



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](#)

석사학위논문

제주도 어승생 수원지 주변 관정의
지하수위 변동 특성

제주대학교 대학원

환경공학과

김 지 명

2020년 8월

제주도 어승생 수원지 주변 관정의 지하수위 변동특성




지도교수 조 은 일

김 지 명

이 논문을 공학 석사학위 논문으로 제출함

2020 년 6월

김지명의 공학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장	<u>감 상 규</u>	
위 원	<u>김 진 근</u>	
위 원	<u>조 은 일</u>	

제주대학교 대학원

2020 년 6월

Characteristics of Groundwater Level Variation in Wells around Eoseungsaeng Reservoir, Jeju Island

Ji-Myung Kim
(Supervised by professor Eun-Il Cho)

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

2020. 6.

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, Sang-Kyu Kam. Prof. of Environmental Engineering

Thesis director, Jin-Keun Kim. Prof. of Environmental Engineering

Thesis director, Eun-Il Cho. Prof. of Environmental Engineering

June. 2020

Department of Environmental Engineering
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

Summary	v
I. 서론	1
II. 연구내용 및 방법	3
1. 연구지역	3
2. 연구방법	4
1) 지하수 산출특성 분석	4
2) 강수량 자료 분석	8
3) 지하수위 분석	8
III. 결과 및 고찰	11
1. 연구관정 수리특성 분석결과	11
1) 지질자료 분석결과	11
2) 대수층 수리특성 분석	15
2. 강수량 자료와 지하수위 자료 분석	23
1) 강수량 자료를 통한 강수량 특성	23
2) 지하수위 관측자료 분석	25
3. 지하수위 변동특성	30
1) 강수량에 따른 지하수위 변동	30
2) 양수량에 의한 지하수위 변동	38
IV. 결론	50
참 고 문 헌	52

List of Figures

Fig. 1. Study area and distribution of well sites with precipitation station.	3
Fig. 2. Cones of depression in unconfined aquifers.	5
Fig. 3. Schematic model showing hydrogeological structures of groundwater in Jeju Island.	9
Fig. 4. Geologic columnar section of OW, PW1 and PW2.	14
Fig. 5. Aquifer test analysis of OW, PW1 and PW2 calculated from Theis method (a, c, e) and Cooper-Jacob method (b, d, f).	17
Fig. 6. Aquifer test analysis of OW, PW1 and PW2 via Moench method.	19
Fig. 7. Comparison of transmissivity of wells between Moench method(*), and those ranges of reference and calculated from empirical formulas(bar). ·	20
Fig. 8. Comparison of storativity of wells between Moench method(*) and those ranges of values from reference(bar).	21
Fig. 9. Analysis of time-drawdown curve of OW calculated from Moench method in case of pumping at PW1 and PW2.	22
Fig. 10. Annual precipitation and number of raining days of Eorimok station (2008~2019).	24
Fig. 11. Monthly average precipitation of Eorimok station(2008~2019).	24
Fig. 12. Time-series groundwater hydrograph of OW well.	25
Fig. 13. Annual statistics of groundwater level OW well.	26
Fig. 14. Linear regression of groundwater level during (A).	28
Fig. 15. Linear regression of groundwater level during (B).	29
Fig. 16. Linear regression of groundwater level during (C).	29
Fig. 17. Normalized groundwater level and precipitation: (a) 2009; (b) 2012; (c) 2019.	33
Fig. 18. Cross-correlation between groundwater level and lag: (a) 2009; (b) 2012; (c) 2019.	34
Fig. 19. Correlation between cumulative precipitation and groundwater level	

(2008~2013).	36
Fig. 20. Groundwater level observed in OW with pumping quantity of OW, PW1, PW2 and precipitation.	39
Fig. 21. Groundwater level variation and pumping quantity(CASE-1).	41
Fig. 22. Relation between groundwater level according to cumulative pumping quantity when pumped at OW well(CASE-1).	42
Fig. 23. Groundwater level variation and pumping quantity(CASE-2a).	43
Fig. 24. Relation between groundwater level according to cumulative pumping quantity when pumped at PW1 and PW2(CASE-2a).	44
Fig. 25. Groundwater level variation and pumping quantity(CASE-2b).	45
Fig. 26. Relation between groundwater level according to cumulative pumping quantity when pumped at PW1 and PW2(CASE-2b).	46
Fig. 27. Groundwater level variation and pumping quantity(CASE-2c).	47
Fig. 28. Relation between groundwater level according to cumulative pumping quantity when pumped at PW1 and PW2(CASE-2c).	48
Fig. 29. Groundwater hydrograph of OW well when not pumped in all wells: (a)CASE-3a; (b)CASE-3b; (c)CASE-3c; (d)CASE-3d.	49

List of Table

Table 1. Information for wells OW, PW1 and PW2	4
Table 2. Major solution and formulas of aquifer test	7
Table 3. Hydraulic parameters calculated from each of pumping test OW, PW1 and PW2	15
Table 4. Transmissivity of OW, PW1 and PW calculated from empirical formula	18
Table 5. Transmissivity and storativity of OW, PW1 and PW2 calculated from Moench method	20
Table 6. Hydraulic parameters of OW when pumped at PW1 and PW2	22
Table 7. Statistics of OW well groundwater level	27
Table 8. Type of pumping, duration and variation of groundwater level	40

Summary

In this study, the hydraulic characteristics and groundwater variation characteristics due to precipitation and pumping for the wells (observation well (OW), pumping wells (PW1 and PW2)) located in Eoseungsaeng, Jeju Island, were investigated. The results of this study are summarized as follows:

From the geologic columnar section of study wells, it was difficult to find the similarity of aquifers even though the distance among the wells was only in the range from 127.7 to 233.2 m, together with different geologic characteristics. Comparing groundwater level drawdown between single pumping (OW) and simultaneous pumping (OW, PW1, PW2), it was 2 to 19 times greater for the latter, indicating the groundwater level variation characteristics due to the pumping of groundwater, i.e., it means that the effect of the pumping in the downstream areas appears, even if individual hydraulic characteristics are shown between the wells.

Cross Correlation analysis of precipitation and groundwater levels showed a low correlation of -0.4 to 0.3 m in all observation periods, with a lag time of 258 to 279 days when its correlation was the highest.

In case of single groundwater pumping at OW, the groundwater level dropped by 0.0626 m/day, and in case of simultaneously pumped OW, PW1, and PW2, it dropped by 0.1303 to 1.212 m/day. According to the analysis of the correlation between the cumulated amount of pumping and the groundwater level, the transmissivity was in the range of 0.88~0.99 m²/day, and the effect of the ground water drawdown was significant due to the groundwater pumping.

As a result of analyzing the ability to recover the ground water level in natural conditions without groundwater pumping, it increased by 0.02 to 0.03

m/day. It was analyzed that the recovery period according to the case of pumping 1 day takes 4.6 to 60.6 days. According to the results of the survey on the transmissivity of each well in the study area, OW 37.73 m²/day, PW1 9.33 m²/day and PW2 13.18 m²/day were analyzed, showing the individual hydraulic characteristic of each well. This corresponds to 0.7 to 7% of the value of the transmissivity(geometric mean) surveyed for ground water wells in the northern basin of Jeju Island, and the drawdown caused by the pumping was considered to be large and the recovery was slow because the aquifer was not developed.

Considering the suitability of various analysis methods for calculating the of aquifer characteristics using the pumping test data, it was analyzed that the Moench method reflecting the storage well effect was the most appropriate.

Through this study it is found that long-term precipitation data, pumping quantity, groundwater level data, and accurate geological properties are needed to investigate the variation characteristics of groundwater wells. If all these data are established, it is considered to be very helpful in predicting the groundwater level of the groundwater well. The results of this study can be applied to understanding the characteristics of groundwater level variation in wells around Eoseungsaeng.

I. 서론

최근 세계적으로 기후변화가 심해짐에 따라 홍수 및 가뭄 등으로 인하여 수자원의 중요성이 부각되고 있다. 제주도는 국내에서 가장 다우지역으로 알려져 있으나 화산섬의 특성상 투수성이 양호한 지질구조로 이루어져 있어 하천 같은 지표수 보다는 지하수가 잘 발달되어 있어 수자원 이용량의 96% 이상을 지하수에 의존하고 있다.¹⁾ 지하수는 지표수에 비하여 기후변화와 같은 요인에 상대적으로 안정적인 수자원이지만 가뭄이 심할 경우, 지하수의 함양량이 감소하고 지하수 이용량이 증가할 경우 심각한 문제가 발생할 수 있다.^{2,3)}

제주도 지하수에 관한 연구는 여러 연구자에 의해 진행되었다. 수리지질과 분포 특성, 수질, 개발 가능량, 변동 경향, 함양량, 지하수 유동 해석 등 다양한 분야에서 연구가 수행되었으며 최근 인공지능망을 도입하여 지하수위 예측모델을 개발하는 연구도 수행되었다.^{4~11)}

지하수위는 강수량, 해양 및 지구조석, 대기압, 바람, 지진, 증발산량, 양수량 등 요인에 의해 변화한다.¹²⁾ 제주지역에서 지하수의 수위변동을 일으키는 주된 자연적 요인은 강우량과 해안조석²⁾이고 양수는 인위적인 변동 요인으로, 관정을 통한 양수는 대수층이 보유하고 있는 지하수의 양과 대수층으로부터의 유출속도를 변화시킨다.¹³⁾ 일반적으로 제주도 대수층은 투수성이 양호하고 저류량이 풍부하여 관정을 통한 양수 시 수위 강하량이 작고 비양수량(specific capacity: SPC)은 비교적 크게 나타나는 특징이 있다.¹⁴⁾ 제주도 지하수 관측망을 대상으로 지하수위를 변동유형별로 분석한 결과 저지대(EL. 200 m 이하)의 관측정은 전반적으로 양수의 영향을 받고 있는 것으로 연구되었으나,¹⁵⁾ 중산간(EL. 200~600 m) 이상 고지대(EL. 600 m)의 지하수 양수에 따른 영향을 정량적으로 평가한 연구는 미흡한 실정이다.

제주시와 서귀포시 중산간지역의 용수 공급원인 어승생 저수지의 경우 전체 수자원 이용량의 1.05%인 3,153천 m³/year을 차지하며¹⁾ 취수원은 Y계곡으로 강수량에 따라 정수장으로의 유입량이 좌우된다. 대표적인 가뭄해인 2013년과 2017년에는 용수 수요량은 증가하는데 비해 어승생 저수지로의 유입량이 감소함에 따라 제한적인 용수공급을 실시하였다. 원활한 용수 공급을 위해 어승생 저수지

서쪽 약 200 m 거리에 있는 조사관측공 내에 수중모터펌프를 설치하였고, 필요 시 지하수를 취수하여 용수를 공급하였다. 이후 가뭄이 지속되면서 어승생 저수지의 저수량이 줄어들자 새로운 취수원이 필요하게 되었고 2017년에 조사관측정 하류 173 m, 232 m 거리에 양수능력 각 500 m³/day의 지하수 관정(어승생 수원지 대체수원)이 개발되었다.

지하수는 지하의 암석이나 지층의 유효공극을 채우고 있거나 흐르는 물이므로 지하의 지질상태 또는 구조에 따라 부존특성과 산출상태에서 차이를 나타낼 수 있다.²⁾ 특히 제주도는 투수층과 저투수층이 지역과 심도에 따라 달리 분포하므로 지역적으로 대수층의 수리적 특성과 산출성이 달라지므로 지하수위 변동을 해석하기 위해 지하지질분포를 파악하여야 한다.¹⁷⁾

Song et al.¹⁵⁾은 제주도 전역의 지하수 관측정을 대상으로 대수층의 특성을 파악하기 위한 연구에서 지역별 함양 특성과 용수 수요 차이에 따른 계절별 지하수위 변동 특성과의 관련성을 검토하였으나 양수량 자료를 분석하지는 않았다. 또한 Kang et al.¹⁸⁾은 제주도 전역에서 관측된 지하수위 자료를 이용하여 해안선으로부터 떨어진 거리에 따른 지하수위 변동특성을 규명하였다. 그러나 해안으로부터 거리가 9 km이내에(표고로는 262 m 이하) 위치한 관정을 대상으로 한 것으로 중산간 지대의 수위변동 특성이 충분히 반영되지 않았으며, 고지대의 지하수위 변동은 연구되지 않았다.

본 연구에서는 제주도 고지대에 위치한 어승생 수원지 주변에 개발된 지하수 관정을 대상으로 지하수위 변동과 수리지질특성을 해석하는데 목적이 있으며, 이를 위해 지질주상도를 바탕으로 지하지질분포를 비교·분석하고, 양수시험자료를 재분석하여 연구지역에 보다 적합한 해석방법을 제시하였다. 또한 지하수위 장기 관측자료, 강수량 및 실제 이용되고 있는 취수량 자료를 활용하여 지하수위 변동을 분석하고 강수량과 양수량이 미치는 영향을 분석하였다.

II. 연구내용 및 방법

1. 연구지역

연구지역은 한라산을 기준으로 북측 산간지역 표고 약 600 m 내외에 위치하고 있다(Fig. 1). 제주도는 4개 유역 및 16개 소유역으로 분류되며 연구지역은 북부 유역의 서제주수역에 해당한다.¹⁹⁾ 연구대상 지하수 관정은 지하수 조사관측정 1공과 상수도 공급을 목적으로 한 생활용 관정 2공으로 각 관정의 체원을 Table 1에 나타내었다. 관측정 W200710011은 OW, 취수정 W201610003과 W201610004은 각각 PW1과 PW2로 표기하였다.

지하수 OW은 표고 615 m에 위치하고 굴착심도는 550 m이며, 스크린은 대수층 구간에 걸쳐 328~480m(EL. 135~287 m)에 설치되어 있다. 2008년 5월 29일부터 관측을 시작하였고 지하수위, 온도, 전기전도도가 1시간 간격으로 측정된다. 2017년 관측정(OW) 기준 북서쪽 약 173 m, 북동쪽 약 232 m 떨어진 지점에 취수정 PW1과 PW2이 개발되었다. 두 관정의 표고는 590 m, 585 m로 관측정보다 하류에 위치하고 있으며, 굴착심도는 450 m, 양수능력은 500 m³/day이다. 스크린 구간은 각각 278~440 m(EL. 312~150 m), 272~422 m(EL. 313~163 m)이다.



Fig. 1. Study area and distribution of well sites with precipitation station.

Table 1. Information for wells OW, PW1 and PW2

Well	Elevation (EL. m)	X	Y	Well depth (m)	Casing diameter (mm)	Water level(EL, m)	
						Natural	Stable
W200710011 (OW)	615	152107	91216	550	250	282.0	231.0
W201610003 (PW1)	590	152043	91372	450	250	287.0	203.5
W201610004 (PW2)	585	15151	91441	450	250	282.0	194.5

2. 연구방법

1) 지하수 산출특성 분석

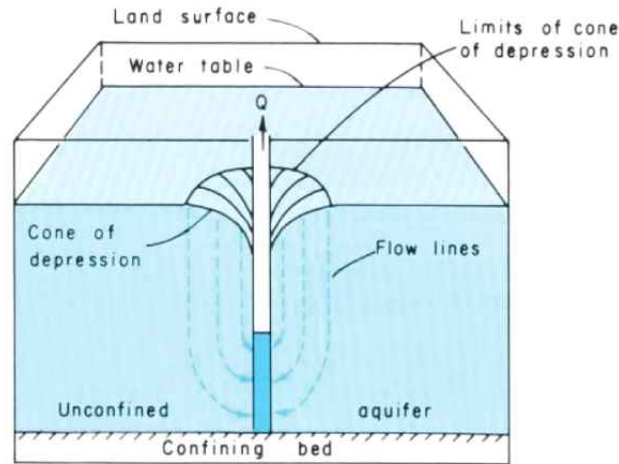
(1) 지질자료 분석

대수층 중에 포함된 지하수의 실체를 지하수체(groundwater body)라 하며 지질구조와 지하수체와의 관계를 조합시킨 것을 수문지질구조(hydrologocal structue)라 한다.²⁾ 지질구조는 관정 개발에서 작성된 지질주상도를 통해 파악할 수 있다. 시추공 지질주상도에는 시추공에 대한 기본정보 뿐 아니라, 지표 하부 토양 및 암석의 종류와 물리적 상태, 지층의 종류, 지하수위의 여러 정보가 함께 기록된다.²⁰⁾

연구대상 3개 관정의 개발당시 작성된 지질주상도^{21~23)}를 바탕으로 지하지질 분포상태, 투수대 및 저투수층을 파악하였다. 여기서 암석명은 Park et al.²⁴⁾이 제주도 전역의 공공관정 DB 구축 연구에서 제시한 제주도 화산암, 퇴적암, 퇴적층 표준 명칭을 기준으로 작성하였다. 그리고 암석 분포를 설명함에 있어 GL(Ground Level) 심도 순으로 나타내었으며 EL(Elevation Level)심도도 함께 표기하였다.

(2) 대수층 수리특성 분석

평형상태를 이루고 있는 대수층에서 양수가 시작되면 Fig. 2와 같이 관정 안에 있는 물이 먼저 배출되므로 관정의 수두가 하강(drawdown)된다. 양수가 계속되어 관정의 수두가 주변 대수층의 수두 보다 낮아짐에 따라 지하수가 대수층으로부터 관정으로 이동하고, 관정을 중심으로 수위강하추(cone of depression)가 형성된다. 관정의 수두 하강은 관정으로의 지하수 유입은 유입량과 관정에서의 양수량이 같아지는 시점까지 계속된다.²⁵⁾



Heath, Basic ground-water hydrology, (1983)

Fig. 2. Cones of depression in unconfined aquifers.

지하수 양수량이 관측정 지하수위에 미치는 영향을 분석하기 위해 2017년 1월부터 2018년 12월까지의 어승생 정수장의 일단위 양수량 자료를 활용하였다.

양수정 가동 경우별로 OW에서 양수하였을 경우를 CASE-1, OW, PW1 그리고 PW2에서 양수하였을 경우를 CASE-2, 모든 관정에서 양수하지 않은 경우를 CASE-3으로 분류하였다. 각 CASE에서 수위 변동을 비교하기 위하여 일정기간 동안의 수위차를 해당 일수로 나누어 기간평균 변동으로 표현하였고, 누적양수량과 지하수위의 상관성을 분석하였다.

지하수 산출특성을 파악하기 위해 대수성시험 자료를 활용하였다. 대수성시험은 대수층의 수리지질학적 특성을 파악하기 위하여 현장에서 양수로 인해 변화

된 지하수위를 관측하는 방법이다. 한 대수층에 양수정과 관측정을 설치하여 양수로 인한 수두의 시간적 변화를 측정하고 양수량과 수위강하량 자료를 이용하여 대수층의 수리상수인 투수량계수(T; Transmissivity), 저류계수(S; Storativity), 비산출율(Sy), 비저류계수(Ss) 등을 산정할 수 있다. 투수량계수란 지하수가 대수층의 단위면적을 통해 단위시간동안 유출입되는 양으로 $[L^2/T]$ 의 차원을 가진다. 저류계수란 단위수두변화당 투수층이 배출하는 물의 체적을 뜻한다. 비양수량(specific capacity)은 단위수위강하량에 대한 우물의 양수량의 비(Q/s_w)로 양수정의 산출능력을 나타낸다.

국내에서 대수성시험 해석에 대한 많은 연구가 진행되었으며, Choi,¹⁴⁾ Woo,²⁶⁾ Hamm²⁷⁾ 제주도의 양수시험 자료를 이용한 수리상수 산정에 관한 연구를 하였다. 이들은 비양수량-투수량계수 관계 경험식을 제시하였으며 Choi¹⁴⁾는 식(1), Woo²⁶⁾는 식 (2), Hamm²⁷⁾은 식(3)으로 제시하였다.

$$T = 0.448 \left(\frac{Q}{s_w} \right)^{1.053} \quad (1)$$

$$T = 0.582 \left(\frac{Q}{s_w} \right)^{0.974} \quad (2)$$

$$T = 0.99 \left(\frac{Q}{s_w} \right)^{0.89} \quad (3)$$

여기서 T: 투수량계수, Q: 양수량, s_w : 수위강하량

을 도출하였다. 경험식 간의 차이는 수리상수를 계산할 때 Choi¹⁴⁾는 자유면대수층에 적용하는 Cooper-Jacob²⁸⁾식을 적용하였고, Woo²⁶⁾는 누수피압대수층에 적용하며 누수층의 저류성이 0으로 가정된 Hantush-Jacob²⁹⁾식 Hamm²⁷⁾은 누수피압대수층에 적용하며 우물손실과 우물저장효과를 고려하는 Moench³⁰⁾식을 적용하였기 때문이다. 대수성 시험의 주요 해석법을 Table 2에 정리하였다.

본 연구에서는 양수시험해석법에 의해 산출된 수리상수와 경험식을 활용하여 산출된 수리상수를 비교하였다. 여러 해석법 중 연구지역의 수리적 특성을 대변할 수 있는 해석법을 제시하고, 실제 양수에 따른 지하수위 관측자료를 이용하여 수리상수를 도출하였다. 수리상수 도출에는 Aqtesolv 프로그램을 이용하였다.

Table 2. Major solution and formulas of aquifer test

Solution	Formula		Reference
Theis (1935)	$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u)$ (3)	$S = \frac{4Ttu}{r^2}$ (4)	30)
	$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$ (5)		
Cooper-Jacob (1946)	$T = \frac{2.3Q}{4\pi\Delta s}$ (6)	$S = \frac{2.25Tt_0}{r^2}$ (7)	28)
Moench (1985)	$\gamma = r_w \left(\frac{K'}{Gbb} \right)$ (8)	$\sigma = \frac{S'_s b'}{S_s}$ (9)	30)
	$r_D = \frac{r}{r_w}$ (10)	$W_D = \frac{\pi r_c^2}{2\pi_w^2 S_s b}$ (11)	
Hantush (1961)	$S = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-y}}{y} \operatorname{erfc} \frac{\beta \sqrt{u}}{\sqrt{y(y-u)}} dy$ (12)		29)
	$\beta = \frac{r}{4} \left[\sqrt{\frac{k' S'}{b' TS}} + \sqrt{\frac{k'' S''}{b'' TS}} \right]$ (13)		

b: aquifer thickness[L]

d: the depth to the top of pumping well screen[L]

d' : the depth to the top of observation well screen[L]

Kr: the radial (horizontal) hydraulic conductivity[L/T]

Kz: the vertical hydraulic conductivity[L/T]

l: the depth to the bottom of pumping well screen[L]

l' : the depth to the bottom of observation well screen[L]

Q: pumping rate[L³/T]

r: radial distance from pumping well to observation well[L]

s: drawdown[L]

S: storativity[dimensionless]

t: elapsed time since start of pumping[T]

T: transmissivity[L²/T]

w(u): the Theis well function for nonleaky confined aquifers
[dimensionless]

w(u,β): the Hantush and Jacob well function for leaky confined aquifers
[dimensionless]

y: a variable of integration

z: piezometer depth[L]

2) 강수량 자료 분석

강수량에 의한 수위변동을 분석하기 위해 어리목 기상관측소의 일단위 강수량을 사용하였다. 어리목 강우관측소는 제주지방기상청에서 방재기상관측을 목적으로 운영하고 있으며, 자동기상관측장비(AWS; Automatic Weather System)에 의해 관측되고 있다(<https://data.kma.go.kr>). 기상관측지점은 관정보다 상류인 표고 968 m에 위치하고 있으며 관측점에서 남동쪽으로 약 2 km 거리에 있다. 본 연구에서는 2008년 1월부터 2019년 12월까지의 자료를 이용하였다.

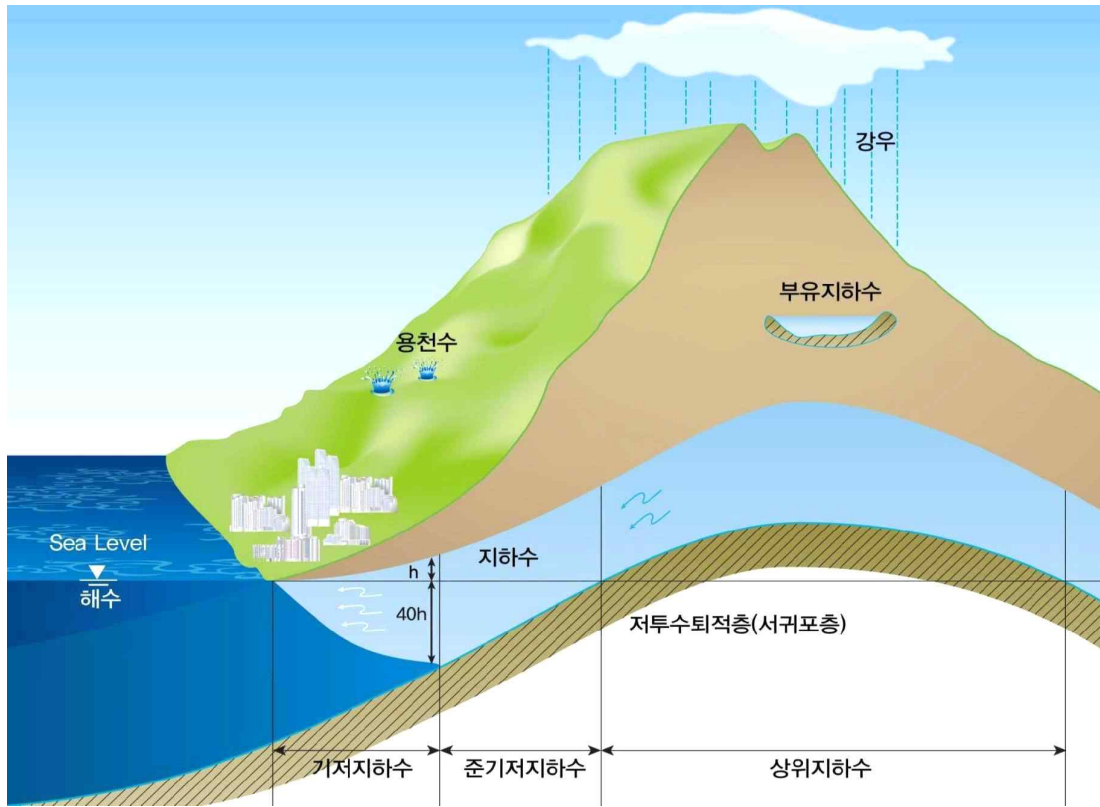
3) 지하수위 분석

제주도의 지하수 부존형태는 담수-염수와의 관계, 지질 분포, 지하수위 분포 및 수리경사에 따라 Fig. 2와 같이 상위지하수(High-level groundwater), 기저지하수(Basal groundwater) 및 준기저지하수(Parabasal groundwater)로 분류된다.¹⁾

상위지하수란 강수가 상부의 투수성 지층을 통해 지하로 침투되다가 저투수성 지층에 의해 더 이상 수직강하를 하지 못하고 비포화대 내의 저투수층의 표면을 따라 유동하거나 고여 있는 지하수이다. 상위지하수는 대부분 중산간 및 고지대에 편중되어 있으며³²⁾ 빠른 선형유속으로 유동되므로 풍수기(7~9월)와 갈수기(12, 1~2월)간에 수위 변동범위가 크게 나타나고 양수에 의한 수위강하량이 크다.³³⁾

기저지하수는 지하수가 염수와의 비중차이에 의해 담수가 염수의 상부에 Ghyben-Herzberg 원리에 의해 렌즈형태로 부존한다. 담수렌즈는 지하수 함양량, 조석 등의 요인에 따라 확장 수축이 반복되는 특성을 보인다. 기저지하수체는 조천읍~남원읍 해안지역, 한림읍 해안지역, 모슬포 해안지역을 따라 부존하고 있다. 특히 동부지역은 담수렌즈의 G-H비가 일반적인 담수지하수체보다 얇은 1:20의 비율로 형성되어 있다.³³⁾

준기저지하수는 저투수성인 서귀포층에 의해 담수지하수체가 해수와 직접 접하지 않아 G-H원리가 적용되지 않는 지하수체를 의미한다. 지하수위 변동은 강수에 영향을 받지만 서귀포층이 해수면 60 m 이하에 분포하는 지역은 조석의 영향을 받는다.³³⁾



제주특별자치도 수자원관리종합계획(보완)(2018-2022), 2018
 Fig. 3. Schematic model showing hydrogeological structures of groundwater in Jeju Island.

연구지역의 지하수위를 분석하기 위해 제주특별자치도에서 설치·운영 중인 지하수위 관측망(<http://water.jeju.go.kr>)의 일단위 및 시단위 자료를 활용하였다.

지하수위 변동성을 파악하기 위해 통계분석을 실시하였으며 분석 항목은 평균, 최댓값, 최솟값, 변동폭, 표준편차, 1/4분위수, 중앙값, 3/4분위수이다. 평균과 중앙값은 전체 관측자료의 대푯값을 표현하는 방법으로 수위값을 간략하게 표현한다. 표준편차는 관측자료의 분산도를 나타내며, 최댓값, 최솟값, 변동폭은 관측자료의 극값에 해당하는 항목으로 특정조건에서의 최대 변동 가능성을 보여준다. 분위수도 관측자료의 분포상태를 표현하며 일반적인 변동범위를 나타낸다.³⁴⁾

또한 지하수위 변동추세를 파악하기 위해 통계적 기법의 일종인 선형회귀분석(Linear Regression Analysis)을 실시하였다.

강수량-수위의 상관관계를 파악하기 위해 교차상관분석(Cross Correlation Analysis)을 실시하였다. 교차상관도는 두 가지의 서로 다른 시계열의 일정시차의 상관관계를 나타내는 것으로, 교차상관함수는 +1~-1 사이의 값을 가지며, +1은 완벽한 양의 선형 상관관계, 0은 선형 상관관계 없음, -1은 완벽한 음의 선형 상관관계를 의미한다. 상관도가 높을수록 최고점에서 교차상관값이 크게 나타난다.³⁵⁾ 강수량의 변화와 지하수위 변화간의 상관관계 값이 최댓값이 되는 시차는 강수가 지하수위에 도달하는데 걸리는 시간(lagging time)으로 생각할 수 있다.³⁶⁾

선행강수에 대한 지하수위 변동특성을 파악하기 위해 강수량의 이동평균과 지하수위와의 상관성을 분석하였다. 이동평균은 Yang³⁷⁾의 연구방법에 따라 지하수위 관측자료를 기준으로 과거 10일간의 일단위 강수량의 이동평균(MA; Moving Average)을 구하고, 10일 간격으로 360일까지 이동평균을 구하여 누적강수량과 지하수위와의 상관관계를 분석한 후 가장 높은 상관관계를 보이는 강우이동평균 일수를 도출하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 연구관정 수리특성 분석결과

1) 지질자료 분석결과

연구대상 관측정 및 지하수 관정의 지질주상도를 이용하여 지하지질 분포상태를 작성하였으며 Fig. 4에 나타내었다. 연구지역의 지표지질은 신생대 제4기에 형성되었고, 구성암석은 퇴적층, 용암분출에 의해 형성된 화산암, 화산폭발에 의해 형성된 화산쇄설암으로 구성된다.³⁸⁾

OW는 표고 615 m로 550 m (EL. 65 m)까지 시추되었다. 지질은 반상장석현무암(Porphyrific Feldspar Basalt; PFB), 비반상현무암(Aphanitic Basalt: ApB), 감람석현무암(Olivine Basalt; OB), 조면암(Trachyte), 함패류사암(Shell-bearing Sandstone, sSS)으로 이루어져 있다.

지표지질은 반상장석현무암으로 59.5 m(EL. 555.5 m)까지 8개의 단위층으로 분포하며 두께는 평균 4.3 m로 용암류의 경계부에서는 클링커와 퇴적광상(sedimentary deposit)이 혼재하고 있다. 80.5~87.5 m(EL. 527.5~534.5 m) 구간에는 토사가 분포한다. 94~163.5 m(EL. 451.5~521 m) 구간에는 감람석현무암 13매가 분포하며 두께는 평균 2.8 m이고, 경계부에서는 퇴적광상(sedimentary deposit)이 혼재하고 있다. 153.5~164 m (EL. 386~396.5 m) 구간에는 0.5 m 두께의 황토색 토사층이 분포한다. 207~452 m(EL. 343~98 m) 구간은 조면암질 안산암이 분포한다. 307.1~385.8 m(EL. 164.2~242.9 m) 구간에서 클링커층이 반복하여 분포한다. 대수층 구간은 333~521 m (EL. 94~282 m)이고, 주 대수층 구간을 이루는 암석은 조면안산암으로 조사되었다.

조면암과 같은 산성 화산암의 경우 현무암보다 치밀하기 때문에 낮은 공극률과 투수성을 갖는다. 하지만 OW의 경우 클링커(Clinker)층이 대수층 역할을 하고 있을 것으로 판단된다.

PW1은 표고 590 m로 450 m(EL. 140 m)까지 시추되었다. 지질은 침상장석감람석현무암(Acicular Feldspar Basalt, AFOB), 장석감람석현무암(Feldspar Olivine Basalt: FOB), 비반상현무암, 감람석현무암, 장석현무암(Feldspar Basalt: FB), 응회암(Tuff, TF)으로 이루어져 있다.

PW1의 상부(EL. 590~421 m) 침상장석감람석현무암, 장석감람석현무암, 장석휘석감람석현무암, 비반상현무암이 주로 분포하며 부분적으로 점토층과 화산쇄설층이 협재한다. 182~223 m(421~367 m) 구간은 장석현무암, 응회암, 비반상현무암, 점토층, 장석감람석현무암이 3~13 m 두께로 화산쇄설층, 토사층과 협재하여 매우 복잡한 지질구조를 이루고 있다. 223~434 m(EL. 156~367 m) 구간에는 비반상현무암, 장석휘석감람석현무암이 점토층, 화산쇄설층이 함께 분포한다. 434 m(EL. 156 m) 에서는 응회암이 분포하고 445 m(EL. 145) 부터는 미고결 토사층이 분포한다. 대수층 구간은 380~400 m(EL. 190~210 m)으로 비반상현무암이 주를 이루고 있다.

PW1 상부의 장석휘석감람석현무암과 장석감람석현무암은 제주도의 화산암류 중에서 투수성이 가장 양호한 암석이다⁵⁾. 하지만 하부로 갈수록 투수성이 불량한 점토층 출현 빈도가 3개 관정 중에서 가장 많았다. 또한 응회암은 지하수 유동에 영향을 줄 수 있는 수문지질학적 장벽(hydrogeological barrier) 역할을 한다.²⁾ 즉, 지하수의 흐름을 지연시키고 저장되어 있을 지역을 만들며 클링커층 하부에 응회암이 분포할 경우에는 지하수 부존량을 많아지게 할 수 있다.³⁸⁾

PW2는 표고 585 m로 450 m(EL. 135 m)까지 시추되었다. 지질은 반장석현무암, 휘석장석현무암(Augite Feldspar Basalt; AFB), 비반상현무암, 휘석감람석현무암(Augite Olivine Basalt; AOB), 반상휘석장석현무암(Porphyritic Augite Felspar Basalt ;PAFB), 감람석휘석현무암(Olivine Augite Basalt; OAB), 응회암으로 이루어져 있다.

지표지질은 4 m 두께의 반장석현무암이고 지표하 31 m(EL. 554 m)까지 휘석장석현무암이 분포하는데 이 구간에서는 절리 및 수직절리가 발달하였다. 지표하 75~153 m (EL. 432~510 m) 구간은 휘석감람석현무암이 분포하며 110~115 m(EL. 470~475 m) 구간에 균열이 발달하였다. 73~155 m(EL. 430~512 m) 구

간은 클링커층이 반복하여 분포하고 있으며, 176~193 m(EL 392~409 m) 구간은 17 m 두께의 화산쇄설층이 분포한다. 121.8~222 m(EL 363~367 m) 구간에서 균열이 심한 반상회석장석현무암이 분포하고 있다. 225 ~ 281 m(EL. 304~360 m) 구간에는 56 m 두께의 비반상현무암이 분포한다. 428 m(EL. 157 m) 부터는 응회암이 분포한다. 대수층 구간은 282~428 m (EL 157~303 m)이고, 주대수층 구간을 이루는 암석은 반상회석장석현무암으로 조사되었다.

PW2는 지표로부터 225 m(EL. 360 m)를 기준으로 상부는 클링커층이 자주 출현하고 절리와 균열이 발달하였으나 225 m 이하 부터는 50 m 이상 두께의 비반상현무암 3매 및 응회암이 분포하고 있다.

연구지역은 상위지하수 부존지역으로 자연수위는 282~287 m(EL)로 비슷한 고도에서 형성되었다. 지하수위 아래에서 주대수층이 형성되고 저투수층의 출현 고도가 불규칙한 북부지역의 특성³⁾과도 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 대수층은 어느 특정구간에만 한정되어 있는 것이 아니라 암질이 다른 두 종류 이상의 층이 교대로 나타나는 상태에서 여러 구간에 존재할 수 있는 것으로 판단된다.

연구지역의 지질은 장석현무암, 반상장석현무암, 휘석장석현무암, 반상회석장석현무암, 감람석현무암, 휘석감람석현무암, 장석감람석현무암, 침상장석감람석현무암, 감람석회석현무암, 비반상현무암, 분석(Sroria, SC), 클링커, 조면암, 응회암, 함패류사암, 모래(S; Sand), 머드(Mud; M)로 구성된다.

관정의 고도 차이가 20 m, 거리가 127~233 m 떨어져 있음에도 불구하고 지질적 통일성은 많지 않았다. 156~163 m(EL)에서 포착된 응회암, 238~334.5 m(EL) 구간 사이에서 분포하는 점토층, 432~521 m(EL) 구간의 감람석현무암계 통의 지질에서 공통성을 찾을 수 있었다.

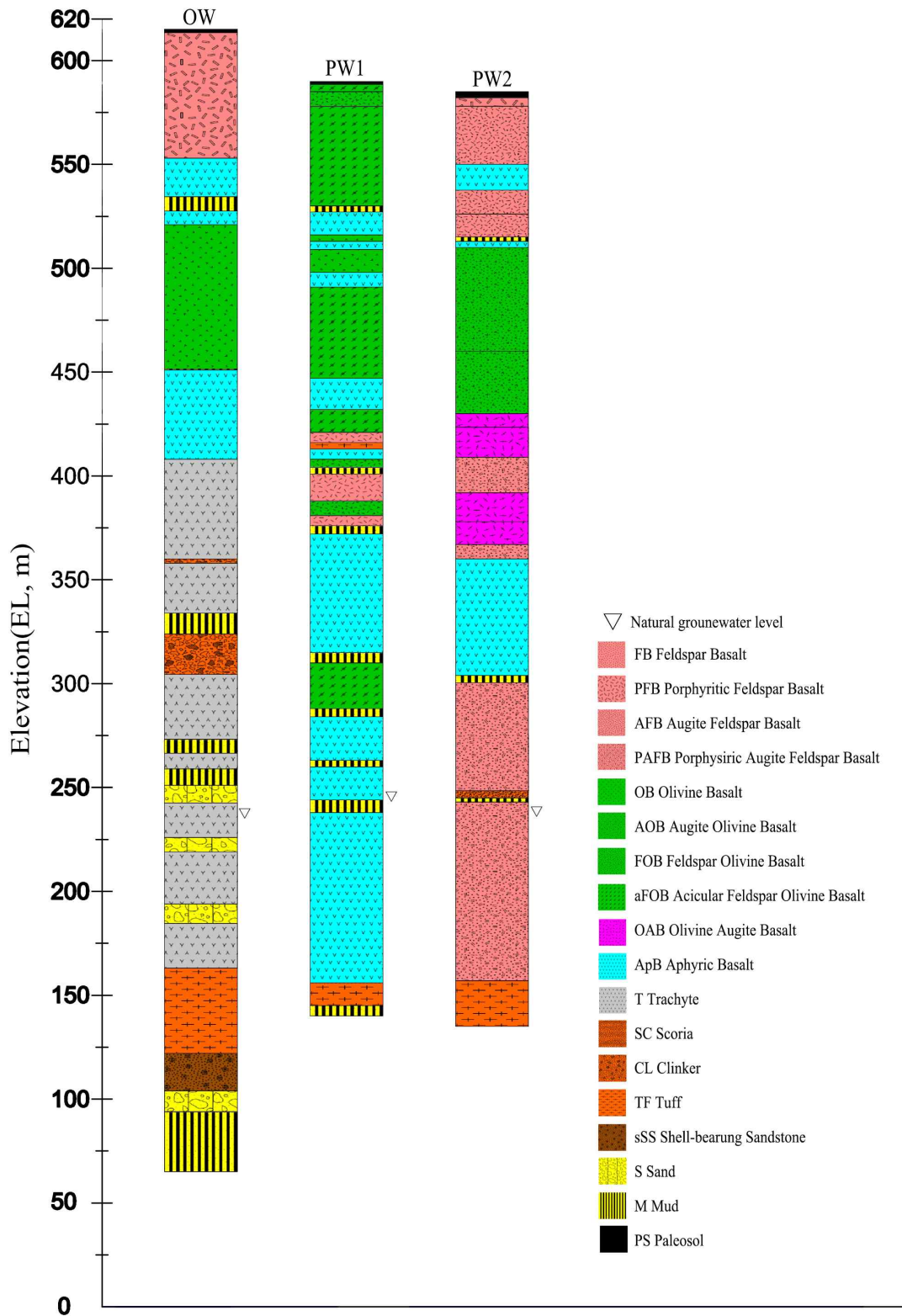


Fig. 4. Geologic columnar section of OW, PW1 and PW2.

2) 대수층 수리특성 분석

(1) 연구지역의 수리특성

각 관정의 양수시험자료 해석을 통해 산출된 수리특성은 “제주지역 지하수 기초조사(보완)⁴⁰⁾”의 자료를 인용하였으며 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Hydraulic parameters calculated from pumping test each of OW, PW1 and PW2

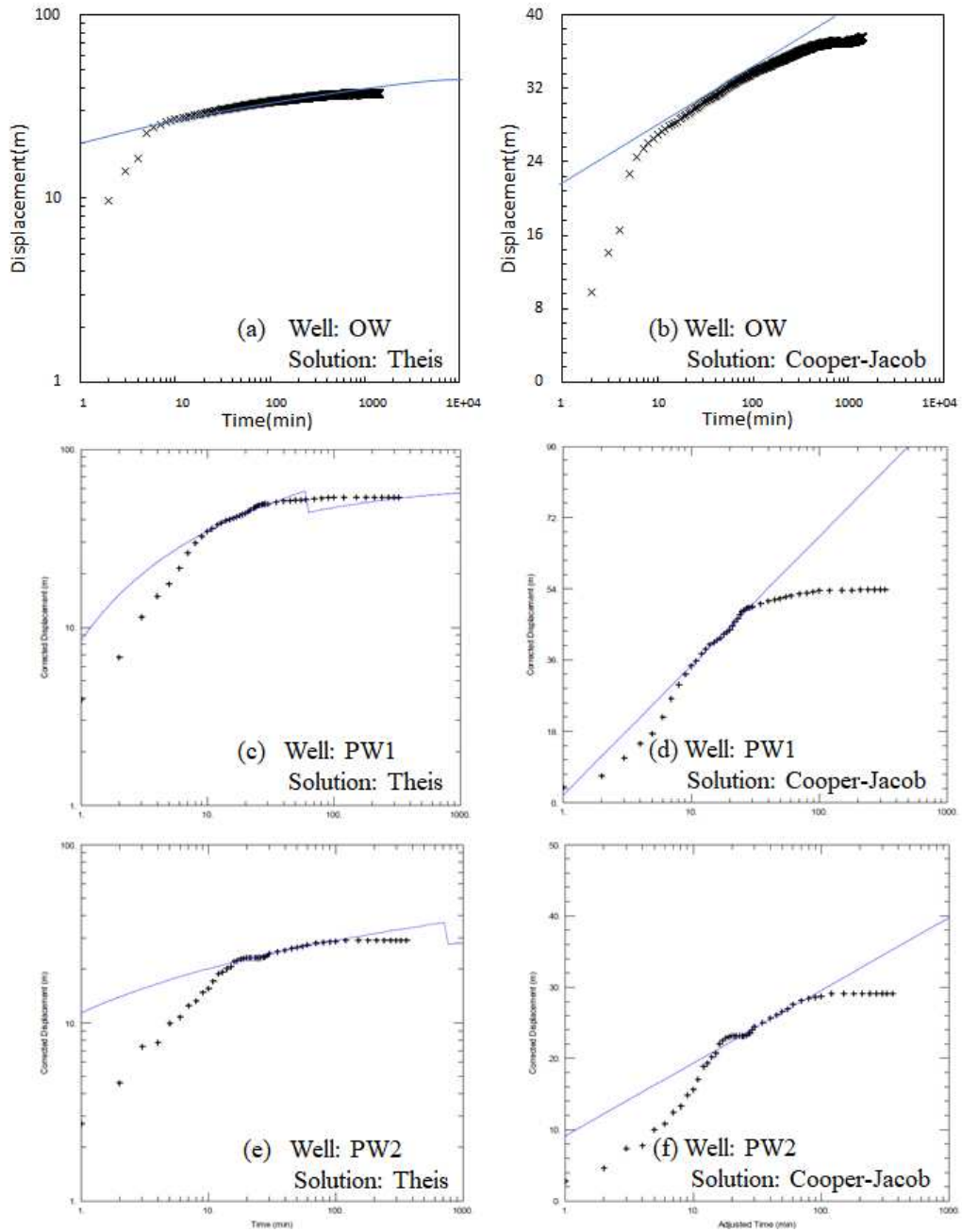
Well	Pumping capacity (m ³ /day)	Drawdown in well (m)	Time to reach stable water level(day)	Hydraulic parameter		
				Analytical Method	T (m ² /day)	S
OW	915	37.59	0.1160	Theis	26.82	0.0223
				Cooper-Jacob	27.6	0.0140
PW1	500	84	0.1458	Theis	2.954	0.3705
				Cooper-Jacob	2.802	0.3865
PW2	500	40.14	0.0694	Theis	10.34	0.0869
				Cooper-Jacob	8.967	0.1795

투수량계수를 통해 어떤 조건에서 지하수 이동량이 알려지기 때문에 취수량 계산이나 자연 상태에서 지하수 이동량 등을 알 수 있다. 투수량계수는 OW>PW2>PW1 순이며 투수량계수가 작을수록 수위 강하는 크게 나타났다. 이는 양수에 의해 유출되는 양보다 대수층을 통하여 전달되는 수량이 적기 때문인 것으로 판단된다. PW1과 PW2는 양수량이 500 m³/day로 동일했지만 수위 강하는 투수량계수가 작은 PW1에서 2배 크게 나타났고, 안정수위에 도달하는 시간(수위강하가 더 이상 일어나지 않는 시간) 또한 PW1이 2배가량 더 소요되었다. 연구대상 관정중에서 OW의 투수성이 가장 양호하였으나, 투수량계수를 북부유역의 기하평균인 419.3 m²/day⁴⁰⁾과 비교했을 때 약 7% 미만 수준이었다. 제주도 투수성 지질구조의 50% 이상이 중산간 이상 지대에 분포하여 지하수 함양에는 유리한 역할을 하고 있으나, 지하수의 양수능력을 판단하는 투수량계수와는 직접적인 연관성이 없다. 따라서 중산간지대 지하수의 양수능력은 심부에 분포하고 있는 대수층 및 저투수층의 분포형태와 깊이에 따라 좌우된다.⁴¹⁾

저류계수는 어떤 지역의 지층 체적 중에 있는 물의 총량 중에서 취수할 수 있는 양이 얼마인지를 나타낸다. 연구지역의 저류계수는 자유면대수층의 일반적 범위인 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ 에 해당하는 값을 보였다. PW1의 저류계수는 Theis법과 Cooper-Jacob법을 통해 산정한 값이 유사했으나, OW1과 PW2는 약 2배의 차이를 보였다.

Fig. 5는 OW, PW1 및 PW2의 시간에 따른 수위강하 관측자료를 Theis법, Cooper-Jacob법으로 해석한 곡선을 도시한 것이다. 두 해석곡선은 양수초기 10분까지의 수위강하를 반영하지 못하는 것으로 판단된다. 이는 두 해석식(식 3, 식 6)이 대수층 내에 저류된 지하수가 수위강하와 동시에 배출된다는 가정 하에 유도되었으나 실제 대수층에서는 지연효과로 인해 수위강하량이 적은 것으로 판단된다.⁴²⁾ 일반적으로 Theis법과 Cooper-Jacob법을 통한 수리상수 산정은 양수량이 일정하며 양수정 주위에 관측정이 있을 때 적용할 수 있는 것으로 알려져 있다. 제주도의 경우에는 관측정 굴착을 통한 양수시험이 어렵기 때문에 관측정 없이 양수정에서 지하수위 강하를 관측하므로 두 해석방법의 적용성이 떨어진다.⁴³⁾

Jeon et al.⁴⁴⁾의 시간-수위강하 곡선 유형분류에 의하면 OW는 양수시험 후반부에 수위강하가 완만해지는 함양경계형에 해당된다(Fig. 5 (a), (b)). 양수시상부 대수층으로부터 수직적인 지하수 흐름이 발생하는 누수피압대수층에서 관측되는 유형이다. Theis법은 지하수 흐름이 균열이나 단층의 발달 상태에 지배를 받을 때는 적합하지 않다.⁴⁵⁾ PW1과 PW2의 경우 자유면대수층형에 해당된다(Fig. 5 (c)~(f)). 이 유형에서 수위강하는 3단계에 걸쳐 일어난다. 먼저 피압대수층의 압축과 팽창 원리에 의해 수위강하가 발생하고, 두 번째는 중력배수에 의해 완만한 수위강하가 일어난다. 마지막으로 중력배수와 수위강하가 동시에 일어나 수위가 서서히 강하된다.



제주지역 지하수 기초조사(보완), 2018

Fig. 5. Aquifer test analysis of OW, PW1 and PW2 calculated from Theis method (a, c, e) and Cooper-Jacob method (b, d, f).

각 관정의 양수량에 따른 수위강하량(Table 3)을 활용하여 Choi, Woo 및 Hamm의 경험식(식1, 식2, 식3)을 통해 투수량계수를 산정하였다. OW에서는 경험식을 통해 산정한 값이 대수성시험 해석결과보다 작았다. 특히 Cooper-Jacob 법과 Choi의 경험식간에는 2.1배의 차이를 보였다. PW1은 Hamm의 경험식을 제외하고 모두 유사한 값이 도출되었다. PW2는 Hamm의 경험식을 통해 산정한 값이 대수성시험 해석결과와 일치하였고, Choi와 Woo는 0.7배 적었다.

Table 4. Transmissivity of OW, PW1 and PW calculated from empirical formula

Well	Analytical Method	Transmissivity(m ² /day)
OW	Choi	12.91
	Woo	13.04
	Hamm	16.96
PW1	Choi	2.93
	Woo	3.31
	Hamm	4.84
PW2	Choi	6.38
	Woo	6.79
	Hamm	9.34

비양수량-투수량계수의 관계식을 통한 수리상수 산정방법은 많은 시간과 비용이 소비되는 양수시험을 통하지 않고서도 투수량계수를 추정할 수 있는 장점이 있으나,⁴⁵⁾ 수위강하량이 크지 않은 대수층에서는 투수량계수가 양수량에 의해 지속적으로 증가하기 때문에 정확한 산정이 어렵다.⁹⁾

(2) Moench법을 적용한 수리상수 산정

Moench³⁰⁾법은 자유면대수층의 해석법 중 하나이며, 우물저장효과(Well storage effect)와 중력배수로 인한 지연효과를 고려할 수 있는 해석방법으로 단공시험에도 적용 가능하다. Moench법에서 누수층(준대수층)은 대수층의 위, 아래에 위치한다고 가정되며, 누수층의 저류계수가 고려된다.⁴⁶⁾ 우물저장효과란 양수시험 시 양수정에 저장되어 있던 물이 빠져나가면서 수위강하가 덜 발생하는

현상을 의미하며 양수정 크기에 비례하는 우물 저장효과를 갖는다.⁴⁷⁾

OW, PW1 및 PW2의 양수시험자료를 Moench법을 적용해 해석한 결과를 제시하였다(Fig. 6 및 Table 5). 본 연구에서는 상용프로그램인 Aqutesolv (HydroSOLVE, Inc.) 프로그램을 이용하였다. 해석 시 입력 자료인 각 관정의 케이싱 및 나공 반경(well bore radius), 대수층 두께, 양수량, 수위강하량은 Table 5와 지질주상도의 자료를 활용하였다.

세 관정 모두 해석곡선이 초기 및 후기의 수위강하에 대해서도 관측자료와 비교적 잘 일치하는 결과를 보였다(Fig. 6). 투수량계수는 OW이 37.73 m³/day, PW1이 9.333 m³/day 그리고 PW2가 13.18 m³/day로 도출되었다. 저류계수는 OW이 8.0E-04, PW1이 9.535E-05 그리고 PW2가 6.15E-13로 도출되었다.

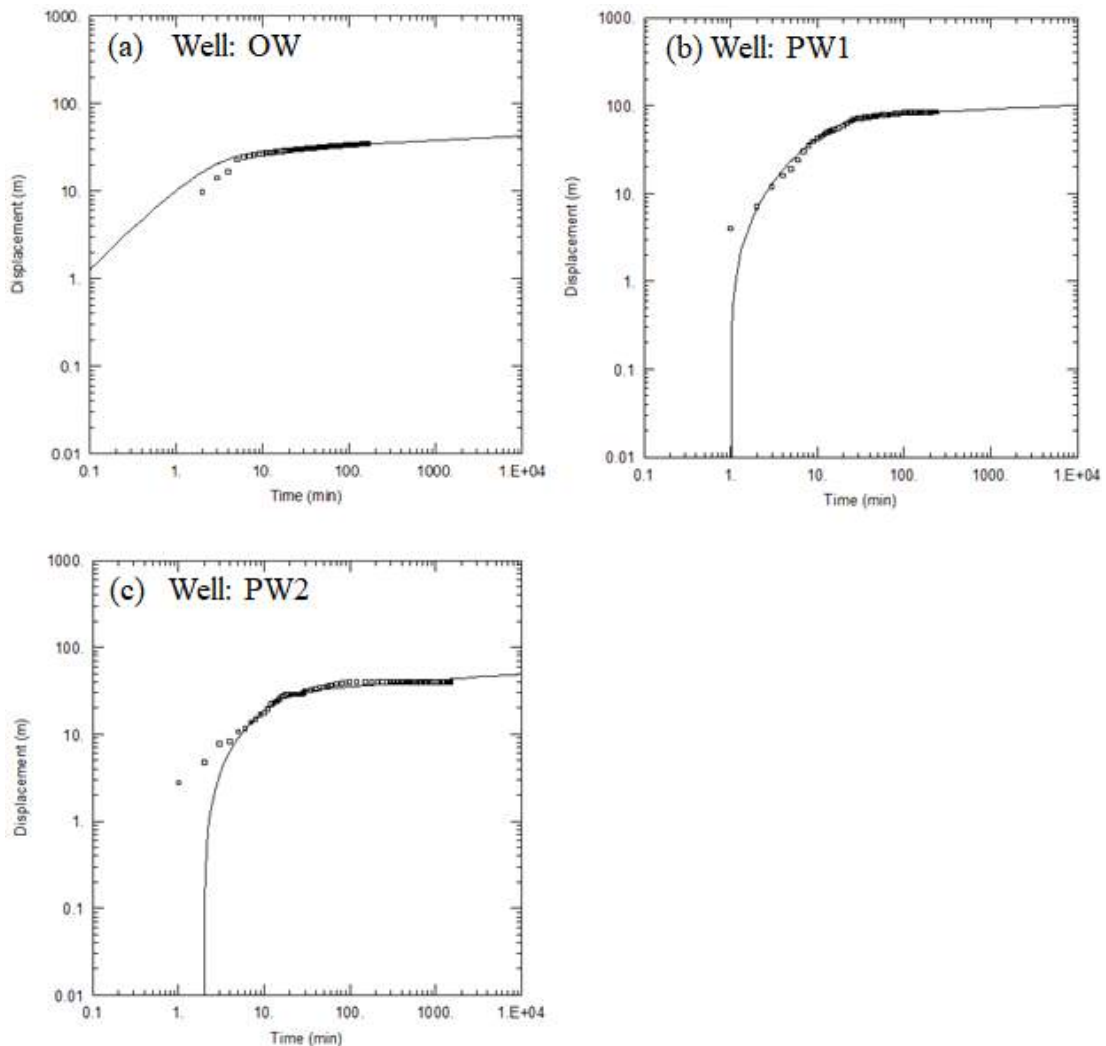


Fig. 6. Aquifer test analysis of OW, PW1 and PW2 via Moench method.

Table 5. Transmissivity and storativity of OW, PW1 and PW2 calculated from Moench method

Well	Transmissivity(m ² /day)	Storativity
OW	37.73	8.0E-04
PW1	9.333	9.535E-05
PW2	13.18	6.15E-13

기준에 보고된 문헌(Table 3)과 이를 바탕으로 경험식에 적용하여 산출한 값(Table 4) 및 Moench법을 통해 산출한 수리상수를 비교하여 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 저류계수는 경험식이 제시되지 않았기 때문에 기준 문헌과 비교하였다.

투수량계수는 Moench법으로 산출한 값이 기준문헌과 경험식을 통해 산출한 값보다 크게 나타났다. OW와 PW2는 약 1.4배, PW1은 약 3.3배 차이를 보였다.

저류계수는 Moench법으로 산출한 값이 모두 적게 나타났으며 OW가 0.03~0.05배, PW1이 0.002~0.0003배 차이를 보였다. PW2의 경우 저류계수가 매우 작은 값이 도출되었다.

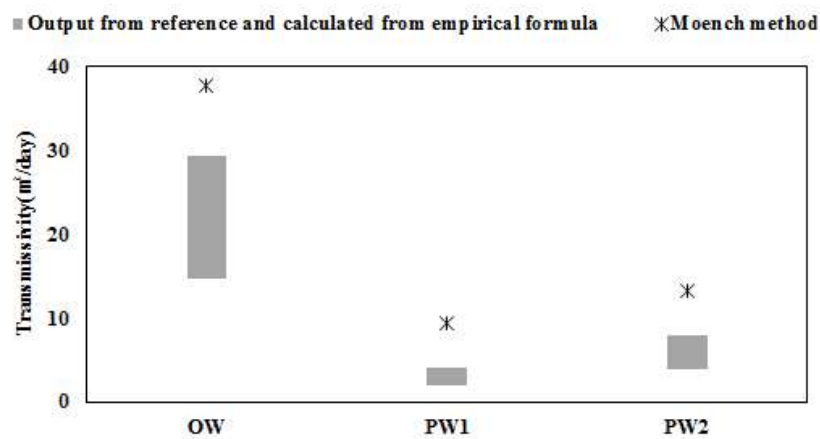


Fig. 7. Comparison of transmissivity of wells between Moench method(*), and those ranges of reference and calculated from empirical formulas(bar).

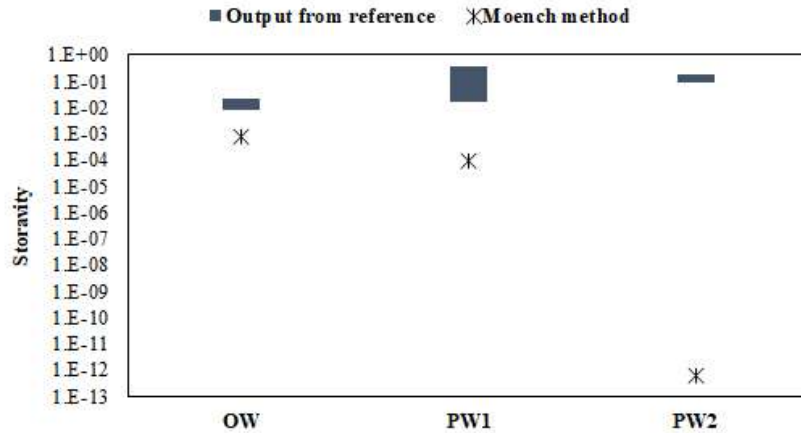


Fig. 8. Comparison of storativity of wells between Moench method(*) and those range of values from reference(bar).

각 해석방법에 따라 가정과 적용되는 변수가 다르기 때문에 도출된 값도 모두 상이하였다. 양수시험과 관련된 연구에서는 공통적으로 대수층의 유형 및 해석법에 따라 수리상수가 다르게 도출될 수 있음을 시사하고 있다. 따라서 지질학적 정보를 바탕으로 적절한 해석법을 적용하는 것이 중요하다.

제주도 양수시험 자료 해석에 적합한 해석법을 탐색한 연구에서 서부지역에서 수행된 양수시험 자료를 분석하였는데 Moench법이 대부분(95%)의 양수시험자료를 잘 설명하는 해석법인 것으로 보고하였다.⁴³⁾

상기 결과로부터 연구지역의 수리특성을 종합해 보면, 지질주상도 분석 결과 연구 대상 관정의 대수층은 발달되지 않고, 관정별 대수층의 연결성이 나타나지 않았다. 투수량계수는 40 이하로 북부지역의 평균 투수량계수인 5,593 m²/day와 비교했을 때 연구지역의 수리특성은 불량한 것으로 분석되었다.⁴⁸⁾

(3) 실제 이용에 따른 산출특성

PW1, PW2에서 다중 양수하였을 때 OW에서의 시간위 관측자료를 활용하여 양수에 의한 수리특성을 산출하였다. 관찰기간은 8시간이고 OW에서는 양수하지 않았으며 관측된 지하수위는 17.71 m 하강하였다. 양수량은 PW1에서 350 m³/day, PW2에서 295 m³/day이었다. 시간에 따른 수위강하 관측자료와 Moench법을 적용한 해석곡선을 Fig. 9에 나타내었다. 투수량계수와 저류계수(Table 6)는 각 19.66 m²과 5.776E-07로 관정 개발 시 양수시험 해석결과에 비해 모두 적은 값으로 산출되었다. 이는 관정 개발 시에 단공에서 양수시험을 시행했기 때문에 저류계수가 실제보다 크게 산출된 것으로 판단된다.⁴⁶⁾ 또한 저류계수가 작아진 것은 PW1과 PW2 두 관정에서 양수하였기 때문에 양수가 대수층에 영향을 미치는 범위가 넓어진 것으로 판단된다.

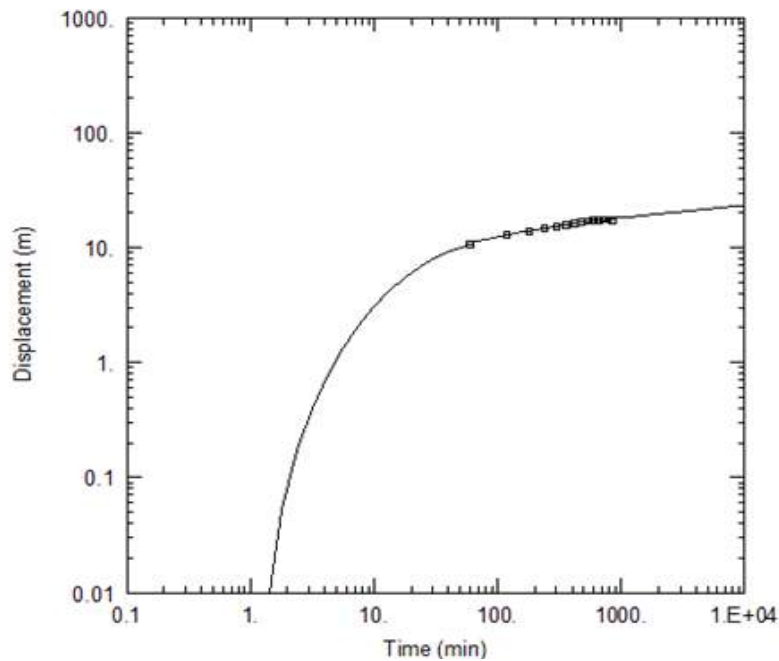


Fig. 9. Analysis of time-drawdown curve of OW calculated from Moench method in case of pumping at PW1 and PW2.

Table 6. Hydraulic parameters of OW when pumped at PW1 and PW2

Analytical Method	Transmissivity(m ² /day)	Storativity
Moench	19.66	5.776E-07

2. 강수자료와 지하수위 자료 분석

1) 강수자료 분석을 통한 강수특성

연구지역의 강수특성 분석을 위하여 어리목 기상관측소에서 관측된 2008년부터 2019년까지의 자료를 활용하였다. 어리목 관측소의 2008년~2019년 연평균 강수량은 3,349 mm, 연최소 강수량은 2017년에 1,607 mm, 연 최대 강수량은 2019년에 4,706 mm로 나타났다. 연강수량의 편차는 다우년의 강수량이 과우년의 2.9배(3,099 mm 차이)에 이를 정도로 크게 나타났다. 2008년, 2009년, 2013년 및 2017년은 연강수량 2,500 mm 미만인 가뭄해, 2010년, 2012년 및 2019년은 연강수량 4,000 mm 이상인 풍수해로 분석되었다(Fig. 10).

연도별 강수일수는 평균 153일로, 2008년 172일에서 2019년 136일로 감소하였다(Fig. 3). 강수량과 강수일수는 증가·감소 경향을 같이 하였는데 2019년은 4,706 mm의 강수가 있었음에도 불구하고 강수일수는 136일로 가장 적었다. 2019년의 일강수량이 100 mm 이상인 경우는 총 13일이었으며 강수량 합계는 3,087.5 mm로 연강수량의 65.6%를 차지하며 집중강우 현상이 증가하는 것으로 보인다.¹⁾

월평균 강수량은 1월이 110 mm로 가장 적었고, 점차 증가하여 8월이 591 mm로 가장 많았으며 12월까지 감소하는 경향을 보였다(Fig. 11).

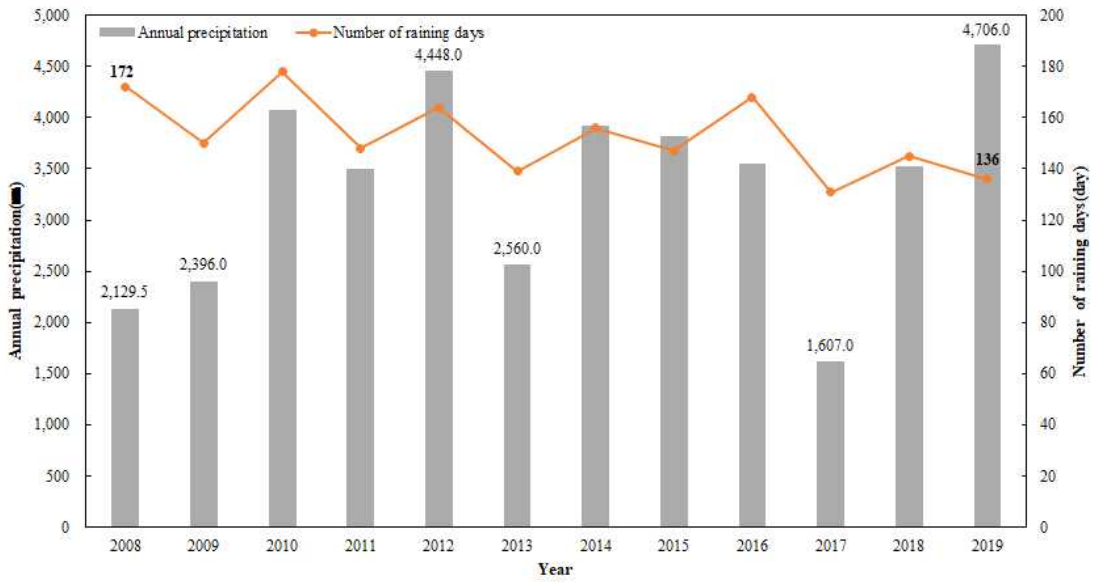


Fig. 10. Annual precipitation and number of raining days of Eorimok station (2008~2019).

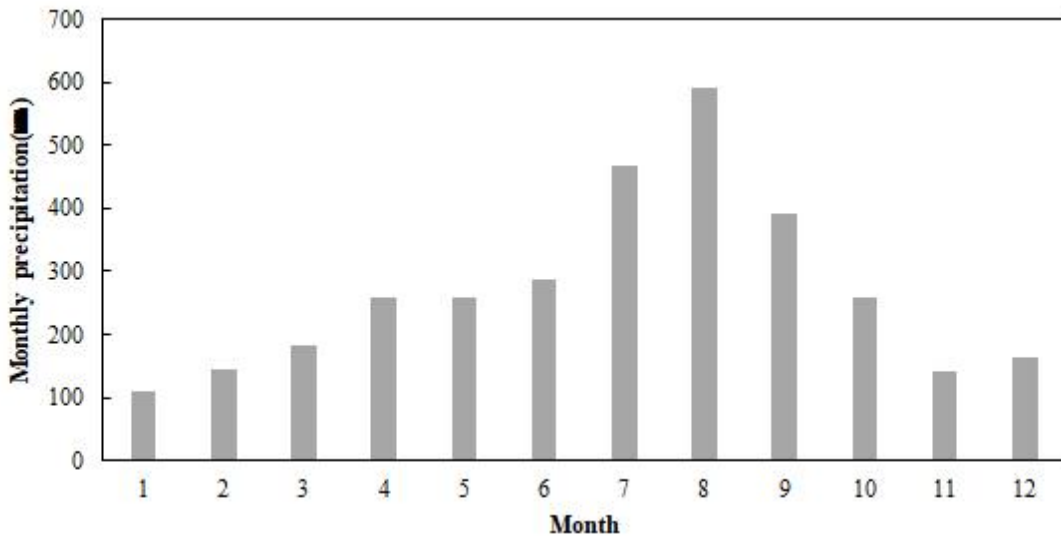


Fig. 11. Monthly average precipitation of Eorimok station(2008~2019).

2) 지하수위 관측자료 분석

지하수위는 수위변동 특성에 따라 세 기간(A~C)로 구분하였다. OW에서 관측을 시작한 2008년 5월 29일부터 2019년 12월 31일까지의 지하수위 관측자료와 강수량을 함께 Fig. 12에 나타내었다. (A)기간은 지하수위는 관측을 시작한 2008년 5월 말부터 2013년 7월까지로 1일 100 mm 이상의 강수가 내리더라도 일정한 수위가 유지되는 구간이다. (B)는 2013년 하반기부터 2018년 2월까지로 관측정 자체 및 지하수 관점에서 양수에 의한 인위적인 요인으로 지하수위가 급격한 변동을 보였다. (C)기간은 2018년 3월 이후로 급격히 낮아진 지하수위가 자연적으로 상승되는 구간이다. 장기관측자료에 의하면 OW는 강수에 의한 영향은 크게 나타나지 않지만 양수에 의한 수위하강은 크게 나타나고, 급격하게 하강한 수위는 매우 천천히 상승되는 경향을 보인다.

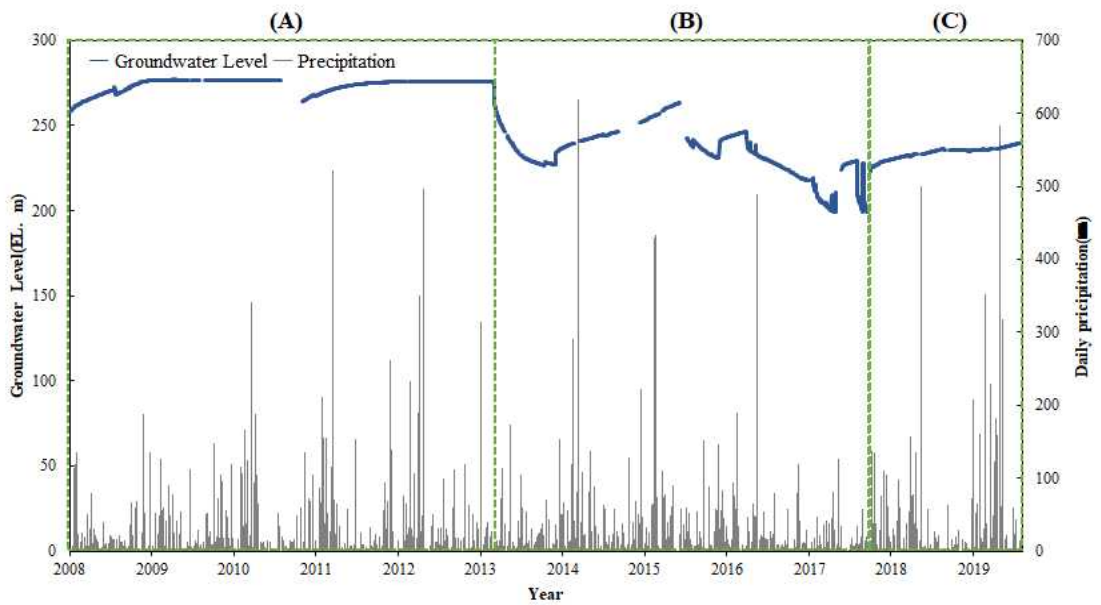


Fig. 12. Time-series groundwater hydrograph of OW well.

(1) 지하수위 통계분석

전체 관측기간에 대한 지하수위 통계분석을 실시하였다(Table. 7). 전체 관측기간에 대하여 지하수위는 199.02~276.9 m 에 있었다. 연평균 수위는 2010년이 가장 높고 2017년이 가장 낮았으며 2013년에는 연간 46.03 m의 가장 큰 변동폭을 보였다(Fig. 13, Table 7).

지하수위가 일정하게 유지되었던 (A)기간(2008~2012년)에는, 평균지하수위가 265.94~275.54 m로 약 10 m 정도 변동되었다. 지하수 양수가 있었던 (B)기간(2013~2017년)에는 평균지하수위가 207.69~261.48 m로 약 44 m 정도 변동되었으며 표준편차는 5.82~18.06 범위로 분석되었다. 관정에서 양수를 멈춘 (C)기간(2018~2019년)에는 평균지하수위가 228.09~236.53로 약 8 m정도 변동되어 수위 변동폭이 다시 적어진 것으로 분석되었다. 또한 2019년 지하수위 관측자료의 표준편차는 1.29로 (A)기간의 표준편차 범위 내에 있었다.

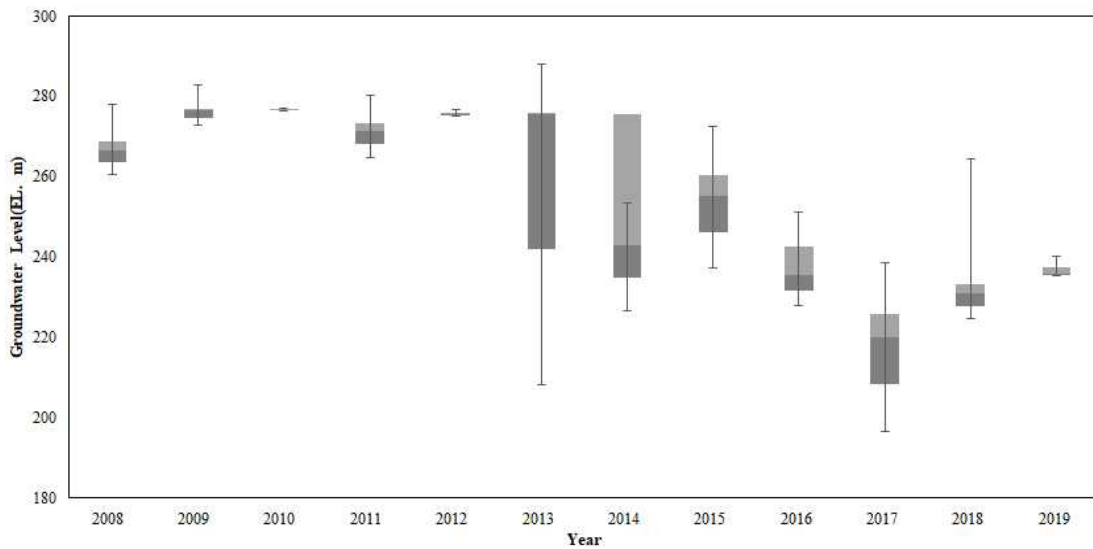


Fig. 13. Annual statistics of groundwater level OW well.

Table 7. Statistics of OW well groundwater level

(unit: EL, m)

Year	Ave.	Max.	Min.	Range	S.D	25% quantile	Median	75% quantile
2008	265.94	272.43	257.83	14.6	3.46	263.5	266.47	272.43
2009	275.50	276.93	268.83	8.1	2.12	274.71	276.66	276.82
2010	276.56	276.82	276.29	0.53	0.14	276.42	276.61	276.67
2011	270.66	276.31	263.99	12.32	2.99	268.06	271.27	273.24
2012	275.54	276.01	274.58	1.43	0.34	275.36	275.7	275.77
2013	261.48	275.78	229.75	46.03	18.06	241.86	275.54	275.62
2014	236.47	245.29	226.57	18.72	6.76	234.73	242.75	275.55
2015	253.66	263.25	236.80	26.45	7.45	246.14	255.19	260.22
2016	236.85	246.41	226.98	19.01	5.82	231.69	235.35	242.55
2017	217.69	229.19	199.02	30.17	9.60	208.28	220.06	225.91
2018	228.09	235.83	199.02	36.81	9.22	227.69	230.86	223.24
2019	236.53	239.81	235.1	7.16	1.29	235.59	235.91	237.25

* Ave.: Average, Max.: Maximum, Min.: Minimum, S.D: Standard Deviation

(2) 구간별 지하수위 추세 분석

지하수위 변동 추세를 선형회귀분석(Linear Regression)를 통해 분석하였다.

(A)기간은 2008년 5월 29일부터 2013년 7월 25일까지이고 지하수위는 최초 대비 약 17.5 m 상승하였다. 장기적으로 완만한 상승 추세를 보이고 있으며, 기울기는 0.0027이었다. 회귀식은 $y = 2.73E-03 + 1.63E+02$ 으로 표현된다(Fig. 14).

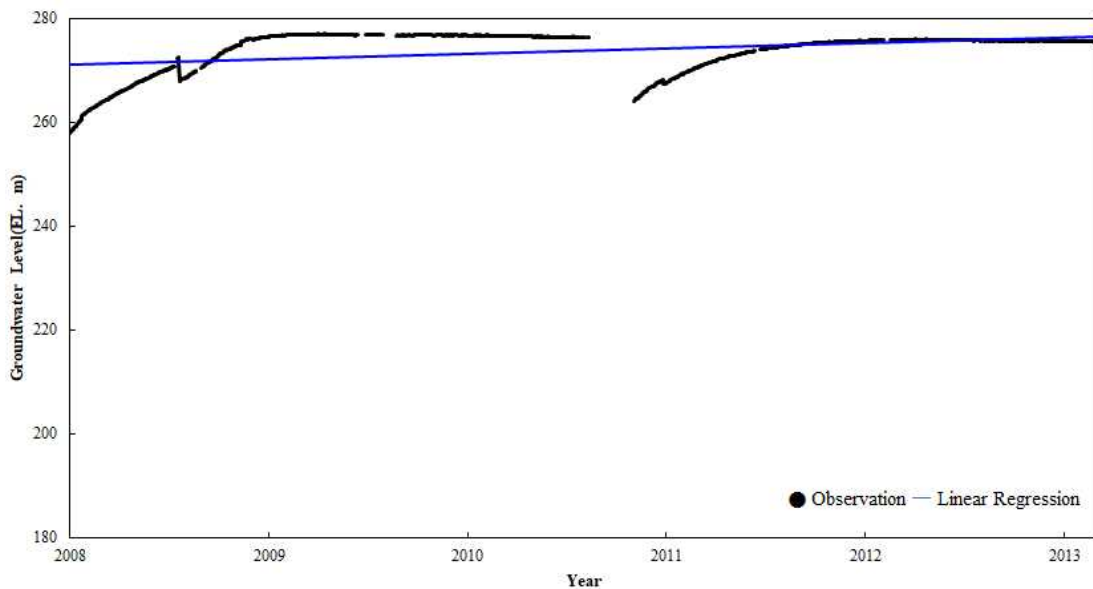


Fig. 14. Linear regression of groundwater level during (A).

(B)기간은 2013년 7월 26일부터 2018년 2월 12일까지이다. 전술한 바와 같이 지하수위는 상승·하강 특성이 일정하지 않고 (A), (C)와 다른 변동 양상을 보였다. 전체 기간의 지하수위는 하강추세에 있었고, 기울기는 -0.0171이었다. 회귀식은 $y = -1.71E-02 + 9.61E+02$ 으로 표현된다(Fig. 15).

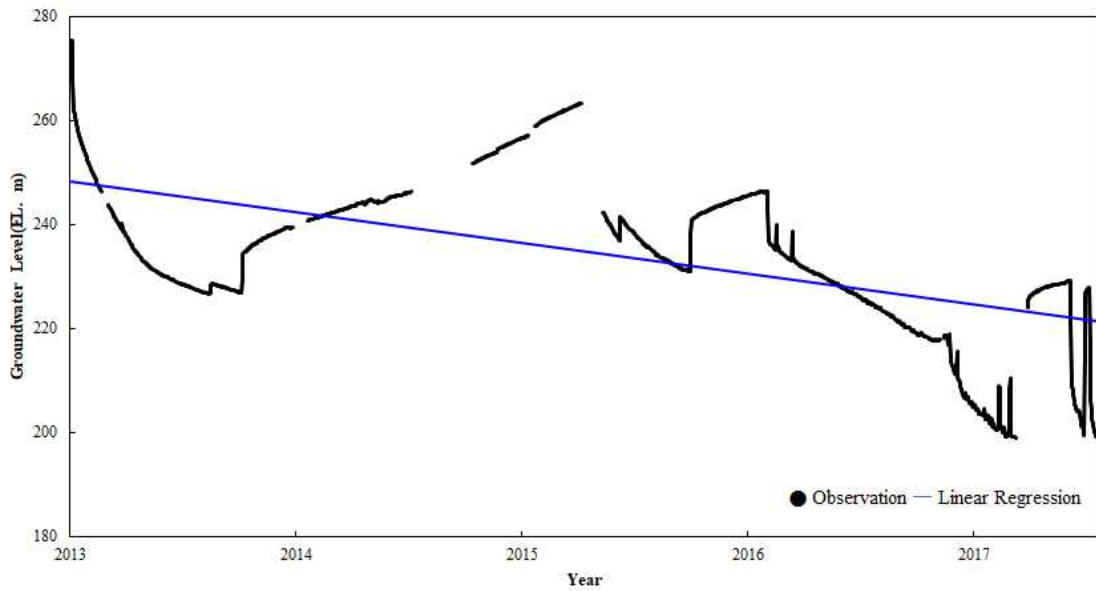


Fig. 15. Linear regression of groundwater level during (B).

(C)기간은 2018년 2월 27일부터 2019년 12월 31일까지로 지하수위는 16.49 m 상승하였다. 상승 추세를 보이고 있으며, 기울기는 0.0154이었다. 회귀식은 $y = 1.54E-02 - 4.E+02$ 으로 표현된다(Fig. 16).

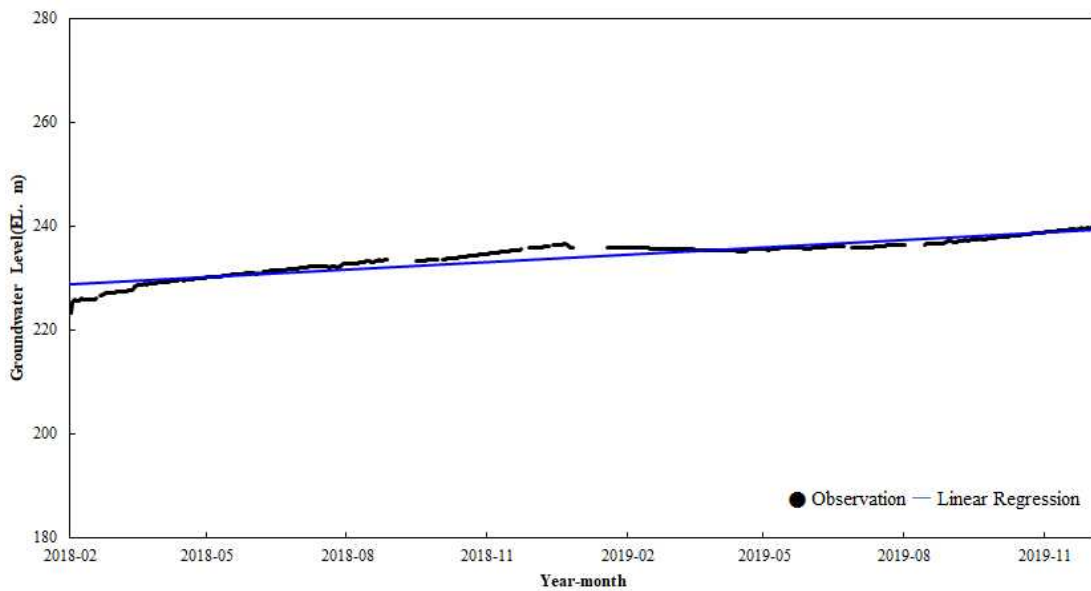


Fig. 16. Linear regression of groundwater level during (C).

Choi et al.⁷⁾은 제주도 지하수위 관측자료를 대상으로 비모수 경향분석(Mann-Kendall trend test, Sen's test)을 수행하였는데 연구결과 어승생 관정을 신뢰수준 95%와 99%에서 모두 뚜렷한 경향성이 나타나지 않는다고 보고하였다. 이는 분석에 활용된 자료가 상대적으로 짧은 기간(1년)에 관측되었기 때문이 판단하였다. 또한 북부지역에서 도시 및 관광지의 발달로 지하수가 지속적으로 사용되고 있음을 언급하며 지하수위 하강경향에 대한 원인을 지하수 개발(양수)과 연관하여 명확하기 판단하기 위해서는 지하수 양수량 자료가 필요하다고 제시하였다.

3. 지하수위 변동특성

1) 강수량에 따른 지하수위 변동

(1) 강수량과 지하수위의 상관관계 분석

가뭃해인 2008년(연강수량 2,129.5 mm)과 풍수해인 2012년(연강수량 4,448 mm)의 지하수위(Fig. 12)를 비교하였을 때 강수량은 약 2배 차이가 있음에도 불구하고 일정한 수위가 유지되는 것으로 분석되었다. 이는 지하수위가 강수에 영향을 받지 않음을 간접적으로 나타내는 것으로 교차상관 분석을 실시하여 강수가 지하수위에 미치는 직접적인 영향을 검토하였다.

어리목 기상관측소를 기준으로 연강수량이 2,500 mm 이하인 가뭃해는 2008년, 2009년, 2017이었다. 2008년은 관측 초기로 관측시스템이 안정화되지 않은 점과 2017년은 OW에서 양수가 있어 지하수위 거동이 인위적인 영향을 받은 것을 고려해 2009년(연강수량 2,396 mm)을 분석하였다. 풍수해는 연강수량 4,000 mm 이상인 2012년과 2019년(4,706 mm)의 2개 년도를 분석하였다.

상관분석에 앞서 자료의 전처리 과정을 수행하였다. 우선 자료를 기준 크기(0~1 범위)로 정규화(normalization)하였다(Fig. 17). 또한 상관분석은 연속형 변수로 측정된 두 변수 간의 관계를 분석하는 기법이고, 상관성이 가장 높은 최고점(peak)을 찾는 것이 목적이기 때문에 무강수(강수량 0 mm)에 대해서는 관측값을

바탕으로 보간(interpolation)하였다. 지하수위와 강수량간의 지연시간 분석은 Matlab 프로그램(Mathwork Inc.)을 이용하였고, 위 프로그램의 corrcoef 함수를 적용하였다.

분석에 사용된 코드는 아래와 같다.

```
th=0.1;
WT=OW09_d(1:end,1);
n_WT=(WT-min(WT))/(max(WT)-min(WT));
P=OW09_d(1:end,2)/1000;
n_P=(P-min(P))/(max(P)-min(P));
for ii=1:size(n_P,1)
    if (ii>=2)&&(ii<max(size(n_P)))
        if n_P(ii)==0
            n_P(ii)=(n_P(ii-1)+n_P(ii+1))/2;
        end
    end
end
for ii=1:300
    A=n_WT(1:end-(ii-1));
    B=n_P(ii:end);
    nZ=(B>th);
    [loc,val]=find(nZ);
    n_A=A(loc);
    n_B=B(loc);
    C=corrcoef(A,B);
    C_ser(ii,1)=C(1,2);
    save(['2009_corr_(C_ser).txt'],'-ascii','C_ser')
end
```

교차상관분석을 이용하여 강수량-지하수위 반응을 분석한 결과 상관계수의 범위는 2009년 $-0.2026 \sim 0.0790$, 2012년 $-0.4054 \sim 0.2920$ 그리고 2019년 $-0.2954 \sim 0.3181$ 으로 나타났다. 또한 강수량과 지하수위의 상관성이 최대가 되는 지연시간은 2009년 279일, 2012년 272일 그리고 2019년은 258일로 분석되었다(Fig. 18). 가뭄해에 비해 풍수해의 지연시간이 상대적으로 짧고, 상관성이 비교적 높게 나타났으며 관찰기간 중 가장 강수량이 많았던 2019년의 지연시간이 258일로 가장 짧고, 최대상관계수 또한 0.3181로 가장 큰 상관성을 보였다.

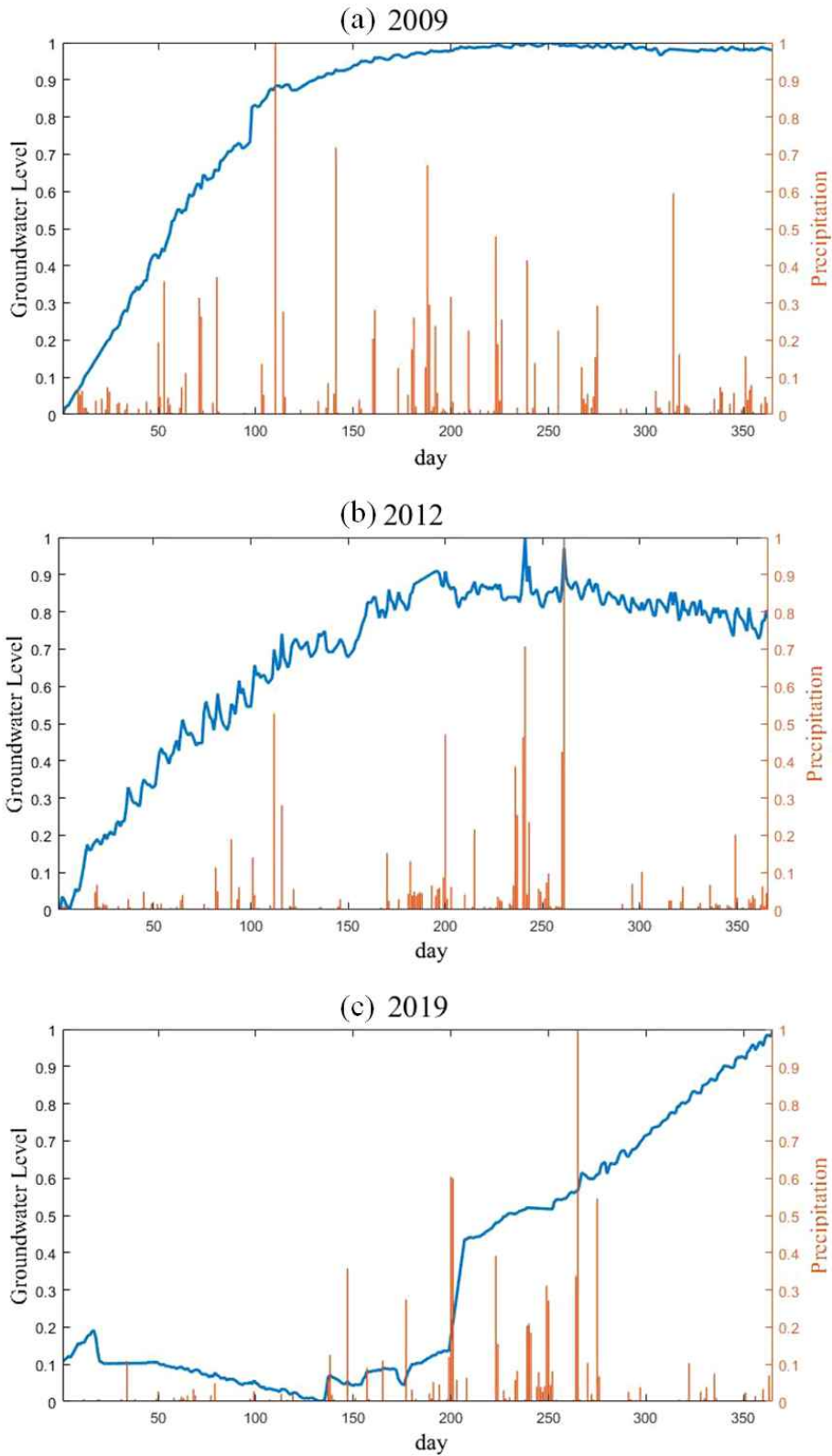


Fig. 17. Normalized groundwater level and precipitation:
 (a) 2009; (b) 2012; (c) 2019.

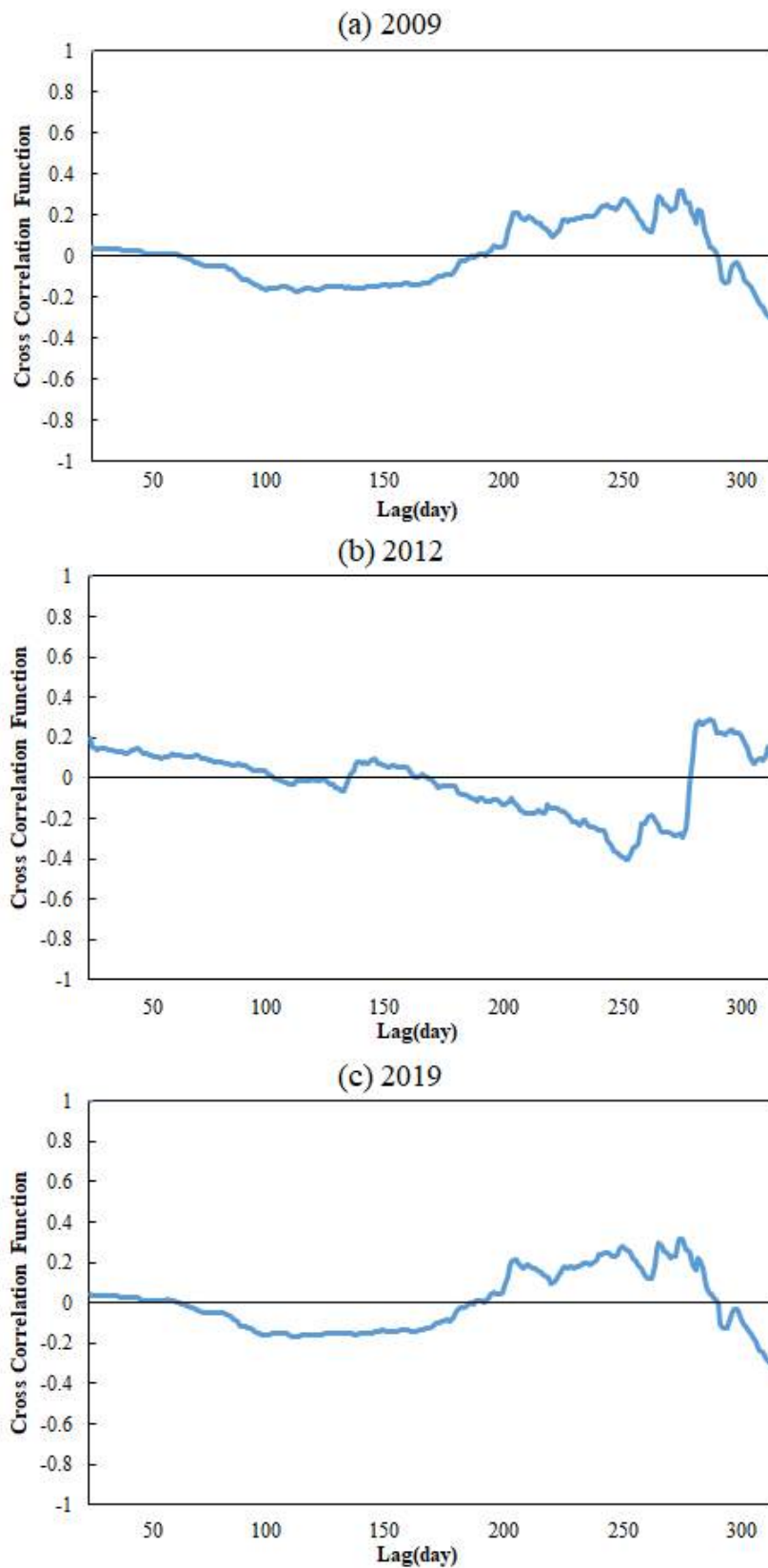


Fig. 18. Cross-correlation between groundwater level and lag
 (a) 2009; (b) 2012; (c) 2019.

연구지역의 강수량에 대한 지하수위의 교차상관계수는 -0.4054~0.3181로 낮은 상관성을 보였다. 본 연구결과를 Park et al.⁸⁾, Choi et al.⁷⁾, Song et al.¹⁵⁾, Shin et al.⁴⁹⁾의 연구와 비교해 보았다.

Park et al.,⁸⁾ Choi et al.,⁷⁾ Song et al.,¹⁵⁾ Shin et al.⁴⁹⁾은 제주도 지하수위 관측자료를 대상으로 강수량과의 상관관계를 분석하였다. Park et al.⁸⁾은 제주도 전역을 대상으로 지하수위와 강수량의 상관계수가 평균 0.47로 나타났다고 보고하였다. Choi et al.⁷⁾은 상관계수는 0.11~0.29이며 대부분 관정의 지연시간이 50일 미만이라고 보고하였다. Song et al.¹⁵⁾은 제주 북부지역의 평균 교차상관계수를 0.22, 시간지연은 3.1일이며, 어승생 지점은 0.0415의 교차상관계수와 0일의 지연시간을 나타낸다고 보고하였다. Shin et al.⁴⁹⁾은 표선유역의 중산간에 위치한 9개 관측공과 2개 기상관측소의 강수량의 상관분석 결과 평균 0.3의 상관계수를 나타냈다고 보고하였다. 제주도를 대상으로 한 연구에서도 강수량-지하수위 상관성은 낮게 나타났다. Park et al.⁸⁾의 경우 0.47로 비교적 높은 상관계수를 도출하였는데 이는 강수량이 최대인 기간(2007년 9월 전후)을 분석했기 때문이라고 판단된다. Choi et al.⁷⁾의 연구에서 상관성이 가장 낮았던(0.11, 60일) 관측정은 JH신례2로 표고 약 595.5 m에 위치한다. 따라서 고지대에서 지하수위에 강수량이 영향이 낮은 것을 확인할 수 있었다. Shin et al.⁴⁹⁾은 중산간의 표고 400~500 m 지역에서 지하수위와 강수량의 낮은 상관성을 보고하였으나, 정규화된 표준편차를 이용하여 0.8의 상관성을 도출하였다.

(2) 강수량 이동평균과 지하수위 상관관계 분석

교차상관분석 결과 개별 강우에 대한 지하수위 반응이 즉각적으로 발생하지 않아 일수별 선행 강수이동평균과 지하수위의 상관관계를 분석하였다(Fig. 19). 관찰기간은 2008년 5월 29일부터 2013년 7월 29일까지이며 10일, 20일, 30일, ... 360일의 강수이동평균과 지하수위의 상관계수를 Fig. 11에 나타내었다. 가장 높은 상관관계를 가지는 강수이동평균일수는 210과 220일로 나타났으나 상관계수는 0.1947로 상관성이 유의하지 않았다. 이는 교차상관분석에 의해 도출된 상관계수보다 더 낮은 상관성이 나타났다.

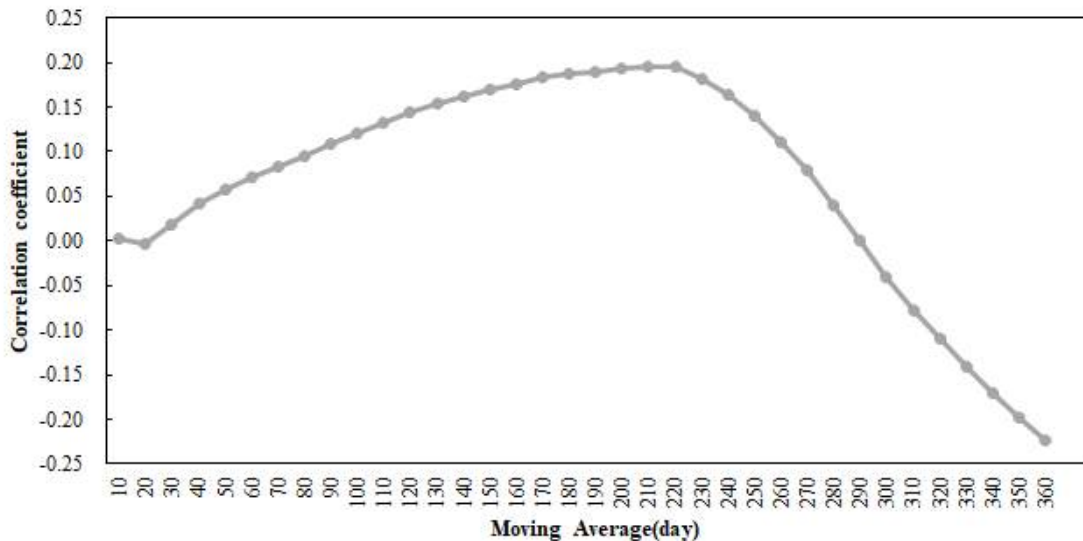


Fig. 19. Correlation between cumulative precipitation and groundwater level (2008~2013).

연구지역의 강수이동평균과 지하수위의 상관관계는 Yang and Ahn⁴⁹⁾이 낙동강 유역을 대상으로 도출한 10~80일의 이동평균일수와 0.5201~0.7727의 상관계수와, Yang and Kim³⁷⁾이 제주도 위미지역을 대상으로 도출한 90일의 이동평균일수와 0.7052의 상관계수에 비해 0.25~0.37배 낮은 결과를 보였다.

Kim et al.⁵¹⁾과 Kim⁵²⁾은 각각 연구지역의 2008~2010년, 2008~2011년 지하수위 자료를 대상으로 강우에 대한 지하수위 변동양상을 분석하였는데 공통적으로

강우 발생에 의한 지하수위 변동양상이라고 명확하게 규명하기 어렵고, 지하수위 하강부가 존재하지 않아 자연적인 지하수의 거동으로 보기 어렵다고 보고하였다. 본 연구에서도 2008~2013년 상반기 및 2018~2019년 관측자료에서 지하수위 하강부가 관찰되지 않았다. 연구대상 관정의 고도와 자연수위 값의 차이를 이용하여 비포화대를 산정하였을 때 303~333 m 범위로 두껍게 형성되어 있는 특징을 고려하면 개별 강수에 의한 지하수 함양이 중첩되며, 강수패턴과는 상관없이 지하수가 일정하게 함양되는 것으로 판단된다.⁵³⁾ 또한 북부지역은 함양량의 계절적 변동성이 가장 약하게 나타나는 지역이므로 강수에 의한 지하수위 반응이 매우 더딘 것^{54~56)}으로 이번 연구에서도 확인되었다.

이상의 결과를 종합해 보았을 때 연구지역에서는 강수가 지하수위에 도달하는 시간이 오래 걸리며, 그 영향도 작게 나타나는 것으로 판단된다. 지하수 함양지역인 중산간 이상 고지대에서는 비포화대가 두껍게 형성되기 때문에 강수에 의한 지하수 함양이 즉각적으로 발생하지 않고 비포화대를 통과하면서 시간지연과 분산이 발생한다.

2) 양수량에 의한 지하수위 변동

OW, PW1 및 PW2의 양수량과 OW에서 관측된 지하수위 및 어리목 관측소의 일강수량을 Fig. 20에 나타내었다. 생활용수 공급을 목적으로 한 양수이기 때문에 각 관정에서의 양수량은 대부분 일정량을 유지했다. 양수정 가동 경우에 따라 OW에서만 양수하였을 경우를 CASE-1, OW, PW1 그리고 PW2에서 모두 양수한 경우를 CASE-2, 양수를 하지 않은 경우를 CASE-3으로 분류하였으며 기간에 따라 각 CASE를 세부적으로 a~d로 분류하였다(Table 8). 수위 변동을 비교하기 위하여 일정기간 동안의 수위차를 해당 일수로 나누어 기간평균 변동으로 표현하였다. 또한 누적양수량과 지하수위와의 상관성을 분석하였다.

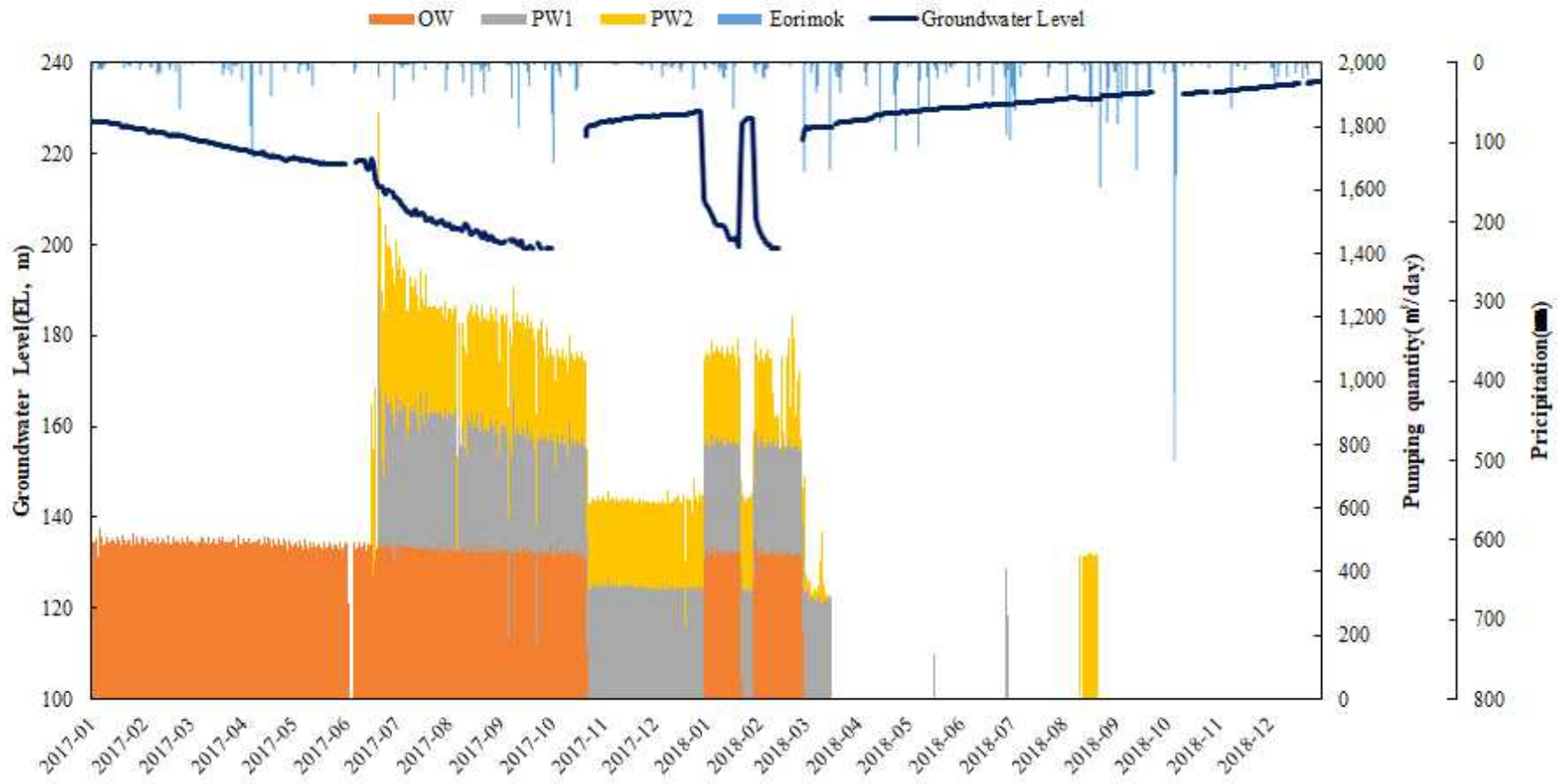


Fig. 20. Groundwater level observed in OW with pumping quantity of OW, PW1, PW2 and pricipitation.

Table 8. Type of pumping, duration and variation of groundwater level

CASE	Pumping Well	Period	day (A)	Variation(m) (B)	Period Average Variation(m/day) (B/A)
1	OW	'17. 01. 01 ~ '17. 06. 01	152	-9.51	-0.0626
2	OW, PW1, PW2	a '17. 06. 20 ~ '17. 10. 04	104	-13.55	-0.1383
		b '17. 12. 30 ~ '18. 01. 20	22	-10.7	-0.4864
		c '18. 01. 29 ~ '18. 02. 12	15	-18.18	-1.212
3	Non	a '18. 03. 16 ~ '18. 05. 15	61	3.61	0.0592
		b '18. 05. 17 ~ '18. 06. 26	41	1.25	0.0305
		c '18. 06. 29 ~ '18. 08. 09	42	1.57	0.0365
		d '18. 08. 22 ~ '18. 12. 31	132	3.7	0.028

(1) CASE-1

CASE-1은 OW에서만 양수하였다. 2017년 1월 1일부터 2017년 6월 1일까지 152일 동안 평균 492.9 m³/day 로 양수하였다. 일단위 지하수위 변동은 -1.63~0.6 m 범위 내에서 발생하였으며 해당 기간 동안 9.51 m 하강하였다(Fig. 21). 기간평균 변동은 -0.0626 m/day로 나타났다. 총 양수량은 74,927 m³로 누적양수량에 따른 지하수위는 반비례 관계가 나타났으며 결정계수(R²)는 0.9929 이었다(Fig. 22).

OW에서 약 500 m³/day을 일정하게 양수하였을 때 지하수위는 140일간 지속적인 하강 경향을 보였다. 그러나 지하수위가 217.73 m에 도달한 후에는 12일간 이후 -0.02~0.02 m 범위에서 변동하며 비교적 일정하게 유지되었다. 이는 OW에서 지하수위가 평형상태에 도달하여 더 이상 수위변동이 일어나지 않는 안정 수위에 도달한 것으로 판단된다.

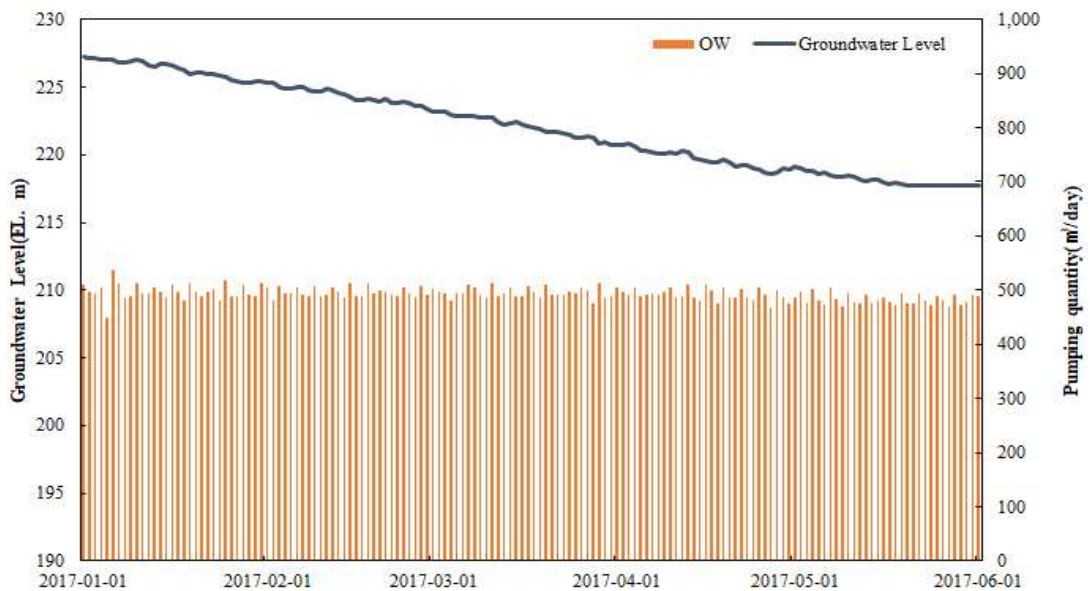


Fig. 21. Groundwater level variation and pumping quantity(CASE-1).

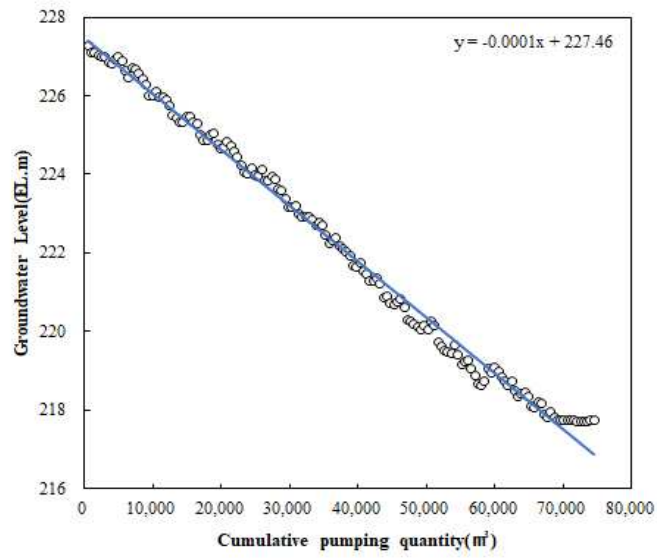


Fig. 22. Relation between groundwater level according to cumulative pumping quantity when pumped at OW well(CASE-1).

(2) CASE-2

CASE-2는 OW, PW1, PW2에서 동시에 양수하였다. 2a는 2017년 6월 20일부터 2017년 10월 1일까지 104일 동안 OW에서는 평균 464.1 m³/day, PW1에서는 평균 397.1 m³/day, PW2에서는 평균 362.6 m³/day로 양수하였다(Fig. 23). OW에서 관측된 지하수위의 변동은 -1.19~1.16m 범위 내에서 발생하였으며 해당 기간 동안 13.55 m 하강하였다. 기간평균 변동은 -0.1383 m/day로 나타났다. 총 양수량은 127,280 m³로 누적양수량에 따른 지하수위는 반비례 관계가 나타났으며 결정계수(R²)는 0.9354 이었다(Fig. 24).

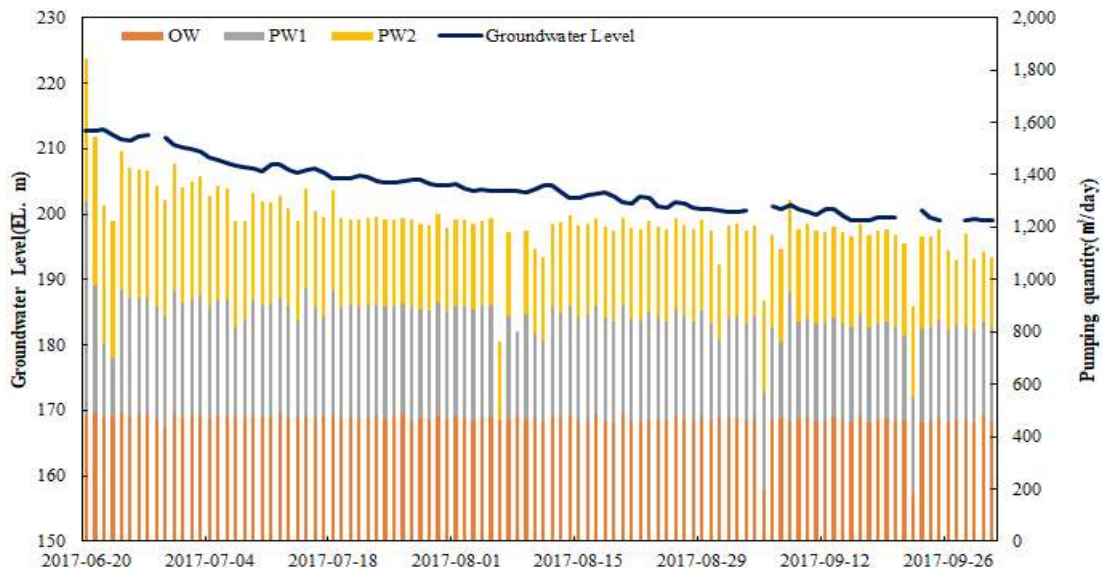


Fig. 23. Groundwater level variation and pumping quantity(CASE-2a).

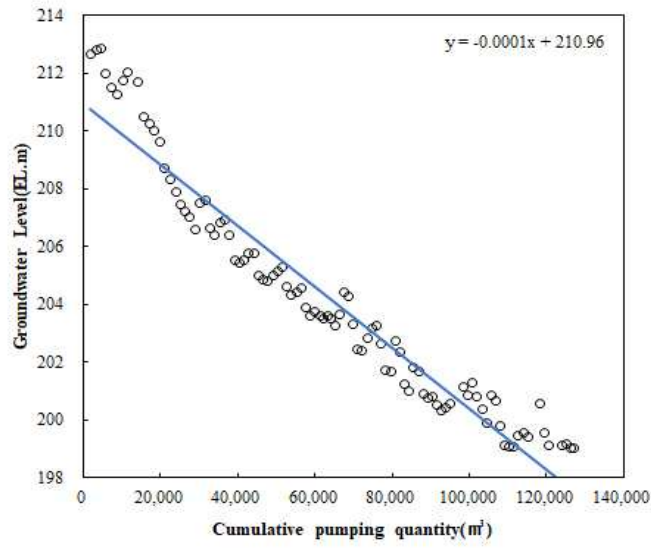


Fig. 24. Relation between groundwater level according to cumulative pumping quantity when pumped at PW1 and PW2(CASE-2a).

2b는 2017년 12월 30일부터 2018년 01월 20일까지 22일 동안 양수하였다. OW에서는 평균 461.5m³/day, PW1에서는 평균 345 m³/day, PW2에서는 평균 283.7 m³/day로 양수하였다(Fig. 25). OW에서 관측된 지하수위의 일단위 변동은 -1.48~0.51 m 범위 내에서 발생하였으며 해당 기간 동안 총 10.7 m 하강하였다. 기간평균 변동은 -0.4864 m/day로 나타났다. 총 양수량은 23,988 m³로 누적양수량에 따른 지하수위는 반비례 관계가 나타났으며 결정계수(R²)는 0.9511이었다(Fig. 26).

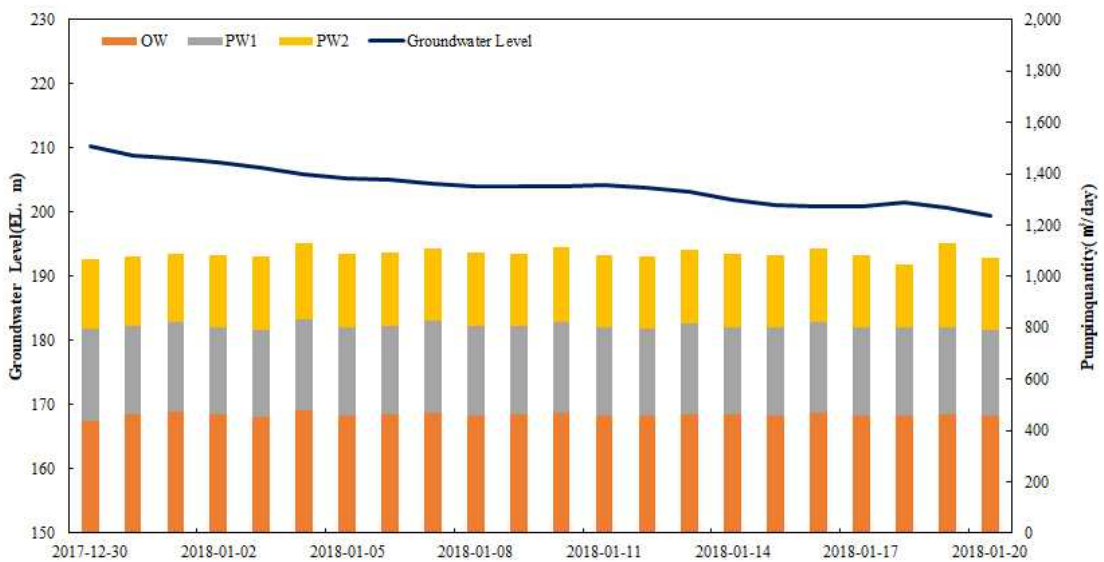


Fig. 25. Groundwater level variation and pumping quantity(CASE-2b).

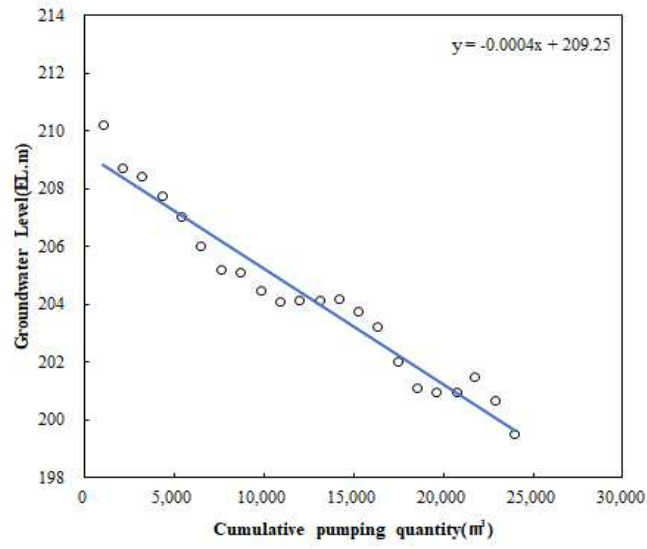


Fig. 26. Relation between groundwater level according to cumulative pumping quantity when pumped at PW1 and PW2(CASE-2b).

2c는 2018년 1월 29일부터 2018년 2월 12일까지 15일 동안 OW에서는 평균 456.6.m³/day, PW1에서는 평균 341.3 m³/day, PW2에서는 평균 222.9 m³/day로 양수하였다(Fig. 27). OW에서 관측된 지하수위 일단위 변동은 -11.25~0.14m 범위 내에서 발생하였으며 해당 기간 동안 18.18 m 하강하였다. 기간평균 변동은 -1.212 m/day로 나타났다. 총 양수량은 15,313 m³로 누적양수량에 따른 지하수위는 2차식의 관계로 나타났으며 결정계수(R²)는 0.9919이었다(Fig. 28).

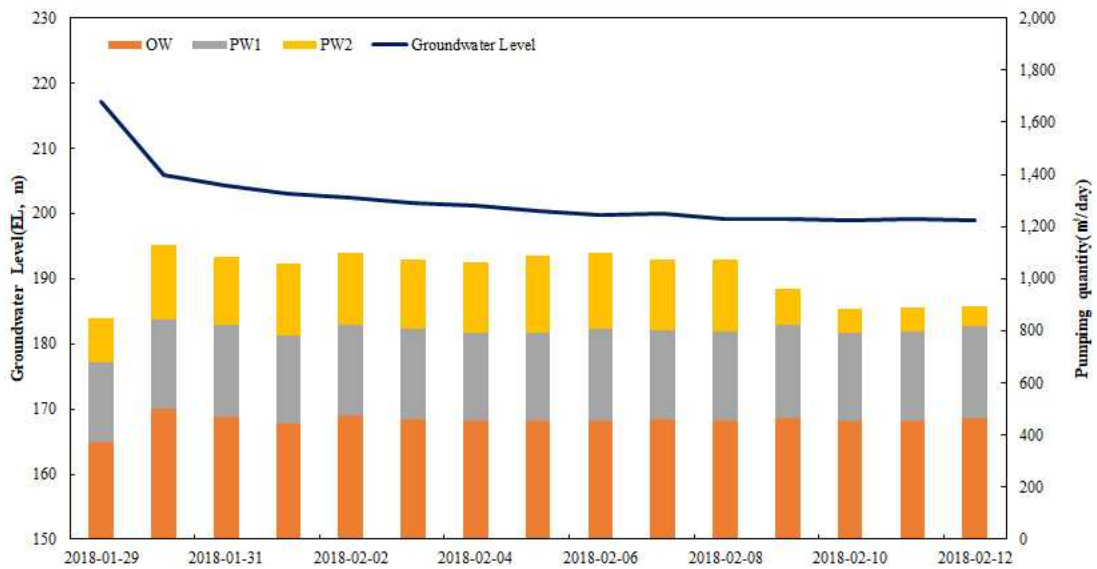


Fig. 27. Groundwater level variation and pumping quantity(CASE-2c).

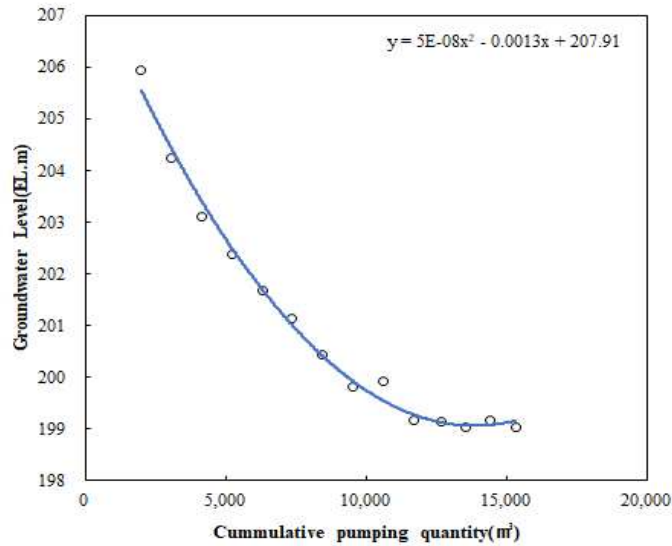


Fig. 28. Relation between groundwater level according to cumulative pumping quantity when pumped at PW1 and PW2(CASE-2c).

CASE-2에서는 공통적으로 안정수위가 관찰되지 않았고 지하수위가 약 199 m(EL)까지 지속적으로 하강하였다.

기간평균 변동을 비교하였을 때 2a에 비해 2b와 2c가 3.5배, 8.7배 높게 나타났다. 2a는 해당 기간 이전에 OW에서 양수하다 세 관정 모두 양수하였고, 2b, 2c는 이전에 PW1, PW2에서 양수하다 세 관정을 모두 양수하였다는 차이점이 있었다. 이는 양수정 가동 형태와도 관련 있지만 2a는 풍수기, 2b와 2c는 갈수기이기 때문에 수위 변동에 차이가 발생한 것으로 판단된다.

2c는 관정 가동 초기인 2018년 1월 29일 하루 동안 지하수위가 -11.25 m 하강하였고, 이를 제외하고 산정한 기간평균 변동은 -0.495 m/day로 2b와 유사하였다.

OW 자체에서 약 500 m³/day을 지속적으로 양수하였을 때 지하수위는 일평균 -0.06 m로 일정하게 하강하였다. OW, PW1, PW2에서 동시에 양수하였을 때 세 관정에서 양수량 합계는 평균 1,150 m³/day이었고 지하수위는 일평균 -0.1383~-1.212 m 범위에서 하강하였다. 식(3)에서 비롯된 Theis의 수위강하식

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (14)$$

을 살펴보면 수위강하(s)는 양수량(Q)와 비례관계에 있으므로 양수량이 많으면 수위강하가 크게 발생되며 지하수위 강하량은 2~19배 차이를 보였다.

(3) CASE-3

CASE-3은 모든 관정에서 양수를 하지 않았다. CASE-3을 기간에 따라 a~d 로 구분하였고, OW에서 관측한 지하수위를 Fig. 29 (a)~(d)로 나타내었다.

3a는 2018년 3월 16일부터 2018년 5월 15일까지 61일 동안 일단위 지하수위 변동은 -0.07~0.42 m 범위 내에서 발행하였다. 해당 기간 동안 지하수위는 3.61m 상승하여 기간평균 변동은 0.0592 m/day을 보였다.

3b는 2018년 5월 17일부터 2018년 6월 26일까지 41일 동안 일단위 지하수위 변동은 -0.06~0.16 m 범위 내에서 발생하였다. 해당 기간 동안 지하수위는 1.25 m 상승하였으며 기간평균 변동은 0.0305 m/day을 보였다.

3c는 2018년 06월 29일부터 2018년 8월 9일까지 42일 동안 일단위 지하수위 변동은 -0.04~0.26 m 범위 내에서 발생하였다. 해당 기간 동안 지하수위는 지하수위는 1.57 m 상승하였으며 기간평균 변동은 0.0365 m/day을 보였다.

3d는 2018년 8월 22일부터 2018년 12월 31일까지 132일 동안 일단위 지하수위 변동은 -0.09~0.45 m 범위 내에서 발생하였다. 해당 기간 동안 지하수위는 3.7 m 상승하였으며 기간평균 변동은 0.0280 m/day을 보였다.

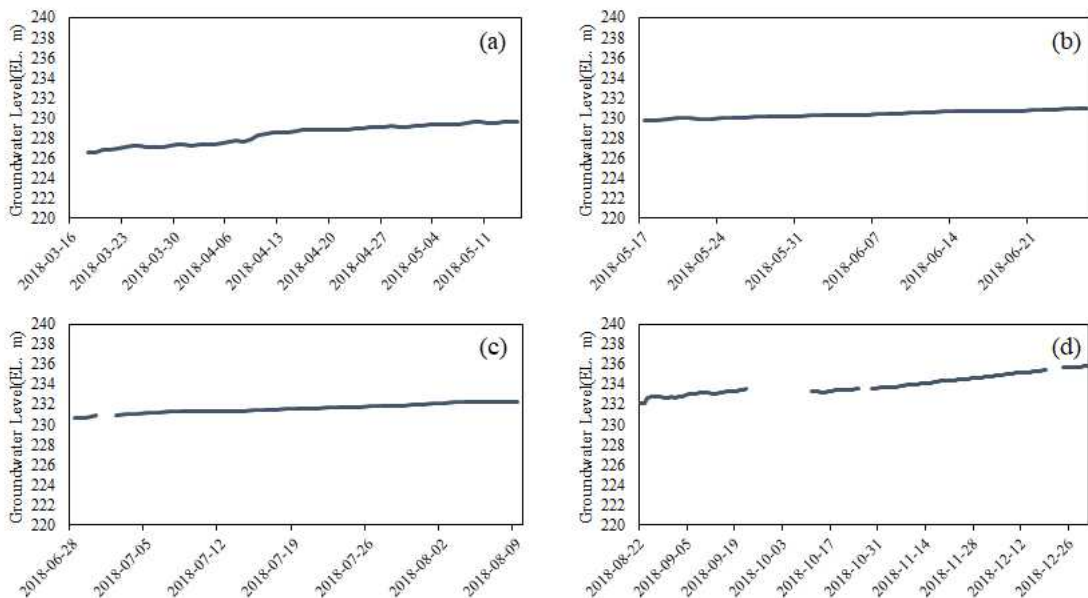


Fig. 29. Groundwater hydrograph of OW well when not pumped in all wells: (a)CASE-3a; (b)CASE-3b; (c)CASE-3c; (d)CASE-3d.

IV. 결론

본 연구에서는 제주도 어승생 지역에 위치한 지하수 관정의 수리특성과 강수 및 양수에 의한 지하수위 변동 특성을 분석하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

지하수 관정의 수리특성을 알아보기 위하여 지질주상도를 이용하여 연구지역의 관측정(OW)과 지하수 관정(PW1, PW2)의 특성을 조사한 결과, 각 관정별 지질특성은 각각 다른 특징을 보였으며 거리가 127.7~233.2 m로 그리 떨어져 있지 않음에도 대수층의 연결성 및 유사성을 찾기는 어려웠다.

양수에 의한 변동을 보면, 단일양수(OW)와 동시양수(OW, PW1, PW2)를 실시했을 경우의 지하수위 강하량은 2~19배 차이를 보이고 있어 양수에 의한 수위변동 특성을 보이고 있어 각 관정별로 개별적 수리특성을 보이더라도 하류지역 양수에 의한 영향이 나타난다고 해석할 수 있었다.

강수량과 지하수위 상관관계를 분석한 결과, 모든 조사 기간에서 상관성이 -0.4~0.3으로 낮게 나타났다. 상관관계가 최댓값을 보이는 곳의 지연시간은 258~279일로 나타났으며 강수이동평균과 지하수위의 상관성은 210일과 220일에 가장 크게 나타났으나 그 값은 0.1947로 강수에 의한 수위영향은 크지 않은 것으로 분석되었다.

양수를 하지 않는 상태에서 지하수위 회복 능력을 분석한 결과를 보면 1일 0.02~0.03 m 상승하였으며, 연구지역에서 1일 양수할 경우에 회복기간은 4.6~60.6일이 소요되는 것으로 분석되었다.

연구대상지역의 각 관정별 투수량계수를 조사한 결과, OW 37.73 m³/day PW1 9.33 m³/day 그리고 PW2 13.18 m³/day로 분석되어 각 관정별 개별적인 수리특성을 보이고 있었다. 이는 제주도 북부유역의 지하수 관정에 대한 조사한 투수량계수(기하평균) 값의 0.7~7% 수준으로 연구관정들은 대수층이 잘 발달되지 않아 양수에 의한 하강은 크고 회복속도는 느린 것으로 사료되었다. 양수시험자료를 이용한 대수층 수리특성 산출방법으로 여러 해석방법 적합성을 고려해 보았을 때 연구지역의 관정들은 우물저장효과를 고려할 수 있는 Moench법이 가장 적절한 것으로 분석되었다.

본 연구를 통해서 알 수 있었던 것은 지하수 관정의 지하수위 변동특성을 조사하기 위해서는 장기간의 강수량자료와 양수량, 지하수위 자료 그리고 정확한 지질 특성 등이 필요하고 이러한 자료들이 전부 구축된다면 지하수 관정의 지하수위를 예측하는 데 큰 도움이 될 것으로 사료되며 본 연구결과는 어승생 수원지 주변 관정의 지하수위 변동 특성을 파악하는데 유용한 자료로 활용할 수 있다.

참 고 문 헌

1. JSSGP(Jeju Special Self-Governing Province), K-water, Water resources management comprehensive plan 2018-2022(2018).
2. G. W. Koh, Characteristics of the groundwater and hydrogeologic implications of the Seogwipo formation in Cheju Island, Ph.D. thesis, Pusan National University, Korea(1997).
3. I. M. Chung, W. S. Nam, M. K. Kim, G. A. Choi, G. P. Kim, Y. S. Park, Determination of proper probability distribution for groundwater monitoring stations in Jeju Island, *J. Soil & Groundwater Env.*, 23(1), 41-53(2018).
4. B. S. Kim, S. Y. Hamm, C. M. Lee, S. I. Ok, E. J. Cha, Y. S. Ko, Features of regional hydrology and groundwater distribution of volcanic rocks in Jeju Island, *J. Geol. Soc. of Korea*, 47(3), 263-276(2011).
5. G. B. Kim, J. W. Kim, J. H. Won, G. W. Koh, Regional trend analysis for groundwater quality in Jeju Island-focusing on chloride and nitrate concentrations-, *J. Korea Water Resources Association*, 40(6), 469-483(2007).
6. J. S. Hahn, K. S. Hahn, C. K. Kim, N. J. Kim, C Hahn, Sustainable yield of groundwater resources of the Cheju Island, *J. Korean Soc. Groundwater Env.*, 1(1), 33-50(1994).
7. H. M. Choi, Y. J. Lee, Parametric and non-parametric trend analysis for water levels of groundwater monitoring wells in Jeju Island, *J. Soil & Groundwater Env.*, 14(5). 41-50(2009).
8. W. B. Park, G. P. Kim, J. H. Lee, D. C. Moon, S. J. Kim, G. W. Koh, S. J. Pang, I. C. Pang, Variation of groundwater level and recharge volume in Jeju Island, *J. Env. Sci.*, 20(7), 857-872(2011).
9. H. M. Choi, Y. J. Lee, G. C. Ha, G. P. Kim, The study on time series analysis of groundwater data and groundwater recharge in Jeju Island,

- J. Eng. Geology*, 21(4), 337–348(2011).
10. S. B. Jo, B. C. Jeon, E. G. Park, K. J. Choi, S. H. Song, G. P. Kim, Estimation of hydraulic characteristics and prediction of groundwater level in the eastern coastal aquifer of Jeju Island, *J. Env. Sci. Int.*, 23(4), 661–672(2014).
 11. I. M. Chung, J. W. Lee, S. W. Chang, Long-term prediction of groundwater level in Jeju Island using artificial neural network model, *J. Korean Soc. of Civil Eng.*, 37(6), 981–987(2017).
 12. D. K. Todd, Groundwater hydrology, second edition, John Wiley & Sons Inc, p.38(1980).
 13. J. T. Charls, William M. A., Ground-Water-Level Monitoring and the Importance of Long-Term Water-Level Data, U.S. Geological Survey., 6(2001)
 14. B. S. Choi, Determination of aquifer characteristics from specific capacity data of wells in Cheju island, *J. Korean Soc. Groundwater Env.*, 6(4), 180–187(1999).
 15. S. H. Song, K. J. Cho, J. S. Kim, Evaluation of regional characteristics using time-series data of groundwater level in Jeju Island, *J. Env. Sci. Int.*, 22(5), 609–623(2013).
 16. S. H. Song, J. Y. Lee, M. J. Yi, Evaluation of long-term data obtained from seawater intrusion monitoring network using variation type analysis, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 28, 478–490(2007).
 17. S. I. Ok, S. Y. Hamm, B. S. Kim, J. Y. Cheong, N. C. Woo, S. H. Lee, G. W. Koh, Y. S. Park, Characteristics of aquifer system and change of groundwater level due to earthquake in the western half of Jeju Island, *Econ. Environ. Geol.*, 43(4), 359–369(2010).
 18. D. H. Kang, W. I. Yang, T. Y. Kim, H. J. Park, B. H. Kwon, The variation characteristics of groundwater level with distance from shoreline in the Jeju Island, *J. Eng. Geol.*, 18(2), 157–166(2008).
 19. JSSGP, K-water, Comprehensive survey of hydrological geology and

- groundwater resources in Jeju Island(III), Jeju, Korea(2003).
20. F. G. Bell, Engineering Geology, 2nd ed., pp. 581(2007).
 21. JSSGP, Jeju Island geologic columnar section sourcebook II. pp. 740-743(2012).
 22. Namcheon Engineering Co., Ltd., 『Eco-friendly replacement intake reservoir(Eoseungsaeng well No. 1, Haean-dong)』 groundwater development project(license number : W201610003) completion report, pp. 30-34(2017).
 23. Jinsan Engineering Co., Ltd., 『Eco-friendly replacement intake reservoir(Eoseungsaeng well No. 2, Haean-dong)』 groundwater development project(license number : W201610004) completion report, pp. 21-23(2017).
 24. S. H. Park, G. W. Koh, J. B. Park, D. C. Moon, W. S. Yoon, Study of geological log database for public wells, Jeju Island, *Econ. Env.*, 48(6), 509-523(2015).
 25. R. C. Heath, Basic ground-water hydrology, U. S. Geol. Survey, Water-Supply Paper 2220(1983).
 26. Y. J. Woo, S. Y. Hamm, J. Y. Chung, S. S. Lee, C. Y. Jung, Y. S. Park, B. S. Kim, Hydraulic characteristics of volcanic rock aquifer in Jeju Island by pumping test analysis, in *Proceedings of the Soil & Groundwater Env. fall conference, CoSSGE*, Seongnam, pp. 292-295(2003).
 27. S. Y. Hamm, J. Y. Cheong, S. Jang, C. Y. Jung, B. S. Kim, Relationship between transmissivity and specific capacity in the volcanic aquifers of Jeju Island, Korea, *J. Hydrol.*, 310, 111-121(2005).
 28. H. H. Cooper, C.E. Jacob, A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. Transactions American Geophysical Union, 27, 526-534(1946).
 29. M. S. Hantush, Drawdown around a partially penetrating well, *J. Hyd. Div., Proc. of the Am. Soc. of Civil Eng.*, 87(4), pp. 83-98(1961).

30. A. F. Moench, Combining the Newman and Boulton models for flow to a well in an unconfined aquifer, *Groundwater*, 33(3), 378–384 (1985).
31. C. V. Theis, The relation between the lowering of the poezometric surface and rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Transamer, Geopys, Union*, v. 2, 519–524 (1935).
32. G. W. Koh, B. R. Kang, D. C. Moon, Hydrogeologic and groundwater management system of Jeju Island, *Jeju · Hawaii Water Forum*, JSSGP, Jeju, Korea, pp. 134–165(2006).
33. JSSGP, Water resources management comprehensive plan 2013–2022(2013).
34. J. W. Kim, Characteristics of water level change and hydrogeochemistry of groundwater from national groundwater monitoring network, Korea: geostatistical interpretation and the implications for groundwater management, Ph.D. thesis, Korea University, Korea (2012).
35. R. Yafee, McGee, Introduction to time series analysis and forecasting, Academic Press(2000).
36. S. K. Moon, N. C. Woo, Estimation of groundwater recharge ration using cumulative precipitation and water–level change, *J. Soil & Groundwater Env.*, 6(1), 33–43(2001).
37. J. S. Yang, N. K. Kim, The correlation between the moving average of precipitation and groundwater level in Korea, *J. Korea Soc. of Civil Engneers*, 20(3), 74–82(2011).
38. Cheju Provincial Government, KIGAM, Geological map of Korea, scale 1 : 50 Cheju–Aewol, Jeju, Korea(1998).
39. KIGAM(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), Integrated analysis of groundwater occurrence in Jeju, Korea, pp. 29–45(2005).

40. Ministry of Environment, K-water, Basic groundwater survey of Jeju region, (2018).
41. L. S. Kang, S. Y. Hamm, S. J. Choi, B. D. Lee, Hydrogeologic property of bedrock aquifer of Mockcheon area applying several pumping test analysis, *J. Engineering Geol.*, 13(1), 67–82(2003).
42. H. J. Lee, Y. H. Yoon, K. W. Jun, Analysis of groundwater drawdown due to simultaneous multiple pumping, *J. Korean Soc. Env. Tec.*, 5(4), 325–330(2004).
43. JSSGP, Analyze of the causes seawater intrusion in the western watershed(Hangyeong–Hallim) and prepare appropriate management measures, (2019).
44. S. K. Jeon, M. H. Koo, Y. J. Kim, I. O. Kang, Statistical analysis of aquifer characteristics using pumping test data of national groundwater monitoring wells for Korea, *J. Soil and Groundwater Env.*, 10(6), 32–44(2005).
45. K. O. Chin, S. K. Yang, Characteristics of bearing in middle area of halla mountain in jeju island, Bulletin of the marine research institute Cheju National University, 25, 31–39(2001).
46. B. S. Choi, A method for storativity compensation in single well test analysis, *J. Soil and Groundwater Env.*, 12(3), 36–43(2007).
47. J. S. Cho, Importance of well storage effects in the analysis of pumping that in Jeju Island, master' s thesis, Konghu National University, Korea(2020).
48. B. S, Kim, A study on hydrogeological characterisrics of volcanic rocks in Jeju Island, Ph.D. thesis, Jeju National University, Korea(2011).
49. M. J. Shin, S. H. Moon, D. C. Moon, Analysis of groundwater level variability in the middle mountain area of Pyoseon watershed in Jeju Island using normalized standard deviation and cross correlation coefficient, *J. Korea Water Resour. Assoc.* 53(5), 337–345(2020).
50. J. S. Yang, T. Y. Ahn, The correlation between goundwater level and

- moving average of precipitation in Nakdong river watershed, *J. Eng., Geol.*, 17(4), 499–502(2007).
51. N. W. Kim, Y. J. Kim, I. M. Chung, Sensitivity analysis of hydrologic parameter by groundwater table fluctuation model in Jeju Island, *J. Korean Soc. of Civil Eng.*, 34(5), 1409–1420(2014).
52. Y. J. Kim, Estimation of recharge time series by groundwater table fluctuation method combined with watershed hydrologic model, Ph.D. thesis, Pukyong National University, Korea(2017).
53. K. H. Shin, Analysing effects of the unsaturated zone thickness on groundwater recharge in Jeju Island: use of a convolution method, master' s thesis, Kongju National University, Korea(2012).
54. J. G. Ham, A study on the fluctuations of groundwater level due to rainfall in the mid–mountain area, Jeju Island, master' s thesis, Jeju National University, Korea(2000).
55. K. H. Shin, M. H. Koo, I. M. Chung, N. W. Kim, G. P. Kim, Analyzing spatio–temporal variation of groundwater recharge in Jeju island by using a convolution method, *J. Env. Sci. Int.*, 23(4), 625–635 (2014).
56. S. G. Kim, M. H. Koo, I. M. Chung, Development of a transient groundwater flow model in Pyoseon watershed of Jeju Island: use of a convolution method, *J. Env. Sci. Int.*, 24(4), 481–494(2015).