무암 및 반상휘석현무암이 분포되는 것으로 파악되어 저류계수는 중간 값인 0.15를 적용하였다(Table 5).

3. 결과 및 고찰

3.1. 지하수 개발에 따른 수위변화

3.1.1. 1993년 이전 지하수 개발에 따른 수위변화
1993년까지 개발된 지하수관정 55개소의 양수능력

총 17,760 m³/day를 적용하여 분석한 결과 기준수위대비 0.03~0.09 m, 3.33~5.27% 하강하였으며, JD-SD2 관측정이 가장 큰 폭으로 하강하는 것으로 분석되었다(Fig. 6, Table 6). 이는 관측정과 지하수 개발관정의 이격거리가 타 관측정에 비해 상대적으로 가까운 거리에 위치하고, 근접거리에 위치한 지하수의 양수능력은 1000 m³/day이상의 대규모 관정으로 인근지역 지하수위가 가장 크게 변동된 것으로 분석되었다.

3.1.2. 2003년 이전 지하수 개발에 따른 수위변화
2003년까지 개발관정은 총 108개소로 1993년에 비해 53개소(1.9배)가 증가되었고, 양수능력은 1993년에 비해 약 2.4배 증가된 25,045 m³/day이다. 2003년까지

Table 6. Level drop according to groundwater development

(Unit: m)

Classification	standard level (EL.m)	drawdown of water level					
		1993year		2003year		2013year	
		level decrease	ratio(%)	level decrease	ratio(%)	level decrease	ratio(%)
JW-GS	0.77	0.04	4.58	0.09	11.27	0.10	13.22
JD-SS1	0.70	0.03	4.56	0.09	12.16	0.10	13.90
JD-SS2	1.26	0.06	4.63	0.17	13.43	0.19	15.40
JD-SS3	1.82	0.08	4.18	0.21	11.72	0.25	13.97
JD-SS4	2.23	0.07	3.33	0.23	10.28	0.29	12.95
JD-SD1	0.96	0.05	5.11	0.13	13.48	0.15	15.48
JD-SD2	1.77	0.09	5.27	0.26	14.43	0.31	17.27
JD-SD3	2.08	0.09	4.15	0.27	12.84	0.35	16.62

개발된 지하수관정 108개소의 총 양수능력 42,800 m³/day를 적용하여 분석한 결과 기준수위대비 0.09~0.27 m, 10.28~14.43% 하강되었으며, 1993년에 비해 약 2.4 배~3.1배 하강된 것으로 분석되었다(Fig. 6, Table 6). 이러한 결과는 관정 개수의 개념보다 사용량에 따른 영향이 크게 나타나는 것으로 1993년~2003년 사이에는 대규모 양수능력 관정이 많이 개발됨으로써 수위 하강률은 비교적 크게 나타난 것으로 분석되었다.

3.1.3. 2013년 이전 지하수 개발에 따른 수위변화

2013년까지 개발 관정은 총 120개소이며, 양수능력은 49,440 m³/day로 양수에 따른 수위분석결과 기준수위대비 0.10~0.35 m, 12.95~17.27% 하강되었다(Fig. 6, Table 6). 2003년부터 2013년까지 표고 65 m 이상 지역에서 지하수 개발이 되었으나, 해안지역의 관측정 JW-GS, JD-SS1, JD-SD1이 하강하는 것으로 분석되어 상류부에서의 지하수 이용은 해안지역 지하수위에 직접적인 영향이 나타나는 것으로 분석되었다.

3.2. 양수기간에 따른 수위변화

성산유역의 지하수 개발특성에 따라 양수초기 지하수 관정 밀집지역에 위치한 JD-SS2와 JD-SD1, SD2, SD3의 지하수위가 급격하게 하강되었으며, 지속적으로 양수함에 따라 상류지역(JD-SS3, SS4, SD3)에서 일정한 하강특성이 나타났다(Fig. 8).

양수기간 10일(누적 양수량 494,400 m³)을 적용한 결과 기준수위 대비 0.18~0.44 m, 17.14~25.99%의 수위

하강을 나타냈으며, 상류지역에 위치한 관측정의 수위 하강률이 크게 변동되었다. 특히 JD-SD2와 SD3관측정과 근접한 위치에 대규모 지하수관정이 밀집되어 수위변동 폭이 가장 크게 나타났으며, JD-SS4의 관측정은 0.38 m로 비교적 높은 하강특성이 나타났으나 기준수위가 높게 형성되어 하강률은 17.14%로 가장 낮게 분석되었다(Table 7). 10일 지속적인 양수에 따른 해안유출량은 3,322,924 m³으로 분석되었다.

양수기간 30일(누적 양수량 1,483,200 m³)의 경우 기준수위대비 0.29~0.65 m, 하강률은 26.09~42.81%로 분석되었다. 10일 동안 지속적으로 양수함에 따라 JD-SS1 관측정에서 가장 큰 하강률이 나타났으나, 30일 양수 후 하강률은 JW-GS 관측정에서 42.81%로 가장 크게 분석되었으며(Table 7), 30일 양수에 따른 해안유출량은 8,762,192 m³으로 분석되었다.

양수기간 50일(누적 양수량 2,472,000 m³)의 경우 기준수위대비 0.37~0.84 m, 하강률은 34.16~55.81%로 분석되었으며, JW-GS와 JD-SS1의 관측정이 기준수위 대비 50%이하로 수위가 하강되었다(Table 7). 또한 JD-SD1과 JD-SS2의 하강률도 각각 49.22%, 48.60%로 매우 큰 변동률을 나타냈다. 해안유출량은 13,293,119 m³으로 분석되었으며, 50일 기간 동안 총 외부유출량과 저류계수를 적용하여 모델을 검증한 결과 성산유역의 평균 수위하강률은 0.48 m로 분석되었다.

성산유역은 한라산을 기준하여 유역 동쪽지역으로 지

Table 7. Groundwater level variation according to continued pumping

(Unit: m)

Classification	drawdown of water level						
	standard level (EL.m)	10day		30day		50day	
		level decrease	ratio(%)	level decrease	ratio(%)	level decrease	ratio(%)
JW-GS	0.77	0.19	24.62	0.33	42.81	0.43	55.81
JD-SS1	0.70	0.18	25.99	0.29	41.65	0.37	53.03
JD-SS2	1.26	0.30	24.09	0.47	37.53	0.61	48.60
JD-SS3	1.82	0.34	18.78	0.54	29.76	0.72	39.63
JD-SS4	2.23	0.38	17.14	0.58	26.09	0.76	34.16
JD-SD1	0.96	0.23	24.34	0.37	38.85	0.47	49.22
JD-SD2	1.77	0.40	22.75	0.60	34.02	0.77	43.61
JD-SD3	2.08	0.44	21.06	0.65	31.17	0.84	40.31

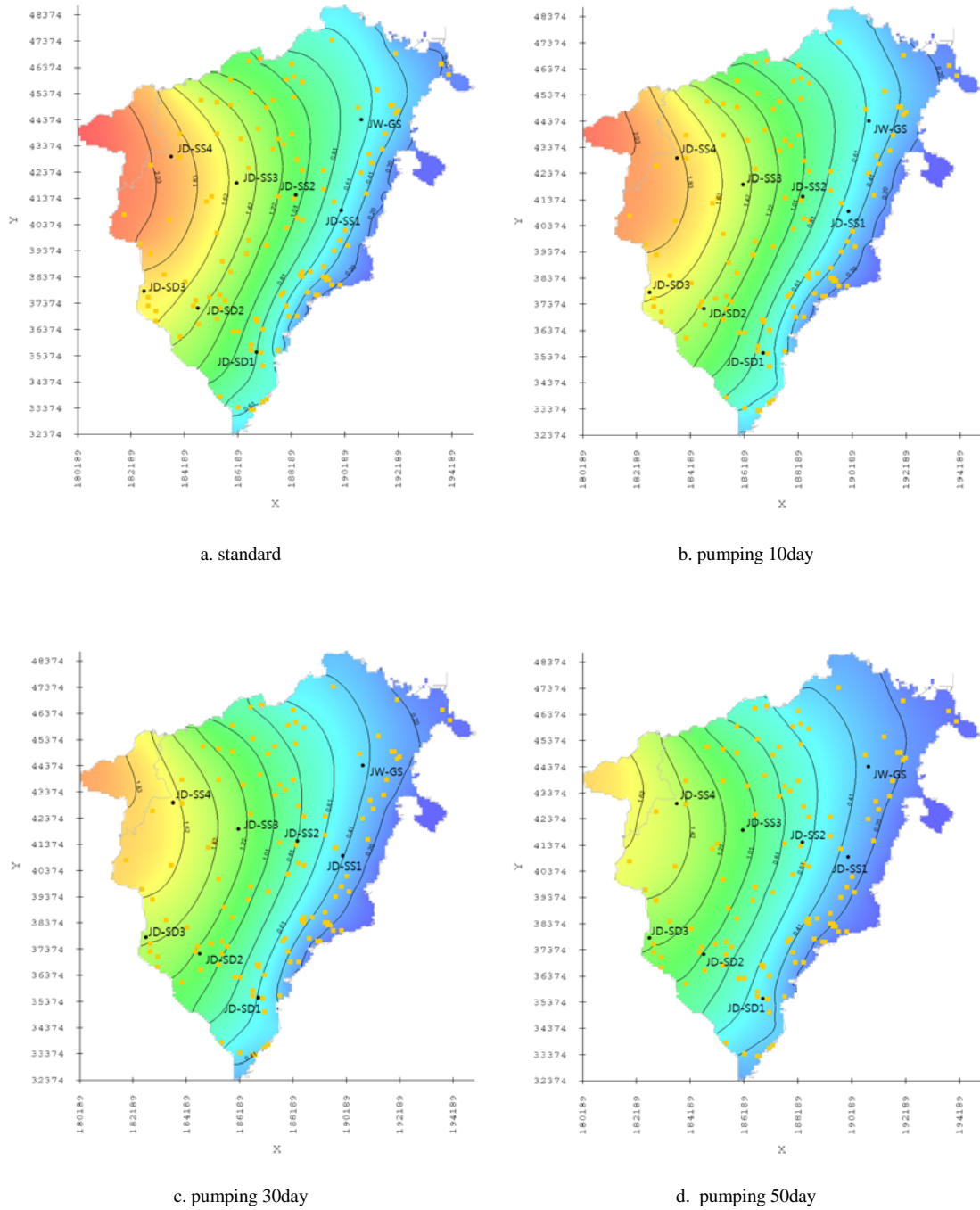


Fig. 7. Groundwater level variation according to the period.

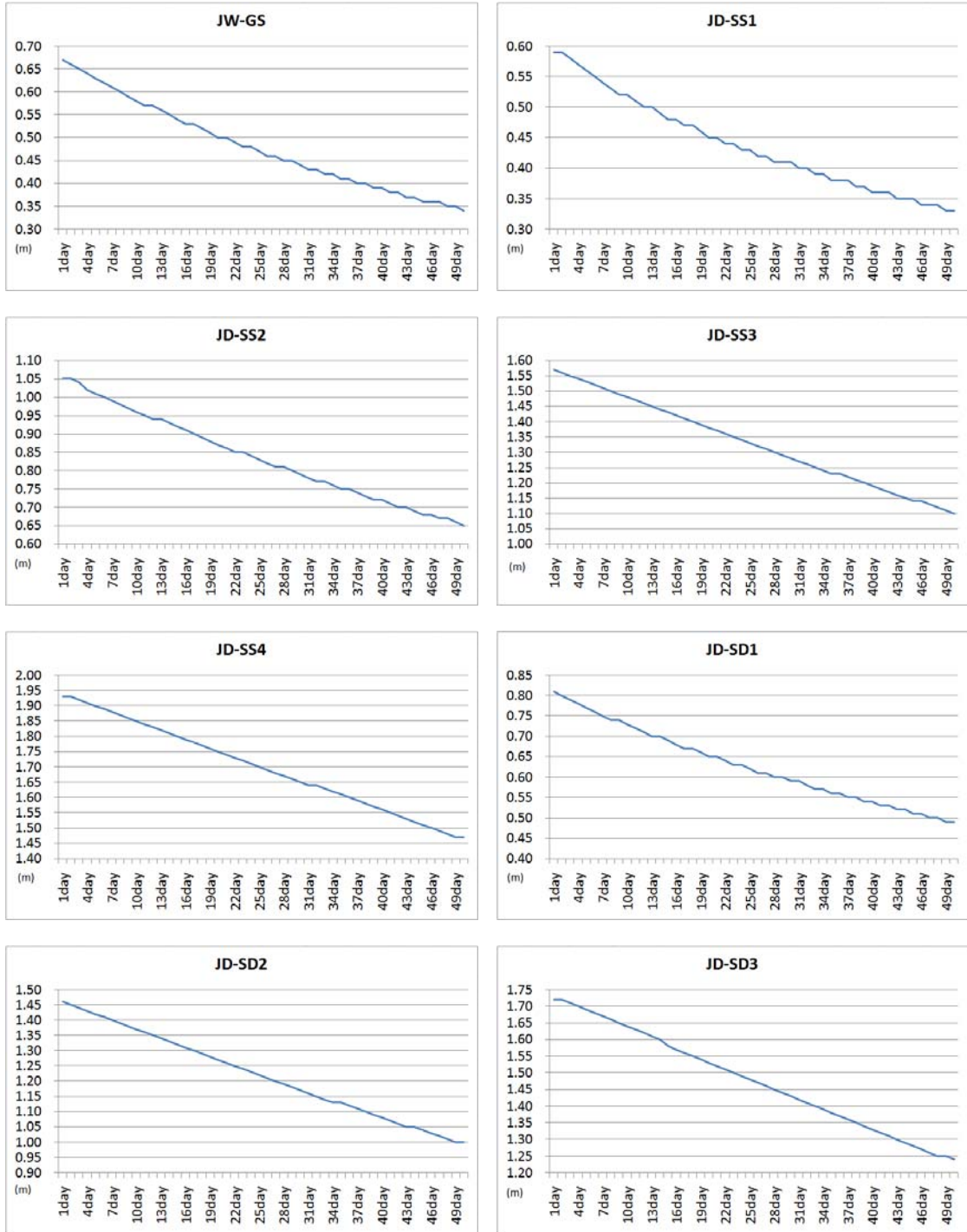


Fig. 8. Daily Groundwater level variation graph.

하수 흐름이 발생된다. 양수초기에는 지하수 관정 분포에 따라 급격한 하강특성을 보이지만 지속적인 양수함으로 써 지하수 흐름방향인 동쪽으로부터 하강률이 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 상부지역에 위치한 지하수 관측정 JD-SS3, JD-SS4, JD-SD3은 양수에 의한 지하수위 하강률이 크고, 하류지역에 위치한 JW-GS, JD-SS1, JD-SD1의 수위하강률은 작은 것으로 분석되었다. 제주도의 지하수위는 한라산에서 해안지역으로 진행될수록 지하수위는 점차 낮아지기 때문에 하류지역의 관측정은 기준수위가 낮아 상부지역에 위치한 관측정에 비해 하강률은 비교적 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

4. 결론

제주지역의 지하수관정은 지역별 지층 및 대수층 특성, 관정별 굴착깊이, 양수량 및 지하수위 등 각각 다르기 때문에 개별적 수리특성이 나타난다. 이러한 인자를 정확히 조사하여 지하수 유동 분석 및 수위예측 등이 수행되어야 하지만 현실적으로 공간적인 수리특성규명은 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 대표적으로 관측·조사된 지하수의 수리특성을 유역의 평균값으로 적용하였으며, 적용된 수리전도도는 실제 관측된 지하수위를 이용하여 산출하였고, 저류상수는 기존 자료를 참고하여 중앙값인 0.15를 적용하여 분석하였다.

제주도 성산유역의 2013년까지 연도별 지하수 개발량을 파악하고, 10년간 단위로 개발된 관정의 양수능력을 고려하여 지하수위의 변동특성을 분석하였다. 또한 기후변화에 의한 가뭄에 따른 지하수 흐름의 분포특성을 재현하기 위하여 2013년까지 개발된 지하수관정을 적용하여 양수지속기간에 따른 수위변동의 특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

- 성산유역의 해안지역은 소규모의 농업용관정, 상부지역은 대규모의 공공용관정으로 2003년 이전에는 지하수 개발이 활발히 진행되었으나 2003년 이후 지하수개발이 감소된 것으로 확인되었다. 지하수관정별 평균 양수능력은 점차적으로 증가하였다.

- 1993년까지 개발된 지하수관정을 적용하여 분석된 지하수위와 2003년까지 개발된 지하수관정을 적용하여 분석된 지하수위를 비교한 결과 개발된 지하수의 관정수보다 양수능력에 따라 수위하강이 크게 나타났다.

2003년부터 2013년까지 지하수개발은 유역의 상부에서 진행되었다. 그러나 해안지역의 지하수위가 하강하는 것으로 분석되어 유역 상부의 지하수 개발은 해안지역 지하수위에 직접적인 영향이 나타나는 것을 확인되었다.

- 지속적으로 양수함에 따라 상류지역에서 수위 하강률은 가장 크게 나타났지만 기준수위가 높게 형성되어 하강률은 비교적 작게 나타났다. 해안지역의 경우 50일 이상 양수 시 기준수위 대비 50%이하까지 크게 변동된 것으로 분석되었으며, 지속적인 양수에 따라 지하수 흐름방향인 유역의 동쪽해안지역으로부터 수위 하강률이 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

- 본 연구를 통해 지하수 관정의 양수량에 따라 지역적 지하수위 변화 크게 발생되고, 지속적인 양수에 따라 지하수 흐름방향으로부터 수위변화가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 본 연구에 적용된 매개변수는 대표적인 값을 유역전체에 평균적으로 적용한 결과로 공간적 분포를 명확하게 구현하기에는 한계가 있으며, 향후 지질특성과 관정별 수리특성이 정확히 규명되어 적용된다면 지하수 고갈 등 수자원 보전·관리에 대하여 구체화할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- Ahn, S. S., Park, D. I., Oh, Y. H., 2013, Characteristics of ground water capture zone according to pumping rate, *Journal of Environmental Sciences International*, 22(7), 895-903.
- Han, J. S., 1999, 3D groundwater model and application, Parkyoungsa.
- Jejudo, 2003, Comprehensive survey of hydrogeology and groundwater resources in Jeju Island(III).
- Jeju Development Institute, 2012, Jeju water, 50.
- Jeju Special Self-Governing Province, 2013a, Water resources management master plan.
- Jeju Special Self-Governing Province, 2013b, Ground-water survey yearbook.
- Jung, W. Y., Yang, S. K., 2009, Simulation on runoff of rivers in Jeju Island using SWAT model, *Journal of the Environmental Sciences*, 18(9), 1045-1055.
- Kang, D. H., Yang, S. I., Kim, T. Y., Park, H. J., Kwon, B. H., 2008, The variation characteristics of ground-water level with distance from shoreline in the Jeju

- Island, *Journal of Engineering Geology*, 18(2), 157-166.
- Kim, B. S., 2011, Study on hydrogeological characteristics of volcanic rocks in Jeju Island, Ph. D. Dissertation, Pusan National University, Korea.
- Kim, M. C., Yang, S. K., Oh, S. T., 2015a, Analysis on groundwater flow according to low permeable layer structure over Seongsan watershed of Jeju Island, *Journal of Environmental Sciences International*, 24(4), 449-459.
- Kim, N. W., Na, H. N., Chung, I. M., 2013, Simulation of groundwater variation characteristics of Hancheon watershed in Jeju Island using integrated hydrologic modeling, *Journal of Environmental Sciences International*, 22(5), 515-522.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Na, H. N., 2015b, An integrated water budget analysis of oedocheon watershed in Jeju Island, *Journal of Environmental Sciences International*, 24(4), 471-480.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Yoo, S. Y., Lee, J. W., Yang, S. K., 2009, Integrated surface-groundwater analysis in Jeju Island, *Journal of Environmental Sciences International*, 18(9), 1017-1026.
- Kim, N. W., Kim, Y. J., Chung, I. M., 2015c, Estimation of transmissivity using parameters of groundwater table fluctuation model, *Journal of Environmental Sciences International*, 24(4), 461-470.
- Lee, J. H., Yang, S. K., Jung, W. Y., Yang, W. S., 2015, Estimation of design rainfall based on climate change scenario in Jeju Island, *Journal of Environmental Sciences International*, 24(4), 383-391.
- McDonald, M. G., Harbaugh, A. W., 1988, A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model, *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey*.
- Park, N. S., Koh, B. R., Lim, Y. D., 2013, Impacts of fresh and saline groundwater development in Sungsan watershed, Jeju Island, *Journal of Korea water Resources Association*, 46(7), 783-794.
- Song, S. H., Choi, K. J., 2012, An appropriate utilization of agricultural water resources on Jeju Island with climate change(I), *J. Soil Groundwater Environ.*, 17(2), 62-70.
- Song, S. H., Lee, B. S., Choi, K. J., Kim, J. S., Kim, G. P., 2014, Evaluation of drought effect on groundwater system using groundwater level data in Jeju Island, *Journal of Environmental Sciences International*, 23(4), 637-647.
- USGU, 1998, Basic ground-water hydrology.