ORIGINAL ARTICLE

시계열 자료를 이용한 제주도 지하수위의 지역별 특성 분석

송성호* · 최광준 · 김진성

한국농어촌공사 농어촌연구원

Evaluation of Regional Characteristics Using Time-series Data of Groundwater Level in Jeju Island

Sung-Ho Song*, Kwang-Jun Choi, Jin-Sung Kim

Rural Research Institute, KRC, Ansan 426-170, Korea

Abstract

Fluctuation patterns of groundwater level as a factor that reflects the characteristics of groundwater system can be categorized as the various types of aquifer with the time-series data. Time-series data on groundwater level obtained from 115 monitoring wells in Jeju Island were classified according to variation types, which were largely affected by rainfall(Dr), rainfall and pumping(Drp), and unknown cause(De). Analysis results indicate that 106 wells belong to Dr and Drp and the ratio of the wells with the wide range of fluctuation in the western and northern regions was higher than that in the eastern and southern regions. From the results that Drp is relatively higher than Dr in the western region which has the largest agricultural areas, groundwater level fluctuations may be affected significantly due to the intensive agricultural use. Non-parametric trend analysis results for 115 monitoring wells show that the increasing and decreasing trends as the ratio of groundwater levels were 14.8% and 22.6%, respectively, and groundwater levels revealed to be increased in the western, southern and northern regions excluding eastern region. Results of correlation analysis that cross-correlation coefficients and the time lags in the eastern and western regions are relatively high and short, respectively, indicate that the rainfall recharge effect in these regions is relatively larger due to the gentle slope of topography compared to that in the southern and northern regions.

Key words : Groundwater level, Variation type, Jeju, Monitoring well, Correlation analysis

1. 서론

지하수위(groundwater level)는 대수층 내의 기압을 고도로 나타낸 것으로, 자유면대수층과 피압대수층에 대해 각각 지하수면(water table)과 피압면(piezometric surface)으로 구분하여 표현된다(Todd, 1980). 이러한 지하수위 변화는 인간의 활동에 의한 인위적인 영향과 더불어 기후변화 등 자연적인 영향

이 포함된 다양한 수문학적 현상에 의해 지배를 받고 있는데, 수년 이상의 영년변화(secular variation), 지하수 양수, 인공함양 등과 같은 장주기의 변화와 함양, 강수량, 대기압, 지진, 조석 등의 계절적 또는 단주기 변화의 영향을 동시에 받고 있다(Bredehoeft, 1967; Freeze와 Cherry, 1979; Todd, 1980).

해안지역 대수층의 경우에는 조석 변화와 더불어 양수 및 강수에 의한 지하수위 변동에 따라 해수썰기

Received 11 December, 2012; Revised 7 May, 2013;

Accepted 9 May, 2013

*Corresponding author : Sung-Ho Song, Rural Research Institute, KRC, Ansan 426-170, Korea
Phone: +82-31-400-1723
E-mail: shsong84@hanmail.net

© 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.

의 변동이 영향을 받는다. 그러나 이러한 지하수위 변동특성은 대상지역의 수리지질학적 특성에 따라 다르게 나타나는데, 우리나라의 경우에는 이러한 특성 파악을 위하여 해안지역 소유역별로 해수침투 관측망을 설치하여 유역 단위별로 해수침투 양상을 포함한 다양한 수리지질학적 특성을 분석하고 있다(Song 등, 2007; Song과 Zemansky, 2012). 이러한 해수침투 관측망은 해안 및 도서지역에 대해 지하수개발 이용으로 인한 해수침투 영향을 사전에 조사하여 피해예방을 수립하고 합리적인 지하수 이용관리 계획수립에 필요한 기초 자료를 수집하기 위하여 1998년부터 연차적으로 설치하여 2012년 말까지 127개소가 운영 중이다(MIFFAFF과 KRC, 2012).

본 연구의 대상지역인 제주도는 약 2백만 년 전의 화산활동으로 형성된 현무암과 국부적인 조면암, 조면암질 안산암 및 소규모의 퇴적암으로 구성된 섬지역으로, 내륙지역에 비해 상대적으로 강수량이 풍부한 반면 수리지질 측면에서 비포화대의 높은 투수성으로 인하여 강수에 의한 지하수 함양률이 매우 높은 편이다(Koh, 1997). 또한 화산암의 특성 상 수평적인 투수성이 높아 지하수위가 내륙에 비해 매우 깊게 형성된다. 이에 따라 약 180개의 하천 중 상시하천(perennial stream)은 한라산을 중심으로 남북에 각각 2곳씩만 형성될 정도로, 대부분의 하천은 건천을 이루고 있다. 이러한 수리지질학적 특성 때문에 제주도 수자원의 약 98% 이상을 지하수가 담당하고 있다(Won 등, 2006). 제주도의 지하수위 변동과 관련되어 지금까지 분석된 결과는 자연적인 요인으로 강우량과 해양조석에 의한 영향이 지배적이며, 강우지배형, 조석지배형 및 강우와 조석혼합형으로 세분된 사례가 있다(Park 등, 1994; Koh, 1997).

대수층에 대한 지하수위 변동 특성과 관련하여 Song 등(2007)은 내륙지역 해안 소유역에 설치한 해수침투 관측망을 대상으로 장기관측자료(지하수위, 수온, 전기전도도)의 변동형태에 따라 정상형, 추세형, 주기형, 충동형, 계단형, 경사형 등 6가지로 분류하였으며, 이 중 충동형이 73.3%에 해당되어 지하수위에 가장 많은 영향을 미치는 인자로서 강수와 지하수 양수를 제시한 바 있다. 또한 이러한 변동유형별로 분류된 관측정별 장기관측자료를 지하수질 결과 및 정거

적인 지하수검층 결과와 함께 종합적으로 해석하는 경우, 향후 우리나라 해안 및 도서지역의 지하수자원 관리 및 해수침투 관련 업무에 활용이 가능할 것으로 제시하였다.

본 연구에서는 제주특별자치도 수자원본부에서 제주도의 지하수계를 장기모니터링 하기 위해 설치된 115개 지하수위 관측망을 대상으로, 장기 관측자료를 이용한 변동유형, 경향성 및 상관성 분석을 통하여 지역별 향후 지하수 이용량 변화에 따른 지하수 부존량 평가에 기초자료로 활용하도록 제시하였다.

2. 연구재료 및 방법

일반적으로 지하수위, 수온 및 전기전도도 등 시계열 자료는 대수층 특성별로 변동 유형이 다양하게 나타나며, 이 중 지하수위의 경우는 지하수 시스템의 물리적 특성을 반영하는 인자로 우리나라의 경우 내륙 지역의 장기관측망 자료를 대상으로 시계열 분석을 이용한 체계적인 연구가 진행되고 있다(Yi 등, 2004; Song 등, 2007).

제주도의 경우 수자원의 효율적인 관리를 위하여 제주특별자치도 수자원본부에서 총 115개소의 지하수 관측망(2011년 현재)을 설치·운영하고 있으며, 매일 24시간 간격으로 1회 지하수위를 측정하여 홈페이지에 공개하고 있다(Lee 등, 2007; Kim 등, 2009; IERR, 2012)(Fig. 1). 이러한 관측정들은 지하수위 관측용, 해수침투 관측용 및 고지대 관측용으로 구분하여 관리되고 있으며, Choi와 Lee(2009)는 2008년 말 기준으로 관측정 106개 중 해발고도 100 m 이하와 100~200 m 범위에 설치된 관측정이 각각 70개(66%)와 23개(22%)로 대부분이 비교적 낮은 고도에 위치하는 것으로 분석한 바 있다. 그러나 이 연구는 제주도 전역의 지하수위 변동 특성을 시계열 자료의 경향성 분석 결과만으로 제시함에 따라, 제주도 지하수위 변동에 중요한 인자인 지역별 함양 특성과 용수 수요 특성을 반영하지 못한 것으로 판단된다. 또한 제주도의 관측정 자료를 포함한 대수층에 대한 특성 연구는 Koh 등(1998)이 해안대수층의 담·염수 경계면 근처의 담수 대수층의 특성 사례에 대한 분석 결과가 있으며, Kim 등(2005)은 제주 동부의 관측망 자료를 이용

Fig. 1. Regional classification for 115 groundwater monitoring wells with three representative variation types in Jeju Island.

하여 해안대수층의 지하수위 변동 특성 중 조석의 영향을 분석하여 해안선으로부터 약 3~5 km까지 조석의 영향을 받는 것으로 분석한 바 있지만 이 경우는 제주지역 일부지역에 대한 대수층의 특성을 파악한 결과이다.

본 연구와 같이 장기관측자료를 분석하는 경우 관측지점 주변에서 발생하는 지하수 이용 등 물리적인 변화나 관측장비 및 통신장비 이상 등으로 시계열 자료가 정상적이지 못한 경우에는, 전체적인 관측자료의 통계적 특성을 파악하는 것은 어렵다(Yi 등, 2005). 따라서 본 연구에서는 장기관측자료 분석을 위하여 1년 이상 관측자료가 축적된 총 115개 관측정별로 자동 관측된 지하수위 자료에 대하여, 통계적으로 일관성을 유지하기 위하여 매 12시 정각에 측정된 일자료를 이용하였다.

2.1. 관측자료의 변동유형 분석

시계열 관측자료는 변동 특성이나 경향에 따라 다양한 구분법이 적용될 수 있다. 본 연구에서는 Song 등(2007)이 내륙지역 해수침투 관측망 자료 평가를 위해 사용한 6가지의 시계열 자료의 변동유형 - 정상적(constant process), 선형추세(linear trend), 주기적

(cyclic variation), 충동적(impulse), 계층적(step function), 경사(ramp) 변화 - 에 대하여 지하수위 변화를 적용하여 분석하였다. 이때 지하수위는 지하수 시스템의 변동을 지시하기 때문에 대수층의 특성을 파악하는데 매우 중요하다(Song 등, 2007). 변동유형 분석은 풍부한 강수량과 비포화대의 높은 투수성 등 제주지역 대수층 특성을 가장 잘 반영할 수 있는 충동적 변화 경향을 적용하여 분류하였다. 이러한 충동적 유형을 기초로 강수에 의한 영향(Dr), 강수와 양수에 의한 동시 영향(Drp) 및 특별한 영향요인이 없는 경우(De)로 세분하였으며, 변동폭에 따라 양수 등 인위적인 변동 원인 분석을 실시하였다.

2.2. 관측자료의 경향성 분석

지하수위, 수온 및 전기전도도 등 장기관측자료는 시계열 변동자료로 대수층 특성별로 변동 유형이 다양하게 나타나는데, 본 연구에서는 시간변화에 따라 관측되는 자료에 대해 선형회귀분석을 이용한 경향성 분석(trend analysis)과 비모수적(non-parametric) 경향성 분석을 동시에 실시하였다. 이와 더불어 강수량과 조석에 의한 지하수위 상관성을 분석하기 위하여 자기상관분석과 교차상관분석 방법을 이용하여 조석

의 영향을 받는 관측정들을 분류하였다.

본 연구에서 활용된 시계열 자료 분석은 해안과 가까운 대수층의 지하수위 변동 자료를 해석하기 위한 중요한 방법 가운데 하나로(Song과 Zemansky, 2013), 최근에는 상대적으로 짧은 기간 동안의 지하수위 변동 자료 해석에 대한 활용성이 증대되고 있다(Ataie- Ashtiani 등, 1999; Song 등, 2007). 시계열 분석법 중 Mann-Kendall 방법을 이용하는 비모수적 경향성 분석 방법은 특정한 신뢰수준 내에서의 경향성을 결정하는 방법으로(Salmi 등, 2002), 경향을 나타내는 선형 기울기로 Sen's 방법을 이용하였다(Gilbert, 1987).

2.3. 관측자료의 상관성 분석

상관분석은 한 변수가 변화할 때 다른 변수의 변화 정도를 파악하는 통계적 분석 방법으로, 본 연구에서는 자기상관(auto-correlation)과 교차상관(cross-correlation) 분석을 실시하였다. 자기상관도는 관측시점별로 관측자료가 어느 정도 관련이 되어있는지를 나타내는 것으로, 만약 시계열 관측값이 임의적으로 발생한다면 연속된 두 관측값은 상관성이 없으므로 자기상관함수에서 시차에 따른 유의한 값이 나타나지 않는다. 반면 관측값이 완만하게 변화할 경우는 자기상관함수가 서서히 감소하는 형태를 띠게 된다. 교차상관도는 두 가지의 서로 다른 시계열의 일정시차의 상관관계를 나타내는 것으로, 교차상관함수는 -1.0~+1.0 사이의 범위를 보여주는데 상관도가 높을수록 최고점에서 교차상관값이 크게 나타난다(Yaffee와 McGee, 2000).

3. 결과 및 고찰

3.1. 관측자료의 변동유형

지하수위는 대수층으로 구성된 지하수 시스템의 변동을 지시해 주기 때문에, 지하수위 변동 유형을 분류하는 경우 강수, 양수, 조석변화 등 외부 인자들의 변화에 대한 반응 유형을 분류하는 것이 필요하다(Song 등, 2007). 또한 이 경우에는 지하수위의 변동 폭을 분석하고, 상승 또는 하강 등의 경향성을 세분화하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 전체 115개 관측정을 동부지역(30), 서부지역(22), 남부지역(26), 북부지역(37)에 대해 각 지역별로 구분하였는데, 이 중 해발

고도 200 m 이상에 위치하는 관측정은 각각 1, 1, 7, 7 개소로 나타났다. 특히 동부와 서부지역의 경우에는 해발고도 400 m 이상의 중산간 지역에 위치한 관측정이 없는 반면 남부와 북부지역에는 각각 2개소(JM3 546.0 m, SL2 600 m)와 4개소(EE3 415.0 m, GR1 429.5 m, GR2 439.0 m, ESS 615.2 m)가 분포하는 것으로 나타났다. 중산간지역의 관측정 분포가 남부와 북부지역에 분포하는 것은 전반적으로 남북방향으로 경사가 급한 제주도의 지형적 특성을 반영하는 것으로 판단된다(Table 1)(Fig. 1). 해발고도 50 m 이하에 분포하는 관측정의 비율은 지형적인 특성을 반영하여 동부와 서부지역에 각각 12개소(40%)와 15개소(68%)로, 남부와 북부지역의 6개소(23%)와 11개소(30%)로 전체 관측공수에 비해 편차가 크게 나타났다. 동부와 서부지역의 관측정들은 주로 침상장석 갑암석 현무암(FOB) 분포지역에 위치하는 가운데 동부지역 일부 관측정들은 비현정질 현무암(APB) 지역에 분포하는 것으로 나타났다. 남부지역의 경우에는 장석현무암(FB)과 반상장석 현무암(PFB) 지역에 주로 분포하는 반면 북부지역은 반상휘석 현무암(PAB) 지역이 우세한 것으로 나타났다.

각 관측공에서 측정된 지하수위 변동은 앞서 제시한 바와 같이 충동적 유형의 3가지로 분류하였으며, 변동폭은 각각 자연적인 변동 원인인 강수와 인위적인 변동 원인인 양수의 영향을 고려하여 2 m를 기준으로 I형(2 m 이상)과 II형(2 m 미만)으로 구분하였다(Song 등, 2007) (Table 2).

전체 115개 관측정을 4개의 지역별로 도시하면 강수와 양수에 의한 동시 영향(Drp)을 받는 관측정과 강수에 의한 영향(Dr)을 받는 관측정은 해발고도 200 m 이하에 주로 분포하며, 이 중 강수와 양수에 의한 동시 영향(Drp)을 받는 관측정이 상대적으로 해안선에 가깝게 분포하는 동심원 형태로 나타났다(Fig. 1). 반면 특별한 영향요인이 없는 경우(De)는 해발고도 200 m 이상의 중산간 지역에 분포하는 것으로 나타났다. 그러나 동부지역의 경우에는 해안선에서 멀리 떨어지는 관측정에서도 양수의 영향이 관측되며, 특히 해발고도 126.1 m에 설치된 SD3 관측정에서도 강수와 양수에 의한 동시 영향(Drp)을 받는 것으로 나타남에 따라 동부지역의 해수침투와 연관성이 있을 것으로 판단된

Table 1. Basic statistics of groundwater level at 115 monitoring wells

Region	Well name	Surface geology*	Elevation (m)	Depth (m)	Period	Groundwater level (m, msl ^b)					
						Mean	Median	Range ^b	Min ^c	Max ^d	Stdev ^e
Eastern (30)	GJ1	SD	46.21	105	03-11	1.06	1.02	2.94	0.54	3.48	0.25
	GJ3	FOB	104.95	114	01-11	1.61	1.79	7.04	0.20	7.24	0.79
	GJ4	FOB	93.02	111	01-11	2.65	2.54	4.71	1.75	6.46	0.70
	GN1	FOB	35.85	60	02-11	1.17	1.14	2.87	0.41	3.28	0.30
	GN2	FOB	36.45	170	09-11	1.10	1.09	1.12	0.72	1.84	0.18
	GS	SSF	28.24	41	03-11	0.67	0.64	2.13	0.14	2.27	0.21
	HC1	FOB	25.78	136	03-11	0.68	0.66	1.90	0.17	2.07	0.22
	HC2	FOB	58.88	180	03-11	1.17	1.07	3.43	0.63	4.06	0.41
	HC3	FOB	87.45	186	03-11	2.55	2.33	6.71	1.35	8.06	0.93
	HC4	APB	117.99	230	03-11	5.14	4.76	11.88	3.69	15.57	1.34
	HD1	FOB	15.38	175	02-11	1.88	1.84	2.00	1.44	3.44	0.23
	HD2	APB	42.73	202	01-11	2.08	2.00	3.43	1.52	4.95	0.32
	HD3	APB	112.89	262	01-11	2.72	2.57	3.98	1.99	5.97	0.56
	HD4	FOB	190.99	370	03-11	6.08	5.39	10.54	4.13	14.67	2.09
	JD1	APB	14.48	156	03-11	0.95	0.92	2.52	0.56	3.08	0.19
	JD2	APB	52.79	200	03-11	1.13	1.10	2.68	0.73	3.41	0.23
	JD3	APB	100.47	252	03-11	1.76	1.63	4.83	1.18	6.01	0.50
	JD4	APB	167.55	330	03-11	2.00	1.85	6.21	1.41	7.62	0.60
	JD5	APB	201.36	408	03-11	2.57	2.37	6.65	1.73	8.38	0.80
	PD	FOB	68.03	90	03-11	1.03	0.93	4.13	0.43	4.56	0.44
	SD	FOB	43.32	60	01-11	3.16	3.12	2.93	2.43	5.36	0.29
	SD1	FB-III	27.96	170	05-11	1.45	1.42	1.40	1.03	2.43	0.21
	SD2	FOB	90.21	200	05-11	2.01	1.86	4.27	1.38	5.65	0.50
	SD3	FOB	126.13	250	05-11	3.27	2.66	15.95	1.79	17.74	1.91
	SeH1	SSF	23.31	107	10-11	0.29	0.34	1.05	-0.25	0.80	0.19
	SeH2	APB	58.10	186	10-11	1.25	1.23	1.42	0.79	2.21	0.24
	SS1	FOB	33.84	151	03-11	0.85	0.82	1.91	0.45	2.36	0.20
	SS2	FOB	70.90	196	03-11	1.26	1.17	3.41	0.74	4.15	0.36
	SS3	FOB	115.53	267	03-11	1.92	1.74	5.51	1.07	6.58	0.64
	SS4	APB	176.61	323	03-11	2.63	2.42	4.36	1.72	6.08	0.74
average			78.91	189.6		1.94	1.81	4.46	1.20	5.66	0.55
Western (22)	AS	FOB	40.05	119	01-11	15.35	15.35	12.53	8.55	21.08	2.17
	GA1	FOB	175.50	275	07-11	19.99	19.97	4.52	17.70	22.22	1.20
	GA2	APB	311.54	344	01-11	69.48	70.18	29.30	50.52	79.82	5.32
	GS1	SSF	8.91	146	07-11	-0.19	-0.13	2.09	-1.09	1.00	0.43
	GS2	FOB	20.00	90	01-11	4.51	4.26	10.15	-0.77	9.38	1.61
	HJ	FOB	12.57	130	09-11	5.46	5.16	3.75	4.18	7.93	0.88
	HL1	FOB	14.16	120	05-11	0.92	0.86	4.84	0.34	5.18	0.40
	HL2	PAB- II	59.12	190	05-11	9.78	9.30	10.24	5.64	15.88	2.76
	HM	SSF	7.49	150	07-11	0.51	0.52	1.32	0.06	1.38	0.17
	IG	FOB	15.40	146	07-11	3.88	3.77	4.49	2.09	6.58	0.68
	MR1	FOB	11.12	160	04-11	0.70	0.71	4.95	-2.33	2.62	0.70
	MR2	FOB	45.83	195	04-11	8.64	8.96	16.28	-1.29	14.99	2.36
	MW	FOB	96.88	110	03-11	10.46	10.13	9.75	6.89	16.64	2.20
	NC	FOB	80.00	168	01-11	20.42	20.40	14.86	11.75	26.61	2.15
	PP	FOB	14.94	140	07-11	3.17	3.10	3.66	1.52	5.18	0.69
	SG1	FOB	70.00	160	08-11	37.51	36.72	14.67	32.17	46.84	3.82
	SG2	APB	80.00	180	08-11	25.05	23.76	12.98	20.21	33.19	3.70
	SiD	FOB	10.82	190	07-11	0.09	0.01	3.67	-0.98	2.69	0.55
	SM1	FOB	17.86	170	04-11	2.76	2.67	4.56	1.58	6.14	0.66
	SM2	SSF	22.90	325	04-11	6.40	6.65	7.94	1.47	9.41	1.26
	YS1	SSF	10.94	150	04-11	1.92	2.11	6.79	-2.71	4.08	0.92
	YS2	FOB	37.44	185	04-11	13.21	12.93	12.99	8.49	21.48	2.64
average			52.88	174.7		11.82	11.70	8.92	7.45	16.38	1.69
Southern (26)	HH	FB- II	11.58	180	10-11	2.32	2.37	3.46	1.06	4.52	0.83
	HS1	FB- II	104.50	204	07-11	34.29	33.77	6.59	32.23	38.82	1.81
	HS2	FB- II	245.82	242	03-11	86.11	86.67	51.08	66.40	117.48	12.96
	HwS2	FB- II	66.63	140	10-11	39.78	39.04	10.33	38.55	48.88	1.73
	JM1	FB- II	111.31	130	01-11	70.74	73.78	25.72	52.70	78.42	6.43
	JM3	PAB- II	546.00	550	08-11	356.46	356.16	25.41	343.81	369.22	6.61
	NW	FOB	42.42	65	01-11	1.77	1.74	1.91	1.11	3.02	0.33

Table 1. Basic statistics of groundwater level at 115 monitoring wells(continued)

Region	Well name	Surface geology*	Elevation (m)	Depth (m)	Period	Groundwater level (m, msl ^b)					
						Mean	Median	Range ^b	Min ^c	Max ^d	Stdev ^e
Southern (26)	SaY1	FB- II	165.00	270	07-11	55.01	54.82	3.60	53.49	57.09	0.92
	SaY2	FB- II	239.71	265	03-11	81.55	59.27	93.11	53.43	146.54	34.28
	SG3	APB	257.00	352	09-11	100.10	99.65	8.85	97.05	105.90	2.33
	SH	FB- II	69.30	135	11-11	30.42	30.77	7.13	26.46	33.59	2.09
	SH1	FOB	15.69	92	01-11	0.48	0.51	1.67	-0.38	1.29	0.26
	SH2	PAB- I	76.01	91	01-11	2.25	2.05	5.86	0.44	6.30	0.89
	SH3	PAB- I	80.55	85	02-11	2.43	2.30	4.14	1.54	5.68	0.62
	SL1	FB- II	103.07	110	01-11	44.69	44.04	16.32	37.31	53.63	3.34
	SL2	PAB-III	600.00	550	09-11	294.39	294.07	9.80	290.10	299.90	2.19
	SY3	APB	370.00	470	08-11	220.80	220.81	4.74	217.70	222.44	0.93
	TH1	PAB- I	15.05	91	03-11	0.50	0.48	1.38	-0.01	1.37	0.18
	TH2	PAB- I	89.47	100	01-11	12.20	11.79	8.42	9.40	17.82	1.85
	TH3	PAB- I	90.06	100	01-11	3.09	2.56	7.61	1.14	8.75	1.45
	TP1	FB- II	36.00	85	01-11	3.72	2.81	11.92	0.95	12.87	2.57
	TP2	FB- II	217.80	130	01-11	177.18	177.01	7.03	174.62	181.65	1.46
	WM1	PFB- II	22.22	160	05-11	1.72	1.69	1.51	1.21	2.72	0.27
	WM2	PFB- II	76.71	210	05-11	14.87	14.10	12.53	11.02	23.55	3.12
	YH	FB- II	128.49	135	01-11	40.10	38.96	24.79	31.70	56.49	5.07
	YR	FB- II	59.78	170	03-11	22.46	22.45	1.01	21.95	22.96	0.16
	average		147.70	196.6		65.36	64.37	13.69	60.19	73.88	3.64
Northern (37)	AW	PAB- I	11.60	26	03-11	2.89	2.88	3.17	2.19	5.36	0.26
	BS	APB	167.70	200	03-11	9.23	8.65	12.19	4.89	17.08	3.05
	DH	APB	150.00	161	01-11	9.23	8.79	13.87	6.54	20.41	2.05
	DN2	PAB- I	86.00	150	08-11	11.83	10.37	20.42	6.29	26.71	5.08
	EE1	FOB	60.00	160	07-11	3.68	3.40	3.68	2.31	5.99	0.99
	EE2	PAB- II	189.00	280	08-11	9.92	8.82	9.44	6.67	16.11	2.59
	EE3	APB	415.00	515	08-11	222.75	224.37	16.82	212.53	229.35	4.44
	ESS	FB-IV	615.16	550	08-11	272.51	275.87	19.10	257.51	276.61	4.81
	GDR	FB- I	112.18	240	09-11	19.41	17.89	14.71	15.94	30.65	3.74
	GH	PAB- I	47.43	85	03-11	7.43	6.70	11.10	4.97	16.07	2.18
	GR1	PFB- II	429.46	470	07-11	189.69	195.63	68.01	164.40	232.41	15.78
	GR2	PFB- II	438.99	480	07-11	172.04	170.95	24.92	161.67	186.59	5.73
	HG1	PAB- I	13.61	120	01-11	7.29	6.84	7.78	4.26	12.04	1.93
	HG2	TA- I	88.80	100	02-11	15.29	13.93	19.66	9.28	28.94	4.86
	HG3	PAB- I	115.63	140	01-11	14.11	12.47	22.45	6.57	29.02	5.37
	HmD1	FOB	21.49	150	03-11	1.80	1.66	8.13	0.65	8.78	0.85
	HmD2	FOB	17.32	150	03-11	2.99	2.67	12.97	1.52	14.49	1.44
	ID2	FB- I	58.07	100	09-11	14.00	12.52	16.72	8.68	25.40	4.59
	IH	PAB- I	35.43	89	01-11	14.69	14.70	19.32	6.50	25.82	3.69
	JC1	FOB	26.23	100	01-11	0.85	0.80	2.87	0.30	3.17	0.30
	JC2	APB	82.86	100	02-11	6.52	5.76	14.98	4.36	19.34	2.12
	JC3	FOB	111.07	122	01-11	4.05	3.58	12.55	2.57	15.12	1.50
	JJ1	PAB- I	131.61	160	03-11	10.42	9.78	13.74	5.79	19.53	3.31
	JJ2	PAB- II	315.00	412	07-11	21.75	21.68	1.01	21.25	22.26	0.23
	OR	FB- II	233.09	250	03-11	91.10	90.01	11.10	87.82	98.92	2.80
	SaG1	SSF	50.00	150	07-11	9.77	9.50	3.76	8.49	12.25	0.99
	SaG2	PAB- II	146.01	175	03-11	9.43	8.97	12.02	5.31	17.33	2.84
	SaG3	PAB- II	250.00	350	08-11	7.93	6.94	10.11	4.36	14.47	2.77
	SC1	FOB	18.62	90	01-11	0.83	0.74	5.12	0.07	5.19	0.38
	SC2	PAB- II	51.76	120	06-11	3.76	2.59	16.85	0.53	17.38	3.20
	SC3	PAB- II	97.72	120	04-11	8.05	7.06	20.06	4.94	25.00	3.18
	SinE	FB- I	54.88	80	01-11	8.08	7.41	11.46	4.11	15.57	2.70
	SY1	PAB- I	10.53	130	04-11	1.96	1.62	5.03	0.99	6.02	0.93
	SY2	PAB- I	75.36	210	04-11	8.19	6.75	22.18	3.93	26.11	4.17
	YD	PAB- I	105.14	130	01-11	29.93	33.59	36.11	11.70	47.81	11.81
	YD1	PAB- I	38.46	170	04-11	2.48	2.12	8.15	1.00	9.15	1.15
	YD2	FB- I	162.20	300	04-11	41.67	41.21	18.74	36.93	55.67	3.50
	average		136.04	198.2		34.26	34.03	14.87	29.40	44.27	3.28

^a mean sea level, ^b variation range, ^c minimum, ^d maximum, ^e standard deviation, * RDC(1981)

Table 2. Detailed classifications of variation type for 115 monitoring wells

Region	Well name	Variation type	AC ^a	CVW ^b	Variation width	Region	Well name	Variation type	AC ^a	CVW ^b	Variation width
Eastern (30)	GN2	Drp	O	I	1.12	Southern (26)	NW	Drp	O	I	1.91
	SD1	Drp	O	I	1.40		SL1	Dr	-	II	16.32
	SD2	Drp	O	II	4.27		YH	Dr	-	II	24.79
	SD3	Drp	-	II	15.95		SaY1	Drp	-	II	3.60
	SeH1	Drp	-	I	1.05		SaY2	De	-	II	93.11
	SeH2	Dr	O	I	1.42		SY3	Dr	-	II	4.74
	SS1	Drp	O	I	1.91		SG3	Dr	-	II	8.85
	SS2	Drp	O	II	3.41		SH1	Drp	O	I	1.67
	SS3	Drp	O	II	5.51		SH2	Drp	O	II	5.86
	SS4	Dr	-	II	4.36		SH3	Drp	O	II	4.14
	JD1	Drp	O	II	2.52		TH1	Drp	O	I	1.38
	JD2	Drp	O	II	2.68		TH2	Dr	-	II	8.42
	JD3	Drp	O	II	4.83		TH3	Drp	O	II	7.61
	JD4	Dr	-	II	6.21		TP1	Dr	-	II	11.92
	JD5	Dr	-	II	6.65		TP2	Dr	-	II	7.03
	HC1	Drp	O	I	1.90		HS1	Dr	-	II	6.59
	HC2	Drp	O	I	3.43		HS2	Dr	O	II	51.08
	HC3	Dr	-	II	6.71		YR	Drp	O	I	1.01
	HC4	Dr	-	II	11.88		JM1	Drp	-	II	25.72
	HD1	Drp	O	I	2.00		HwS2	Dr	O	II	10.33
	HD2	Drp	O	II	3.43		GDR	Dr	-	II	14.71
	HD3	Drp	O	II	3.98		SY1	Drp	-	II	5.03
	HD4	Dr	-	II	10.54		SY2	Dr	-	II	22.18
	GJ1	Drp	O	II	2.94		YD1	Drp	O	II	8.15
	GJ3	Drp	O	II	7.04		YD2	Dr	-	II	18.74
	GJ4	Drp	O	II	4.71		HmD1	Drp	-	II	8.13
	GS	Drp	O	II	2.13		HmD2	Dr	-	II	12.97
	GN1	Drp	O	II	2.87		GR1	De	-	II	68.01
	SD	Drp	O	II	2.93		GR2	De	-	II	24.92
	PD	Drp	O	II	4.13		ESS	De	-	II	19.10
Western (22)	GS1	Drp	O	II	2.09	Northern (37)	DN2	Dr	-	II	20.42
	MR1	Drp	O	II	4.95		SinE	Dr	-	II	11.46
	MR2	Drp	O	II	16.28		ID2	Dr	O	II	16.72
	SM1	Drp	O	II	4.56		OR	Dr	-	II	11.1
	SM2	Drp	O	II	7.94		DH	Dr	-	II	13.87
	SiD	Drp	O	II	3.67		BS	Dr	-	II	12.19
	YS1	Drp	O	II	6.79		SaG1	Dr	-	II	3.76
	YS2	Dr	O	II	12.99		SaG2	Dr	-	II	12.02
	IG	Drp	O	II	4.49		SaG3	Dr	-	II	10.11
	PP	Dr	-	II	3.66		SC1	Drp	O	II	5.12
	HM	Drp	O	I	1.32		SC2	Dr	-	II	16.85
	HL1	Drp	-	II	4.84		SC3	Dr	-	II	20.06
	HL2	Dr	-	II	10.24		EE1	Drp	-	II	3.68
	HJ	Drp	-	II	3.75		EE2	Dr	-	II	9.44
	GS2	Drp	O	II	10.15		EE3	Drp	-	II	16.82
	NC	Drp	O	II	14.86		JJ1	Dr	-	II	13.74
	MW	Dr	-	II	9.75		JJ2	De	-	I	1.01
	AS	Dr	-	II	12.53		JC1	Drp	O	II	2.87
	GA1	De	-	II	4.52		JC2	Dr	-	II	14.98
	GA2	De	-	II	29.3		JC3	Dr	-	II	12.55
	SG1	Dr	-	II	14.67		HG1	Drp	O	II	7.78
	SG2	Dr	-	II	12.98		HG2	Dr	-	II	19.66
Southern (26)	SH	Dr	-	II	7.13		HG3	Dr	-	II	22.45
	WM1	Drp	O	I	1.51		GH	Drp	O	II	11.10
	WM2	Dr	-	II	12.53		AW	Drp	O	II	3.17
	HH	Drp	O	II	3.46		YD	Dr	-	II	36.11
	SL2	De	-	II	9.80		IH	Drp	O	II	19.32
	JM3	De	-	II	25.41						

^a Cyclic auto-correlation at 14, 28, and 42 days, ^b Classifications of variation width(I: lower than 2 m, II: higher than 2 m)

다. 그러나 제주지역 전체적으로는 앞서 제시한 바와 같이 변동유형이 동심원 형태로 나타나는데, 이는 제주지역의 관정분포가 주로 해발고도 200 m 이하의 해안선 근처에 분포함에 따라 양수의 영향이 상대적으로 해안지역의 관측정에 영향을 미침에 따른 것으로 판단된다. 이에 비해 해발고도가 높아짐에 따라 양수의 영향이 감소되는 반면 강수의 영향이 크게 나타나는 것으로 판단된다.

Table 3은 115개 관측정을 대상으로 지하수위 변동 유형에 따라 분류한 결과로, 강수에 의해 영향을 받는 전체 106개소의 관측정(92%에 해당) 중 강수와 양수에 의한 동시 영향(Drp)과 순수하게 강수에 의한 영향을 받는 관측정(Dr)은 각각 58개소와 48개소가 해당되는 것으로 나타났다. 이때 변동폭이 2 m 이상(II형)으로 크게 나타나는 관측정은 100개소로 분석되었다. 또한 지구조석(earth tide)의 영향을 받는 관측정은 총 53개소로 나타나는데, 이 중 48개소가 강수와 주변양수에 의한 영향이 동시에 나타나는 관측정(Drp)에 해당되었다(Maréchal 등, 2002). 지역별로 변동폭이 2

m 이상인 관측정의 비율은 서부와 북부지역이 각각 95.5%와 97.3%로 동부와 남부지역의 73.3%와 80.8%에 비해 매우 높은 것으로 나타났다. 그러나 서부지역의 경우 강수와 양수의 동시 영향을 받는 관측정(Drp)이 강수에 의한 영향을 받는 관측정(Dr)에 비해 27.3% 높게 나타남에 따라, 서부지역에서 지하수위 변동폭이 크게 나타나는 원인은 타지역에 비해 농업용수의 집중적인 사용에 따른 것으로 판단된다(Song과 Choi, 2012). 이에 비해 북부지역의 경우에는 강수의 영향을 받는 관측정(Dr)이 강수와 양수의 동시 영향을 받는 관측정(Drp)에 비해 2배 높게 나타남에 따라, 기존에 Lee 등(2007)이 제시한 도시지역의 생활용수 과다사용에 따른 지하수위 변동의 영향과 달리 수리적인 경사가 급한 지형적인 영향으로 강수의 함양 효과가 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 북부지역과 지형적인 영향이 유사한 남부지역의 경우에서도 마찬가지로 전체적인 비율은 서부지역과 북부지역에 비해 낮지만, 강수의 영향을 받는 관측정(Dr)이 강수와 양수의 동시 영향을 받는 관측정

Table 3. Classifications of variation type for groundwater level

Classifications of variation type		Classifications of variation width				Total		Wells affected by earth tide
		I		II				
		Number of wells	Ratio	Number of wells	Ratio	Number of wells	Ratio	
Eastern	Dr	1	3.3	6	20.0	7	23.3	1
	Drp	7	23.3	16	53.3	23	76.7	21
	De	-	-	-	-	-	-	-
	Subtotal	8	26.7	22	73.3	30	100.0	22
Western	Dr	-	-	7	31.8	7	31.8	1
	Drp	1	4.5	12	54.5	13	59.1	11
	De	-	-	2	9.1	2	9.1	-
	Subtotal	1	4.5	21	95.5	22	100.0	12
Southern	Dr	-	-	12	46.2	12	46.2	2
	Drp	5	19.2	6	23.1	11	42.3	9
	De	-	-	3	11.5	3	11.5	-
	Subtotal	5	19.2	21	80.8	26	100.0	11
Northern	Dr	-	-	22	59.5	22	59.5	1
	Drp	-	-	11	29.7	11	29.7	7
	De	1	2.7	3	8.1	4	10.8	-
	Subtotal	1	2.7	36	97.3	37	100.0	8
Total	Dr	1	0.9	47	40.9	48	41.8	5
	Drp	13	11.3	45	39.1	58	50.4	48
	De	1	0.8	8	7.0	9	7.8	-
	Total	15	13.0	100	87.0	115	100.0	53

(Drp)에 비해 2배 높게 나타나는 결과와 일치된다. 또한 서부지역과 유사하게 수리적으로 동수구배가 완만한 동부지역의 경우에서 강수와 양수의 동시 영향을 받는 관측정(Drp)이 강수에 의한 영향을 받는 관측정(Dr)에 비해 약 3배 정도 많은 결과로 설명이 가능하다.

3.2. 관측자료의 경향성 분석

전체 115개소의 관측정으로부터 획득된 월평균 지하수위에 대하여 회귀분석법에 의한 경향성 분석과 비모수적 경향성 분석을 병행하였다.

Fig. 2는 4개 지역별로 강수에 따른 지하수위 변동이 크게 나타나는 대표 관측정들에 대한 일평균 지하수위의 선형 회귀분석 결과로, 각 지역별로 계절별 변동 특성을 분석하기 위하여 월평균 지하수위에 대한 상자그림(box plot)을 추가하였다. 동부지역의 SS3 관측정(2003~2011, 9년간)은 강수와 양수에 의한 동시 영향(Drp)이 나타나는 관측정으로 전체기간 중 지하수위는 미약하게 하강하는 것으로 나타나지만, 풍수기(6월~9월)의 월별 지하수위 변동폭이 큰 반면 그 외의 기간에는 변동폭이 매우 적은 것으로 나타났다(Fig. 2(a)). 서부지역의 YS2 관측정(2004~2011, 8년

간)은 강수의 영향을 받는 관측정(Dr)으로 지하수위는 전체적으로 상승하지만, 동부지역과 달리 계절적인 특징없이 강수량이 상대적으로 적은 기간에도 지하수위 변동폭이 큰 것으로 나타났다(Fig. 2(b)). 이는 서부지역의 경우 9월~11월 기간 중에 활발한 농업활동에 따른 지하수 이용량 급증에 따라 서부지역 전체적으로 지하수위가 낮아지는 영향으로 판단된다(Song and Choi, 2012). 남부지역의 경우 TP1 관측정(2001~2011, 12년간)은 강수의 영향을 받는 관측정(Dr)으로 지하수위 변동 특성은 풍수기에 지하수위 변동폭이 크게 나타난 동부지역의 SS3과 유사한 것으로 나타났다(Fig. 2(c)). 북부지역의 YD1 관측정(2004~2011, 8년간)은 강수와 양수에 의한 동시 영향(Drp)이 나타나는 관측정으로 9월 이후부터 지하수위 변동폭이 크게 나타나는 데 반해 3월~6월 기간 중에 변동폭이 거의 없는 것으로 나타났다(Fig. 2(d)). 이러한 특징은 광역 상수도가 공급되는 도심 인근지역에 위치한 YD1 관측정의 경우 과거와 달리 생활용수 과다 사용 시기인 여름철에 비해 농업용수 수요가 증가하는 9월 이후에 지하수위 변동폭이 크게 나타나기 때문으로 판단된다.

Table 4는 115개소의 지하수위 장기 관측자료에 대

Fig. 2. Some results of linear regression of groundwater level data for trend identification with box plot at well SS3 in Eastern region(a), YS2 in Western region(b), TP1 in Southern region(c), and YD1 in Northern region(d). The amsl indicates above mean sea level.

Table 4. Non-parametric trend analysis for long-term monitoring of groundwater levels

Region	Well name	M-K ^a	Slope ^b	Pro ^c	Region	Well name	M-K ^a	Slope ^b	Pro ^c	Region	Well name	M-K ^a	Slope ^b	Pro ^c
Eastern (30)	GN2	- ^d	0.05	0.23	Western (22)	PP	-	0.02	0.92	Southern	HwS2	-	-0.01	0.89
	SD1	-	-0.01	0.50		HM	-	-0.01	0.64		Average		0.09	
	SD2	-	0.04	0.07		HL1	-	0.00	0.97	Northern (37)	GDR	U	1.35	0.00
	SD3	-	0.04	0.57		HL2	-	0.06	0.86		SY1	U	0.07	0.01
	SeH1	-	0.20	0.07		HJ	U	0.44	0.01		SY2	U	0.31	0.03
	SeH2	-	0.07	0.38		GS2	-	-0.01	0.87		YD1	-	0.08	0.06
	SS1	-	-0.01	0.24		NC	D	-0.21	0.01		YD2	U	0.80	0.00
	SS2	-	0.00	0.84		MW	D	-0.25	0.00		HmD1	-	-0.02	0.54
	SS3	-	-0.03	0.10		AS	D	-0.24	0.00		HmD2	-	-0.01	0.85
	SS4	-	-0.03	0.24		GA1	D	-0.32	0.03		GR1	-	1.29	0.46
	JD1	-	0.00	0.51		GA2	D	-0.35	0.02		GR2	-	0.06	0.88
	JD2	-	0.00	0.66		SG1	-	0.57	0.37		ESS	-	0.45	0.46
	JD3	-	-0.01	0.58		SG2	U	2.38	0.00		DN2	U	2.16	0.00
	JD4	-	0.01	0.46		Average		0.20			SinE	-	-0.11	0.17
	JD5	-	0.01	0.77		SH	U ^e	9.25	0.00		ID2	U	2.87	0.02
	HC1	-	0.00	0.79		WM1	-	0.00	0.79		OR	-	-0.12	0.21
	HC2	-	-0.02	0.16		WM2	-	0.30	0.12		DH	D	-0.18	0.00
	HC3	-	-0.05	0.13		HH	-	0.16	0.78		BS	-	-0.19	0.12
	HC4	-	-0.05	0.18		SL2	D	-1.31	0.02		SaG1	-	-0.05	0.75
	HD1	D	-0.03	0.00		JM3	U	4.91	0.00		SaG2	D	-0.25	0.05
	HD2	-	-0.01	0.34		NW	-	-0.02	0.10		SaG3	U	1.95	0.00
	HD3	-	-0.01	0.32		SL1	-	0.09	0.30		SC1	-	-0.01	0.16
	HD4	D	-0.13	0.01		YH	-	-0.10	0.54		SC2	-	0.12	0.46
	GJ1	-	0.01	0.17	Southern (26)	SaY1	D	-0.69	0.00		SC3	-	0.18	0.07
	GJ3	U	0.14	0.00		SaY2	D	-0.80	0.00		EE1	-	0.01	0.95
	GJ4	D	-0.06	0.00		SY3	U	0.67	0.00		EE2	U	1.44	0.00
	GS	D	-0.01	0.05		SG3	-	1.08	0.08		EE3	D	-3.58	0.00
	GN1	-	-0.01	0.44		SH1	U	0.03	0.00		JJ1	-	-0.27	0.07
	SD	U	0.04	0.00		SH2	-	0.03	0.13		JJ2	D	-0.17	0.00
	PD	-	-0.02	0.24		SH3	-	-0.02	0.46		JC1	D	-0.01	0.04
	Average		-0.01			TH1	D	-0.02	0.01		JC2	D	-0.23	0.00
	GS1	D	-0.15	0.00		TH2	-	-0.02	0.80		JC3	-	0.00	0.98
	MR1	D	-0.25	0.00		TH3	-	-0.05	0.12		HG1	-	-0.06	0.32
	MR2	-	-0.07	0.59		TP1	-	-0.03	0.46		HG2	-	-0.23	0.28
Western (22)	SM1	-	-0.01	0.74		TP2	-	-0.02	0.54		HG3	-	-0.21	0.11
	SM2	-	-0.06	0.26		HS1	-	0.14	0.30		GH	-	-0.03	0.57
	SiD	D	-0.12	0.03		HS2	D	-3.26	0.00		AW	D	-0.03	0.00
	YS1	D	-0.12	0.00		YR	D	-0.03	0.00		YD	U	1.58	0.00
	YS2	U	0.31	0.02		JM1	-	-0.11	0.29		IH	-	0.03	0.76
	IG	-	-0.14	0.12							Average		0.43	

^a Mann-Kendall test, ^b Sen's Slope median (m/year), ^c Probability, ^d No judgement, ^e Excluding data due to short period

한 비모수적 경향성 분석 결과로, 95% 신뢰수준에서 지하수위가 상승하는 관측정과 하강하는 관측정이 각각 17개소(14.8%)와 26개소(22.6%)로 나타난 반면 나머지 72개소(62.6%)의 관측정에서는 경향성을 판단하기 어려운 것으로 나타났다. 지역별로는 동부지역의 경우 상승과 하강이 나타나는 관측정은 각각 2개소(6.7%)와 4개소(13.3%)로, 지하수위의 평균 변동은

-0.01 m 하강한 것으로 나타났다. 서부지역의 경우 상승과 하강이 나타나는 관측정은 각각 3개소(13.6%)와 9개소(40.9%)로, 지하수위의 평균 변동은 0.20 m 상승한 것으로 나타났다. 남부지역의 경우 상승과 하강은 각각 3개소(11.5%)와 6개소(23.1%)로 나타났으며, 북부지역은 각각 9개소(24.3%)와 7개소(18.9%)로 나타났다. 지하수위 변동 평균은 각각 0.09 m와 0.43 m

상승한 것으로 나타났다.

제주도 전체적인 지하수위 변동을 파악하기 위하여 회귀분석법에 의한 선형추세분석 도시 결과, 0.2 m 이상의 지하수위 하강이 나타나는 지역은 북부지역의 서쪽과 서부지역의 해안변 및 남부지역의 서쪽에 집중되는 것으로 나타났다(Fig. 3(a)). 반면 동부지역의 경우, 전반적으로 지하수위 하강 현상이 나타나지만, 하강폭은 0.1 m 이하로 매우 낮은 것으로 나타났다. 반면 지하수위 상승은 북부지역의 중심부에서 나타났는데, 이는 Fig. 2(d)에서 제시한 바와 같이 도시지역 생활용수의 과다사용에 따른 것으로 판단된다. 또한 지하수위 하강은 지하수 이용량이 급증하는 계절에 주로 나타나는데 반해 연간 지하수위 변화는 남북방향으로 급격한 지형적인 영향에 따른 큰 수리구배의 영향을 받은 것으로 판단된다. 95% 신뢰수준에서의 비모수적 경향성 분석 결과 유의미한 지하수위 변동

결과는 전체적으로 서부 내륙지역에서 나타나며, 동부와 서부지역의 해안지역에서 약 0.5 m 이하의 하강 현상이 나타나는 것으로 분석되었다(Fig. 3(b)). 반면 지하수위 상승은 앞서 언급한 바와 같이 북부지역의 중앙부인 제주시 일원에서 나타났다.

3.3. 관측자료의 상관성 분석

일반적으로 대수층 내의 지하수위에 변동을 주는 일차적인 인자는 강수이지만, 해안지역에 인접한 경우에는 조위변화에 따른 영향이 나타날 수 있다. 특히 제주도의 경우에는 높은 투수성으로 인하여 대수층으로의 함양이 내륙지역에 비해 상대적으로 높지만, 해안지역의 경우 높은 유출률과 더불어 지하수 이용이 상대적으로 높아 강수와 더불어 조석 영향의 정량적 분석이 필요하다.

본 연구에서는 강수에 대한 지하수위 변동이 크게 나타나는 82개소의 관측정에 대하여 지하수위 변화에 대한 자기상관과 강수량 변화에 따른 지하수위 변화의 교차상관 분석을 실시하였다(Table 5). 총 82개소 중 동부지역(29개소)의 경우 22개소에서 자기상관도가 높게 나타났으며, 매 12시 정각의 일일관측주기로 분석한 결과 14, 28 및 42일의 주기성이 나타남에 따라 지구조석 변동과의 상관성이 있는 것으로 분석되었다. 이 지역의 평균 교차상관 계수와 시간지연은 각각 0.36과 2.8일로 나타났다. 서부지역(16개소)의 경우 12개소에서 앞서 언급한 지구조석 변동의 주기성을 가지며 자기상관도가 높게 나타났으며, 평균 교차상관 계수와 시간지연은 각각 0.29와 2.3일로 나타났다. 남부지역(17개소)의 경우에는 11개소에서 지구조석 변동을 지시하는 자기상관성이 나타났으며, 평균 교차상관 계수와 시간지연은 각각 0.23과 3.5일로 나타났다. 북부지역(20개소)의 경우 8개소에서 높은 자기상관성이 나타났으며, 평균 교차상관 계수와 시간지연은 각각 0.22와 3.1일로 나타났다. 따라서 동부지역의 경우 다른 지역에 비해 상대적으로 많은 관측정에서 지구조석 변동의 주기성을 갖는 높은 자기상관도가 나타남에 따라, 기존의 많은 연구에서 제시되었던 바와 같이 제주도 동부지역 대수층의 경우 해수면 변동의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 교차상관 분석 결과 동부지역과 서부지역의 교차상관계수(시간

Fig. 3. Distribution of trend analysis of groundwater levels using linear regression method(a) and non-parametric method(b).

Table 5. Correlation analysis for groundwater levels at 82 monitoring wells

Region	Well name	AC ^a	CC ^b	Time lag (day)	Region	Well name	AC ^a	CC ^b	Time lag (day)
Eastern (29)	GJ1	14,28,42	0.3975	2	Western (16)	SM2	14	0.2947	3
	GJ3	14,28,42	0.4653	3		YS1	14,28	0.2437	6
	GJ4	14	0.2883	3		YS2	14	0.2620	3
	GN1	14,28,42	0.3310	1	Average			0.2867	2.3
	GN2	14,28,42	0.3510	3	Southern (17)	HH	14,28,42	0.3292	1
	GS	14,28,42	0.5352	1		HS2	14	0.1637	9
	HC1	14,28,42	0.4532	3		HwS2	14	0.2210	3
	HC2	14	0.2427	4		NW	14	0.2499	3
	HC3	-	0.1468	3		SaY1	-	0.1702	1
	HC4	-	0.0806	3		SH1	14,28,42	0.4137	3
	HD1	14,28,42	0.4152	3		SH2	14	0.1886	5
	HD2	14,28,42	0.4527	3		SH3	14	0.2174	5
	HD3	14	0.3056	3		SL2	-	0.1538	1
	HD4	-	0.1045	3		TH1	14,28,42	0.3976	1
	JD1	14,28,42	0.5810	1		TH2	-	0.1018	8
	JD2	14,28,42	0.5328	1		TH3	14	0.2580	8
	JD3	14,28	0.3891	3		TP1	-	0.1767	3
	JD4	-	0.2493	3		TP2	-	0.1504	3
	JD5	-	0.1171	3		WM1	14,28	0.2937	3
	PD	14,28,42	0.4392	3		WM2	-	0.0615	3
	SD	14,28,42	0.5038	2		YR	14,28,42	0.3657	0
	SD1	14,28	0.3786	2	Average			0.2302	3.5
	SD2	14,28	0.3611	3	Northern (20)	AW	14,28,42	0.5699	1
	SD3	-	0.2291	9		EE1	-	0.2183	1
	SeH1	-	0.1845	1		EE3	-	0.1659	9
	SeH2	14,28,42	0.4352	3		ESS	-	0.0415	0
	SS1	14,28,42	0.4659	2		GH	14,28,42	0.2938	3
	SS2	14,28,42	0.4898	3		HG1	14,28,42	0.3115	1
	SS3	14,28,42	0.3766	3		HmD1	-	0.1874	1
Average			0.3553	2.8		HmD2	-	0.2368	3
Western (16)	AS		0.1729	1		ID2	14,28,42	0.1132	20
	GS1	14,28,42	0.3877	3		IH	14	0.3130	2
	GS2	14,28,42	0.1672	3		JC1	14,28,42	0.2014	3
	HJ	-	0.1783	1		JC2	-	0.0635	3
	HM	14,28,42	0.4818	1		JC3	-	0.0762	3
	IG	14,28,42	0.4064	1		JJ2	-	0.1850	0
	MR1	14,28	0.2887	3		SaG1	-	0.1799	1
	MR2	14	0.3340	1		SC1	14,28,42	0.4482	1
	NC	14,28,42	0.3297	3		SC2	-	0.1064	3
	PP	-	0.0777	3		SC3	-	0.1337	3
	SG1	-	0.2030	1		SY1	-	0.1749	1
	SiD	14	0.4239	1		YD1	14,28,42	0.3978	2
	SM1	14,28	0.3354	3	Average			0.2209	3.1

^a Cycle of auto correlation, ^b Cross-correlation coefficient

지연)는 각각 0.36(2.8일)과 0.29(2.3일)로, 남부지역과 북부지역의 0.23(3.5일)과 0.22(3.1일)에 비해 높게 나타났다. Fig. 4는 각 지역별로 대표적인 관측정 4개소(JD2, GS1, TH1, GH)에 대한 자기상관과 교차상관 분석 결과로, 앞서 제시한 지역적 특성들을 잘 보여주고 있다. 결과적으로 동부지역과 서부지역이 남부지

역과 북부지역에 비해 교차상관계수가 높고 시간지연이 짧은 것으로 나타나는데, 이는 동부와 서부지역이 강수에 의한 지하수위 변동의 영향이 크며 이는 강수에 의한 함양효과가 상대적으로 크기 때문에 발생되는 것으로 판단된다.

Fig. 4. Auto- and cross-correlation of the groundwater level fluctuation with the rainfall data over the 2010 year at monitoring wells JD2(a), GS1(b), TH1(c), and GH(d) within four regions, respectively.

4. 결론

제주특별자치도에서 운영 중인 115개 지하수위 관측망을 대상으로 장기 관측자료를 이용한 변동유형 분석을 위하여, 충동적 유형을 기초로 강수에 의한 영향(Dr), 강수와 양수에 의한 동시 영향(Drp) 및 특별한 영향요인이 없는 경우(De)로 구분하였다. 또한 비모수적 경향성 분석과 더불어 강수량과 조석변동에 의한 지하수위 상관성을 분석 결과를 이용하여, 지형특성에 따른 지역별 지하수 함양 특성 및 농업용수 수요량 차이에 따른 각 지역의 계절별 지하수위 변동 특성과의 관련성을 검토하였다.

변동유형을 분류한 결과 강수에 의한 영향(Dr)과 강수와 양수에 의한 동시 영향(Drp)에 해당하는 관측정이 각각 48과 58개소로 전체의 약 92%로 나타났으며, 지역별로는 서부지역과 북부지역의 경우 변동폭이 크게 나타나는 관측정의 비율(95.5%와 97.3%)이 동부지역과 남부지역의 비율(73.3%와 80.8%)에 비해 높은 것으로 나타났다. 특히 서부지역의 경우 강수에 의한 영향을 받는 관측정(Dr)에 비해 강수와 양수의 동시 영향을 받는 관측정(Drp)이 상대적으로 많은 것은 이 지역에서의 지하수위 변동이 농업용수의 집중적인 사용에 따른 영향을 크게 받고 있기 때문으로 판

단된다.

월별 평균 지하수위 경향성 분석 결과 서부지역의 경우 농업활동에 따른 지하수 이용량의 급증에 따라 계절적인 변동폭이 크게 나타나는 반면, 동부와 남부지역의 경우에는 풍수기를 제외한 계절에 지하수위 변동폭이 매우 작게 나타났다.

95% 신뢰수준에서 분석한 비모수적 경향성은 지하수위가 상승하는 관측정과 하강하는 관측정이 각각 17개소(14.8%)와 26개소(22.6%)로 전체의 37.4%로 나타났으며, 지역별로는 동부지역과 서부지역의 지하수위 평균 변동은 각각 -0.01 m 하강과 0.20 m 상승한 것으로 나타났다. 반면 남부지역과 북부지역은 각각 0.09 m와 0.43 m 상승한 것으로 분석되었다. 제주도 전체적으로 지하수위 하강은 북부지역의 서쪽과 서부지역의 해안변 및 남부지역의 서쪽에 집중되는 반면 동부지역의 경우 전반적으로 0.1 m 이하로 미약한 지하수위 하강 현상이 나타났다.

상관성 분석 결과 동부지역과 서부지역이 남부지역과 북부지역에 비해 교차상관계수가 높고 시간지연이 짧은 것으로 분석되었는데, 이는 앞선 동부지역과 서부지역이 지형적인 영향으로 강수에 의한 지하수위 변동의 영향이 크며 이는 강수에 의한 함양효과가 남부지역과 북부지역에 비해 상대적으로 크기 때문에

발생되는 것으로 판단된다.

본 연구에서 제시한 제주지역 지하수위 변동 특성의 지역적 차이는 향후 기후변화에 따른 용수 수요량 변화 요인과 함께 미래 제주 수자원의 합리적인 관리에 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업의 연구비 지원(10지역기술혁신B02, 제주수자원연구단)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Ataie-Ashtiani, B., Volker, R. E., Lockington, D. A., 1999, Tidal effects on sea water intrusion in unconfined aquifers, *J. Hydrol.*, 216, 17-31.
- Bredehoeft, J. D., 1967, Response of well-aquifer system to earth tides, *J. Geophys. Res.*, 72, 3075-3078.
- Choi, H. M., Lee, J. Y., 2009, Parametric and non-parametric trend analyses for water levels of groundwater monitoring wells in Jeju Island, *J. Korean Soc. Soil Groundwater Environ.*, 14, 41-50.
- Freeze, R. A., Cherry, J. A., 1979, *Groundwater*, Prentice-Hall.
- Gilbert, R. O., 1987, *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- IERR (Institute of Environmental Resource Research), <http://eri.jeju.go.kr/>.
- Kim, K. Y., Shim, B. O., Park, K. H., Kim, T., Seong, H., Park, Y. S., Koh, G. W., Woo, N. C., 2005, Analysis of hydraulic gradient at coastal aquifers in eastern part of Jeju Island, *Econ Environ. Geol.*, 38, 79-89.
- Kim, K. H., Shin, J., Koh, E. H., Koh, K. W., Lee, K. K., 2009, Sea level rise around Jeju Island due to global warming and movement of groundwater/seawater interface in the eastern part of Jeju Island, *J. Korean Soc. Soil Groundwater Environ.*, 14, 68-79.
- Koh, G. W., 1997, Characteristics of the groundwater and hydrogeologic implications of the Seoguipo formation in Cheju island, Ph.D. thesis, Pusan National University, Korea.
- Koh, G. W., Moon, Y. S., Kang, B. R., Song, S. T., Park, Y. S., 1998, Feasibility study on fresh water aquifer under transition zone of seawater/fresh water along the coastal area in Jeju Island, *Proceeding on Joint Conference of KoSEEG and KoSSGE*, 155-156.
- Lee, J. Y., Lee, G. S., Song, S. H., 2007, An interpretation of changes in groundwater level and electrical conductivity in monitoring wells in Jeju Island, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 28, 925-935.
- Maréchal, J. C., Sarma, M. P., Ahmed, S., Lachassagne, P., 2002, Establishment of earth tide effect on water-level fluctuations in an unconfined hard rock aquifer using spectral analysis, *Current Sci.*, 83, 61-64.
- MIFAFF, KRC, 2012, Annual report of seawater intrusion.
- Park, W. B., Yang, S. K., Koh, G. W., 1994, Study on the fluctuations of groundwater levels in Cheju Island, Korea, *J. Environ. Sci.*, 3(4), 333-348.
- RDC, 1981, Geological map of Jeju(1/100,000).
- Salmi, T., Määtä, A., Anttila, P., Ruoho-Airola, T., Amnell, T., 2002, Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates - the excel template application Makesens, Finnish Meteorological Institute.
- Song, S. H., Choi, K. J., 2012, An appropriate utilization of agricultural water resources of Jeju Island with climate change (I), *J. Korean Soc. Soil Groundwater Environ.*, 17, 62-70.
- Song, S. H., Lee, J. Y., Yi, M. J., 2007, Evaluation of long-term data obtained from seawater intrusion monitoring network using variation type analysis, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 28, 478-490.
- Song, S. H., Lee, J. Y., Park, N., 2007, Use of vertical electrical soundings to delineate seawater intrusion in a coastal area of Byunsan, Korea, *Environ. Geol.*, 52, 1207-1219.
- Song, S. H., Zemansky, G., 2012, Vulnerability of groundwater systems with sea level rise in coastal aquifers, South Korea, *Environ. Earth Sci.*, 65, 1865-1876.
- Song, S. H., Zemansky, G., 2013, Groundwater level fluctuation in the Waimea Plains, New Zealand: Changes in a coastal aquifer within the last 30 years,

- Environ. Earth Sci., in print
- Todd, D. K., 1980, Groundwater hydrology, second edition. John Wiley & Sons Inc.
- Yaffee, R., McGee, M., 2000, Introduction to time series analysis and forecasting. Academic Press.
- Won, J. H., Lee, J. Y., Kim, J. W., Koh, G. W., 2006, Groundwater occurrence on Jeju Island, Korea. Hydrogeol. J., 14(4), 532-547.
- Yi, M. J., Kim, G. B., Sohn, Y. C., Lee, J. Y., Lee, K. K., 2004, Time series analysis of groundwater level data obtained from national groundwater monitoring stations, J. Geol. Soc. Korea, 40, 305-329.
- Yi, M. J., Lee, J. Y., Kim, G. B., Won, J. H., 2005, Analysis of abnormal values obtained from national groundwater monitoring stations, J. Korean Soc. Soil Groundwater Environ., 10, 65-74.