

ORIGINAL ARTICLE

## 지하수위 자료를 이용한 제주도 지하수계의 가뭄 영향 평가

송성호\* · 이병선 · 최광준 · 김진성 · 김기표<sup>1)</sup>

한국농어촌공사 농어촌연구원, <sup>1)</sup>제주특별자치도 수자원본부

### Evaluation of Drought Effect on Groundwater System using Groundwater Level Data in Jeju Island

Sung-Ho Song\*, Byung-Sun Lee, Kwang-Jun Choi, Jin-Sung Kim, Gi-Pyo Kim<sup>1)</sup>

Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Ansan 426-170, Korea

<sup>1)</sup>Water Resources Office, Jeju 2651-2, Korea

#### Abstract

Quantitative assessment of groundwater level change under extreme event is important since groundwater system is directly affected by drought. Substantially, groundwater level fluctuation reveals to be delayed from several hours to few months after raining according to the aquifer characteristics. Groundwater system in Jeju Island would be also affected by drought and almost all regions were suffered from a severe drought during summer season (July to September) in 2013. To estimate the effect of precipitation to groundwater system, monthly mean groundwater levels in 2013 compared to those in the past from 48 monitoring wells belong to be largely affected by rainfall(Dr) over Jeju Island were analyzed. Mean groundwater levels during summer season recorded 100 mm lowered of precipitation compared to the past 30 years became decreased to range from 2.63 m to 5.42 m in southern region compared to the past and continued to December. These decreasing trends are also found in western(from -1.21 m to -4.06 m), eastern(-0.91 m to -3.24 m), and northern region(from 0.58 m to -4.02 m), respectively. Moreover, the response of groundwater level from drought turned out to be -3.80 m in August after delaying about one month. Therefore, severe drought in 2013 played an important role on groundwater system in Jeju Island and the effect of drought for groundwater level fluctuation was higher in southern region than other ones according to the regional difference of precipitation decrease.

**Key words** : Groundwater system, Drought, Variation type, Groundwater level

#### 1. 서론

가뭄은 기상학적으로 강수량이 평균 이하의 상태를 지속하는 경우로, 가뭄이 지속되는 경우 지하수 수문계는 직접적인 영향을 받게 된다(Song 등, 2013a). 전국적으로 광범위하게 발생된 2012년 봄 가뭄의 경우, 5월과 6월의 전국 62개 기상관측소의 강수량은 30

년 월평균 강수량(1971-2000)에 비해 각각 41%와 50% 감소하였다. 특히 충청남도과 경기도의 경우 5월 강수량이 각각 20%와 21%로 감소됨에 따라 다른 지역에 비해 가뭄의 정도가 상대적으로 크게 나타났다. 이러한 강수량의 급격한 감소는 지하수위 변화에 직접적인 영향을 미치는데, 총 57개소의 농촌지하수관리 관측망 자료를 이용하여 분석된 전국의 농촌지역

Received 10 February, 2014; Revised 5 March, 2014;

Accepted 9 April, 2014

\*Corresponding author : Sung-Ho Song, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, 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.

지하수위는 1월 대비 6월말에 0.58 m 하강하였으며 이 중 가뭄이 가장 심했던 충청남도의 경우에는 1.93 m 낮아진 것으로 분석되었다(Song 등, 2012).

일반적으로 강수에 의한 지하수위 반응은 수시간에서 수개월까지 복합적으로 작용하기 때문에, 가뭄과 같은 강수량의 급격한 감소에 따른 지하수위 변화를 정량적으로 평가하기 위해서는 표준강수지수(standardized precipitation index, SPI) 또는 파머가뭄지수(Palmer drought severity index, PDSI) 등 가뭄지수를 활용한 분석이 효과적이다(Kim 등, 2006). 특히 국가지하수관측정을 대상으로 로지스틱 회귀 모형을 이용하여 월평균 지하수위와 SPI 가뭄지수의 상관성을 분석한 결과, 봄철인 3월~5월의 지하수위 기울기와 SPI 가뭄지수의 상관성이 가장 높은 것으로 나타났으며 지하수위의 심도가 깊을수록 가뭄의 강도가 증가되는 것으로 분석된 바 있다(Kim 등, 2012). 또한 기상조건에 비해 SPI 가뭄지수에 대한 지하수위의 민감도와 지속성이 높고, 특히 지속시간 3개월의 가뭄인 경우에는 지하수위 변화가 SPI 가뭄지수에 비해 1주일 선행하는 것으로 나타남에 따라 가뭄지수와 지하수위 상관성을 이용한 가뭄 예측에 활용이 가능할 것으로 제시하였다(Kim 등, 2006).

제주도의 경우 과거 30년간의 평균기온과 강수량을 활용한 SPI와 PDSI로 가뭄을 분석한 결과, SPI는 봄과 겨울철 가뭄이 상대적으로 나타난 반면 PDSI는 9~11월 기간 중에 낮아 상대적으로 가을철에 가뭄이 극심했던 것으로 제시된 바 있다(Song 등, 2013b). 이는 SPI가 강수량만을 고려하는 반면 PDSI는 온도를 통해 산정되는 증발산량을 고려하고 있어서, 제주지역의 지형적 특성으로 겨울철 강수량이 많아 봄가뭄은 상대적으로 적은 것으로 판단된다. 그러나 지금까지 이러한 가뭄이 제주도 지하수위 변화에 미치는 영향을 정량적으로 분석한 사례는 없었다.

본 연구에서는 2013년 제주도에 발생한 여름가뭄이 지하수계에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 제주특별자치도 수자원본부에서 운영 중인 115개 관측점 중 강수에 직접적인 영향을 받는 것으로 분류한 4개 권역별 관측점(Song 등, 2013a)의 과거 월별 가뭄지수와 월평균 강수량 변화에 따른 지하수위 변동 특성으로부터 가뭄이 지하수계에 미치는 영향을 평가하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 권역별 강수량 및 표준강수지수를 이용한 가뭄 평가

가뭄은 기상학적 가뭄, 기후학적 가뭄, 농업적 가뭄, 수문학적 가뭄, 사회경제적 가뭄 등 다양한 영역으로 구분되며, 분석 방법에 따라 강수량 등의 기상조건을 이용하는 방법에서부터 저수량과 유역 유출량, 토양수분 등의 수문학적 조건들을 이용하는 방법으로 나누어진다(Yoo, 2009). 이 중 강수량을 이용한 가뭄 평가의 대표적인 방법은 가뭄빈도공식을 이용한 방식이 일반적이지만, 최근 기후변화에 수반된 극사상 발생이 빈번해짐에 따라 가뭄지수를 이용한 분석 기법이 효과적으로 이용되고 있다(Song 등, 2013b).

이러한 가뭄지수 중 SPI는 특정한 기간에 대한 시간단위(1월, 3월, 6월 등)별로 강수 부족량을 산정하여 각각의 용수공급원이 가뭄에 미치는 영향을 산정하는 방법으로, 강수량, 기온, 유효 토양수분량을 근거로 산정하는 PDSI와는 다르다. SPI는 대상기간 중의 강수 확률분포를 정규분포로 활용할 수 있도록 고안된 표준강수지수로, 토양 수분함량과 달리 장기간의 강수에 영향을 받는 지하수자원의 이용가능성에 대한 가뭄의 영향을 반영할 수 있는 장점이 있다(McKee 등, 1993). 따라서 특정 기간에 대한 평균 SPI는 0이 되며, 가뭄은 연속적인 음수로 -1.0 이하에 도달하면 발생하고 -0.99 이상이 되면 종료된다(Table 1).

**Table 1.** Classification of drought intensity using SPI (McKee et al., 1993)

SPI value	Classifications
2.00 <	Extreme wet
1.50 ~ 1.99	Very wet
1.00 ~ 1.49	Moderately wet
-0.99 ~ 0.99	Near normal
-1.00 ~ -1.49	Moderate drought
-1.50 ~ -1.99	Severe drought
-2.00 >	Extreme drought

본 연구에서는 30년 이상 기상자료가 축적된 제주도 내 4곳의 기상대(제주, 서귀포, 고산, 성산)의 강수량 일자료를 SPI 산정에 이용하였다(Fig. 1).

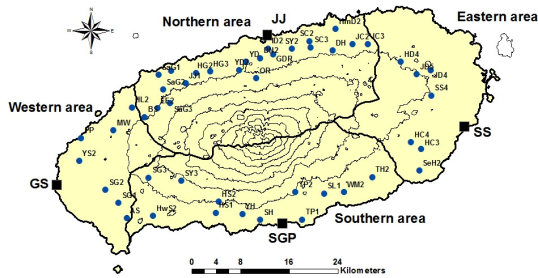


Fig. 1. Location map of 48 groundwater monitoring wells with JJ(Jeju), SGP(Seogwipo), SS(Seongsan), and GS(Gosan) weather stations.

2.2. 권역별 지하수위 관측망

지하수위는 다양한 수문학적 현상에 의해 지배를 받는데, 양수 등 인간활동에 의한 인위적인 요인과 더불어 강수량, 대기압, 지진 등 자연적인 요인이 대표적이다(Freeze and Cherry, 1979; Todd, 1980). 또한 최근에는 지구온난화에 따른 해수면 상승이 해안지역 대수층의 지하수위 변동 요인으로 작용하고 있다(Sherif

와 Singh, 1999; Song과 Zemansky, 2012; Song과 Zemansky, 2013).

Song 등(2013a)은 제주특별자치도에서 운영 중인 115개소 지하수위 관측망을 변동유형별로 분석하여, 강수와 양수의 동시 영향을 받는 관측정(Drp), 강수에 의한 영향을 받는 관측정(Dr) 및 특별한 영향요인이 없는 경우(De)로 분류한 바 있다. 특히 분류 결과 동심원 형태로 변동유형이 구분되는데, 해안선과 평행한 해발고도 200 m 이하의 관측정은 전반적으로 양수의 영향을 받고 있다. 따라서 본 연구에서는 순수하게 강수에 의한 영향을 받는 48개소의 관측자료만을 분석에 이용하였다(Fig. 1 참조).

3. 연구결과

3.1. 강수량 분석

1924년부터 2004년까지 81년간 제주지역의 연평균 강수량은 1,438.4 mm로 한반도 내륙지역에 비해 높은 것으로 나타났으며, 이 기간 중의 시계열 자료를

Table 2. Groundwater monitoring wells classified into Dr type (Song et al., 2013)

Region	Well name	Elevation (m)	Depth (m)	Operating Period(year)	Region	Well name	Elevation (m)	Depth (m)	Operating Period(year)
Eastern (7)	HC3	87.45	186	2003-2013	Southern (12)	WM2	76.71	210	2005-2013
	HC4	117.99	230	2003-2013		YH	128.49	135	2001-2013
	HD4	190.99	370	2003-2013		BS	167.70	200	2003-2013
	JD4	167.55	330	2003-2013		DH	150.00	161	2001-2013
	JD5	201.36	408	2003-2013		DN2	86.00	150	2008-2013
	SeH2	58.10	186	2010-2013		EE2	189.00	280	2008-2013
	SS4	176.61	323	2003-2013		GDR	112.18	240	2009-2013
Western (7)	AS	40.05	119	2001-2013		HG2	88.80	100	2002-2013
	HL2	59.12	190	2005-2013		HG3	115.63	140	2001-2013
	MW	96.88	110	2003-2013		HmD2	17.32	150	2003-2013
	PP	14.94	140	2007-2013		ID2	58.07	100	2009-2013
	SG1	70.00	160	2008-2013		JC2	82.86	100	2002-2013
	SG2	80.00	180	2008-2013	Northern (22)	JC3	111.07	122	2001-2013
	YS2	37.44	185	2004-2013		JJ1	131.61	160	2003-2013
Southern (12)	HS1	104.50	204	2007-2013		OR	233.09	250	2003-2013
	HS2	245.82	242	2003-2013		SaG1	50.00	150	2007-2013
	HwS2	66.63	140	2010-2013		SaG2	146.01	175	2003-2013
	SG3	257.00	352	2009-2013		SaG3	250.00	350	2008-2013
	SH	69.30	135	2011-2013		SC2	51.76	120	2006-2013
	SL1	103.07	110	2001-2013		SC3	97.72	120	2004-2013
	SY3	370.00	470	2008-2013		SinE	54.88	80	2001-2013
	TH2	89.47	100	2001-2013		SY2	75.36	210	2004-2013
	TP1	36.00	85	2001-2013	YD	105.14	130	2001-2013	
	TP2	217.80	130	2001-2013	YD2	162.20	300	2004-2013	

**Table 3.** Monthly precipitation in 2013 compared to the average value during the past 30 years at four weather stations in Jeju Island (unit: mm)

Month	Jeju				Seogwipo				Seongsan				Gosan			
	Mean(A) (*81-'10)	2013(B)	(B)-(A)	(B)/(A) (%)	Mean(A) (*81-'10)	2013	(B)-(A)	(B)/(A) (%)	Mean(A) (*81-'10)	2013	(B)-(A)	(B)/(A) (%)	Mean(A) (*81-'10)	2013	(B)-(A)	(B)/(A) (%)
Jan	68.0	20.5	-47.5	30	63.8	40.1	-23.7	63	78.9	37.0	-41.9	47	41.4	20.5	-20.9	50
Feb	53.7	60.5	6.8	113	67.9	106.0	38.1	156	70.6	97.5	26.9	138	42.1	72.2	30.1	172
Mar	85.9	55.2	-30.7	64	128.4	59.4	-69.0	46	134.7	64.3	-70.4	48	73.3	55.0	-18.3	75
Apr	86.5	94.5	8.0	109	176.2	112.5	-63.7	64	149.0	132.8	-16.2	89	91.4	63.5	-27.9	69
May	99.7	59.7	-40.0	60	205.7	160.5	-45.2	78	169.6	154.5	-15.1	91	97.8	95.3	-2.5	97
Jun	179.4	160.5	-18.9	89	266.6	156.0	-110.6	59	229.9	205.1	-24.8	89	150.1	121.4	-28.7	81
Jul	212.5	14.7	-197.8	7	293.8	18.8	-275.0	6	269.2	16.4	-252.8	6	173.3	6.1	-167.2	4
Aug	276.4	74.2	-202.2	27	324.4	171.3	-153.1	53	367.6	222.5	-145.1	61	216.5	77.0	-139.5	36
Sep	214.8	82.1	-132.7	38	187.4	70.0	-117.4	37	221.7	90.1	-131.6	41	100.0	79.3	-20.7	79
Oct	76.1	113.5	37.4	149	86.1	76.9	-9.2	89	93.1	116.6	23.5	125	52.4	21.1	-31.3	40
Nov	71.1	82.0	10.9	115	94.7	85.6	-9.1	90	105.2	146.3	41.1	139	65.1	71.5	6.4	110
Dec	52.2	38.4	-13.8	80	51.5	28.4	-23.1	57	71.3	71.9	0.6	114	34.7	13.6	-21.1	41
Total	1,476.3	855.8	-620.5	58	1,946.5	1,085.5	-861.0	56	1,960.8	1,355.0	-605.8	70	1,138.1	696.5	-441.6	61

분석한 결과 1.8 mm/year의 비율로 증가하고 있다 (Kim 등, 2006). 특히 1980년 중반 이후부터는 연간 강수량의 변동폭이 커지는데 이는 극한 강수사상의 증가와 연관되며, 연평균 강수량의 50% 이상이 6~9월 기간 중 장마 및 태풍과 연관되어 집중되는 특성이 있다. 본 연구에서는 계절적인 강수량 분포 특성을 기초로 2013년 여름가뭄의 영향을 정량적으로 평가하기 위하여, 과거 30년(1981-2010) 기간 중의 월평균 강수량에 대한 2013년 월평균 강수량의 차이를 계산하였다(Table 3).

과거 30년간 평균 강수량은 제주 기상대 1,476.3 mm, 서귀포 기상대 1,946.5 mm, 성산 기상대 1,960.8 mm, 그리고 고산 기상대 1,138.1 mm로 분석되었다. 따라서 동부와 남부지역에 위치한 성산기상대와 서귀포기상대의 30년 평균 강수량은 서부지역에 위치한 고산기상대에 비해 약 1.7배 높은 것으로 나타났다. 2013년의 제주지역의 강수량은 과거 30년 평균값 대비 약 30~44%의 감소되었으며, 특히 연간 강수량이 가장 높은 성산기상대의 경우 1,355.0 mm로서, 과거 30년 평균값에 비해 약 30% 감소된 것으로 분석되었다. 연간 강수량이 가장 낮은 고산기상대의 경우 2013

년 강수량 696.5 mm로 약 39% 감소되는 것으로 나타났다. 특히 서귀포기상대의 경우에는 약 44% 감소로 최대의 감소폭을 기록하였다.

4곳의 기상관측소의 2013년 강수량은 2월, 10월 및 11월을 제외하면, 과거 30년 평균 강수량에 비해 약 3~96% 감소되는 것으로 분석되었다. 특히, 서부지역 고산기상대의 경우 2013년 7월의 강수량은 과거 30년 평균 강수량(173.3 mm)의 약 4%(6.1 mm)로 급격하게 감소한 것으로 나타났다. 또한 제주, 서귀포 및 성산기상대의 경우에도 과거 30년 평균 대비 6~7% 범위로 매우 적은 강수량이 기록되었다. 이러한 극한 강수사상은 7월에 비하여 8월에 약간 완화되었지만, 그럼에도 불구하고 2013년 8월의 강수량은 과거 30년 평균 대비 27~61% 수준에 불과하였다(Fig. 2). 상자그림(box plot)을 이용하여 권역별 기상대의 2013년 월별 강수량을 과거 30년 평균값과 비교한 결과, 2013년 7월의 경우 4곳 기상대에서 공통적으로 과거 30년 평균값의 최소값보다 낮은 강수량이 기록되었다. 이러한 추세는 권역별로 정도의 차이는 있지만 8월에도 지속되는 것으로 나타났다(Fig. 3).

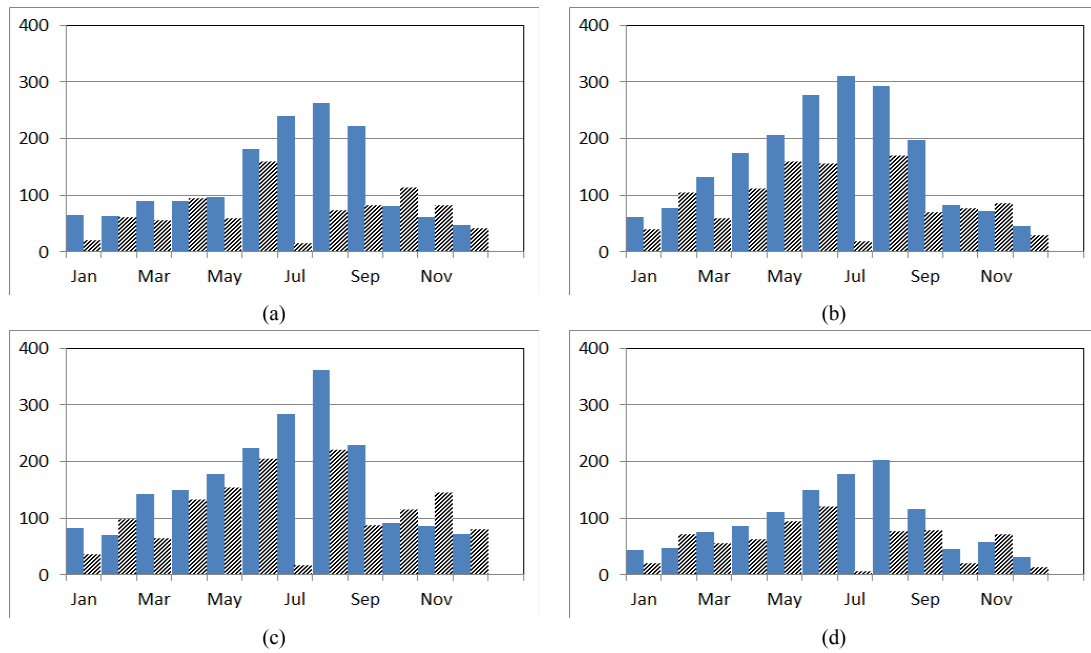


Fig. 2. Monthly precipitation at Jeju(a), Seogwipo(b), Seongsan(c), and Gosan(d) weather stations in Jeju Island. Solid and hatched bars indicate the monthly precipitation both for an average value of last 30 years and in 2013, respectively.

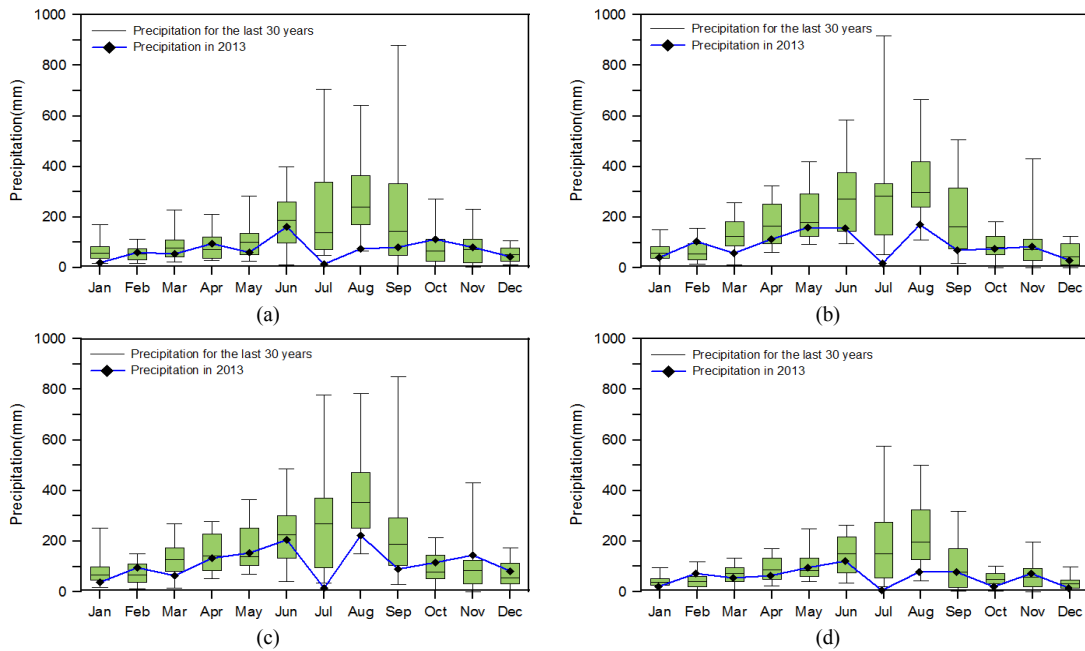


Fig. 3. Box plot for monthly precipitation in 2013 compared to the average value at Jeju(a), Seogwipo(b), Seongsan(c), and Gosan(d) weather stations in Jeju Island.

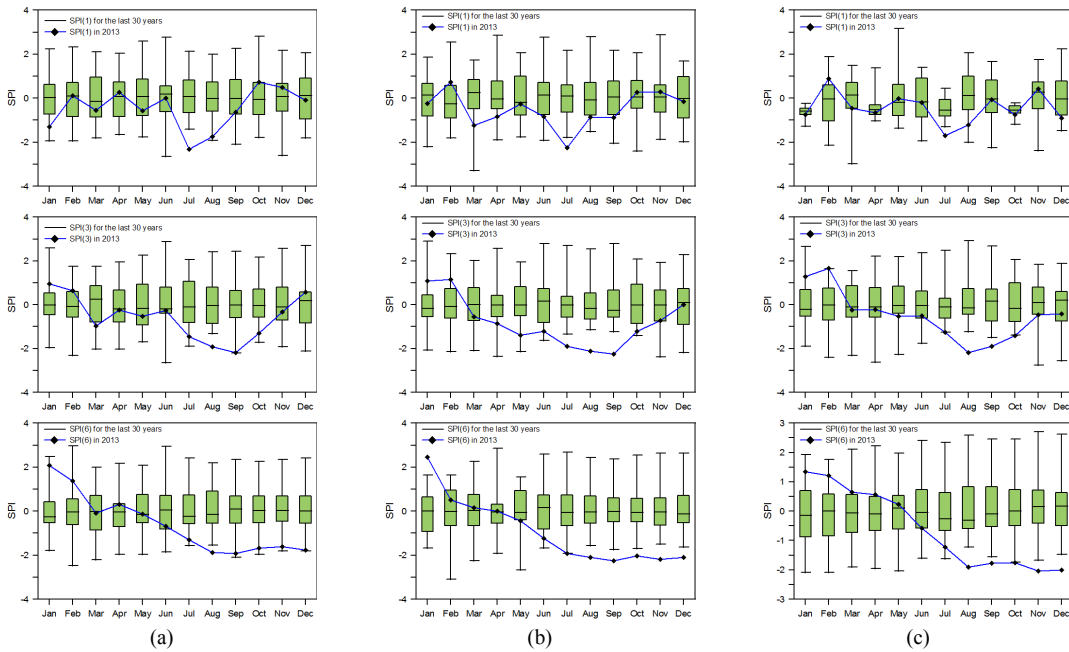


Fig. 4. Box plot of monthly standardized precipitation index(SPI) showing SPI 1(upper), SPI 3(middle), SPI 6(lower) at Jeju(a), Seogwipo(b), and Gosan weather station(c).

3.2. 표준강수지수(SPI) 분석

가뭄 분석을 위하여 활용된 SPI지수는 지속기간이 각 1개월, 3개월 및 6개월인 SPI 1, SPI 3, SPI 6을 이용하였으며, 극심한 가뭄(severe drought)을 지시하는 -1.5 이하가 발생한 경우를 기준으로, 2013년 월별 가뭄의 영향을 과거 30년간의 월별 SPI와 비교하였다 (Table 4; Fig. 4).

SPI 1을 이용하여 분석한 2013년 북부지역의 제주 기상대의 가뭄은 7월 -2.32, 8월 -1.75로 매우 낮게

분석되었다. 이는 2013년 7월의 강수량이 과거 30년 평균인 212.5 mm에 비해 7% 수준인 14.7 mm로 급격하게 감소하였기 때문으로 판단된다. 이러한 낮은 SPI 1 지수는 서귀포와 고산기상대에서도 각각 -2.25와 -1.70으로 나타나 가뭄의 영향이 극심했던 것으로 분석되었다. SPI 3의 경우, 남부지역의 서귀포기상대에서 2013년 7월에 -1.89로 가뭄이 가장 심한 것으로 분석되었으며, 북부와 서부지역인 제주기상대와 고산기상대에서도 2013년 8~9월 사이에 극심한 가

Table 4. Summary of monthly SPI 1, SPI 3, and SPI 6 using 2013 weather data at Jeju, Seogwipo, and Gosan weather station

	SPI	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Jeju	1	-1.31	0.11	-0.55	0.26	-0.57	0.01	<b>-2.32</b>	<b>-1.75</b>	-0.63	0.73	0.49	-0.09
	3	0.95	0.65	-0.96	-0.23	-0.53	-0.27	-1.46	<b>-1.93</b>	<b>-2.19</b>	-1.30	-0.33	0.57
	6	2.09	1.37	-0.08	0.31	-0.13	-0.68	-1.31	<b>-1.87</b>	<b>-1.91</b>	<b>-1.67</b>	<b>-1.60</b>	<b>-1.77</b>
Seo-gwipo	1	-0.23	0.73	-1.24	-0.84	-0.27	-0.84	<b>-2.25</b>	-0.85	-0.89	0.28	0.30	-0.15
	3	1.08	1.16	-0.54	-0.85	-1.38	-1.21	<b>-1.89</b>	<b>-2.12</b>	<b>-2.25</b>	-1.21	-0.73	0.01
	6	2.46	0.52	0.15	0.00	-0.43	-1.24	<b>-1.92</b>	<b>-2.10</b>	<b>-2.26</b>	<b>-2.04</b>	<b>-2.19</b>	<b>-2.09</b>
Gosan	1	-0.75	0.89	-0.45	-0.66	-0.01	-0.20	<b>-1.70</b>	-1.21	-0.07	-0.75	0.43	-0.90
	3	1.28	1.67	-0.24	-0.22	-0.52	-0.50	-1.26	<b>-2.18</b>	<b>-1.90</b>	-1.42	-0.45	-0.42
	6	1.34	1.21	0.65	0.56	0.23	-0.57	-1.22	<b>-1.90</b>	<b>-1.78</b>	<b>-1.76</b>	<b>-2.03</b>	<b>-2.00</b>

뎀(-2.25~-1.93)이 나타났다. 특히 남부지역의 서귀포 기상대의 경우 2013년 7월부터 9월까지 -2.25~-1.89 범위로 다른 지역에 비해 가뭄의 영향이 가장 큰 것으로 분석되었다. SPI 6의 경우도 SPI 3과 마찬가지로 남부지역에서 2013년 7월 -1.92로 가뭄이 가장 심하게 나타났으며, 12월까지 지속적으로 가뭄(-2.26~-1.92 범위)이 나타났다. 서부와 북부지역의 경우에는 SPI 3과 마찬가지로 2013년 8월 이후부터 극심한 가뭄(서부 -2.03~-1.76; 북부 -1.81~-1.60)이 나타나는 것으로 분석되었다.

Song 등(2013b)은 과거 자료(1981~2010, 30년간)를 분석하여 서부지역 고산기상대의 경우 SPI 3과 SPI 6 모두 봄과 겨울철에 가뭄이 집중되었으며, 제주 지역 전체적으로도 2~4월에 가뭄이 극심했던 것으로 제시한 바 있다. 또한 기후변화 시나리오 결과를 이용하여 분석한 2100년까지의 SPI 결과도 여름철의 가뭄의 징후가 없는 것으로 제시하였으며, 상대적으로 과거에 비해 가을철과 겨울철의 가뭄이 점차 완화되는 것으로 해석하였다. 따라서 2013년의 여름철의 가뭄은 대단히 이례적인 것으로 판단된다. 이로써 가뭄에 따른 지하수위와의 상관성을 밝혀 미래 극사상에 따른 지하수계의 취약성을 평가하는 것이 필수적이다.

### 3.3. 지하수위 분석

제주도에 설치된 총 115개소의 지하수 관측망을 권역별로 분류하면 동부지역(30개소), 서부지역(22개소), 남부지역(26개소), 북부지역(37개소)로, 이 중 해발고도 200 m 이상에 위치하는 관측정은 총 16개소이다. 115개 관측정 중 강수에 의한 영향을 받는 관측정은 총 106개소로 전체의 약 92%에 해당된다. 이 중 주변의 양수에 의한 영향을 동시에 받는 관측정 58개소를 제외하면 순수하게 강수에 의한 영향을 받는 관측정(Dr)은 48개소(동부 7, 서부 7, 남부 11, 북부 22개소)로 약 42%에 해당된다(Song 등, 2013a). 따라서 가뭄에 의한 지하수위 변동은 강수에 의한 영향을 받는 관측정으로 분류된 48개소(남부 1개소는 설치 후 1년 경과로 분석에서 제외, Table 2)에 대하여, 과거 월평균 지하수위값에 대해 2013년 월평균 지하수위값의 차이를 계산하였다(Fig. 1; Table 5).

앞서 제시한 바와 같이 2013년 강수량의 경우 과거 30년간 평균 강수량 대비 56~70% 수준이며, 특히 2013년 3월 이후부터 9~10월까지의 강수량 감소가 과거 30년 평균보다 큰 것으로 분석되었다. 이러한 강수량의 감소는 지하수위의 하강과 밀접하게 연관된다. 남부지역인 서귀포기상대의 과거 30년 평균 대비 2013년 강수량은 2월을 제외한 나머지 기간 동안 감

**Table 5.** Regional groundwater level variability with monthly mean groundwater level for the past and in 2013 (unit: m)

		Eastern	Western	Southern	Northern			Eastern	Western	Southern	Northern
Jan	Mean	11.32	15.86	63.62	15.22	Jul	Mean	12.93	17.43	65.69	15.06
	2013	11.78	18.70	63.15	19.77		2013	12.01	16.22	63.06	15.64
	Differ.*	0.47	2.84	<b>-0.47</b>	4.55		Differ.	<b>-0.91</b>	<b>-1.21</b>	<b>-2.63</b>	0.58
Feb	Mean	10.87	15.34	63.12	14.35	Aug	Mean	13.46	17.73	66.24	16.38
	2013	11.45	17.91	62.57	18.41		2013	11.50	15.16	62.44	14.86
	Differ.	0.58	2.58	<b>-0.55</b>	4.06		Differ.	<b>-1.96</b>	<b>-2.57</b>	<b>-3.80</b>	<b>-1.52</b>
Mar	Mean	10.58	15.23	62.78	13.99	Sep	Mean	14.26	17.98	67.35	18.32
	2013	11.32	17.26	62.27	17.40		2013	11.02	13.92	61.93	14.30
	Differ.	0.74	2.02	<b>-0.51</b>	3.41		Differ.	<b>-3.24</b>	<b>-4.06</b>	<b>-5.42</b>	<b>-4.02</b>
Apr	Mean	10.72	15.22	62.85	13.78	Oct	Mean	13.94	17.47	66.73	16.36
	2013	11.17	16.55	62.03	16.92		2013	10.70	13.34	61.54	14.06
	Differ.	0.45	1.34	<b>-0.82</b>	3.14		Differ.	<b>-3.24</b>	<b>-4.13</b>	<b>-5.19</b>	<b>-2.30</b>
May	Mean	11.25	15.08	63.36	13.74	Nov	Mean	12.86	17.42	65.43	17.81
	2013	11.13	16.11	61.98	16.37		2013	10.26	12.90	61.10	13.62
	Differ.	<b>-0.12</b>	1.03	<b>-1.38</b>	2.63		Differ.	<b>-2.60</b>	<b>-4.52</b>	<b>-4.33</b>	<b>-4.19</b>
Jun	Mean	11.74	15.38	63.66	13.72	Dec	Mean	12.13	16.72	64.45	16.64
	2013	11.60	16.43	63.41	15.89		2013	9.89	12.71	60.74	12.75
	Differ.	<b>-0.14</b>	1.04	<b>-0.25</b>	2.17		Differ.	<b>-2.24</b>	<b>-4.01</b>	<b>-3.71</b>	<b>-3.89</b>

\* Differ.: difference between 2013 and mean value

소함에 따라, 2013년 지하수위도 역시 과거 동일기간 평균 지하수위에 비해 하강된 것으로 분석되었다. 남부지역의 11개소 관측망도 마찬가지로 큰 폭의 강수량 감소로 인하여, 과거 동일기간 평균 지하수위 대비 2013년 지하수위는 1월부터 하강하는 것으로 나타났다. 특히 강수량의 감소가 100 mm 이상 관측된 2013년 6~9월 기간 중, 7월부터는 지하수위가 과거 동일기간 대비 -2.63 m 이상 낮아지기 시작했으며, 8월에는 -3.80 m 까지 큰 폭의 하강현상이 지속되었다. 지하수위 하강은 2013년 연말까지 지속되었는데, 9월에 과거 동일기간 대비 -5.42 m까지 하강한 후 차츰 회복되는 것으로 나타났다.

이러한 지하수위 변화는 강수량 변동에 따른 지하수위 반응이 약 1개월 늦어지는 현상을 수반한다. 특히 가뭄이 본격적으로 심각해지는 2013년 5월 이후부터 지하수위 하강폭이 커지는 추세인데, 과거 30년 평균에 비해 강수량이 가장 적었던 2013년 7월에는 북부권역을 제외한 모든 권역에서 급격한 지하수위 하

강(-2.63~-0.91 m)이 관측되었으며, 남부권역에서 지하수위 하강이 가장 컸던 것(-2.63 m)으로 분석되었다. 2013년 지하수위의 하강은 동부와 서부지역에서도 나타난다. 그런데, 과거 30년 평균 대비 두 지역의 2013년 6월 강수량의 감소폭(-28.7~-24.7 mm)은 남부지역(-110.6 mm)에 비해서 상대적으로 적었다. 따라서 2013년 7월 동부와 서부지역의 지하수위 하강(-0.91~-1.21 m)이 남부지역(-2.63 m)에 비해 적은 것으로 분석되었다. 그러나 동부와 서부지역은 2013년 8~9월 기간의 강수량이 상대적으로 적어(77.0~222.5 mm), 지하수위 하강은 동부지역의 경우 2013년 9월에 과거 동일기간 지하수위 대비 -3.24 m 하강, 서부지역의 경우 2013년 11월에 -4.52 m 하강하는 것으로 나타났다. 이에 비해 북부지역의 경우 다른 지역에 비해 2013년 1~4월 기간 중의 강수량 감소폭(-47.5~-8.0 mm)이 적고 지하수위 강하는 강수량 감소가 지속되는 2013년 8월 이후 12월까지(-4.12~-1.52 m) 발생하는 것으로 분석되었다.

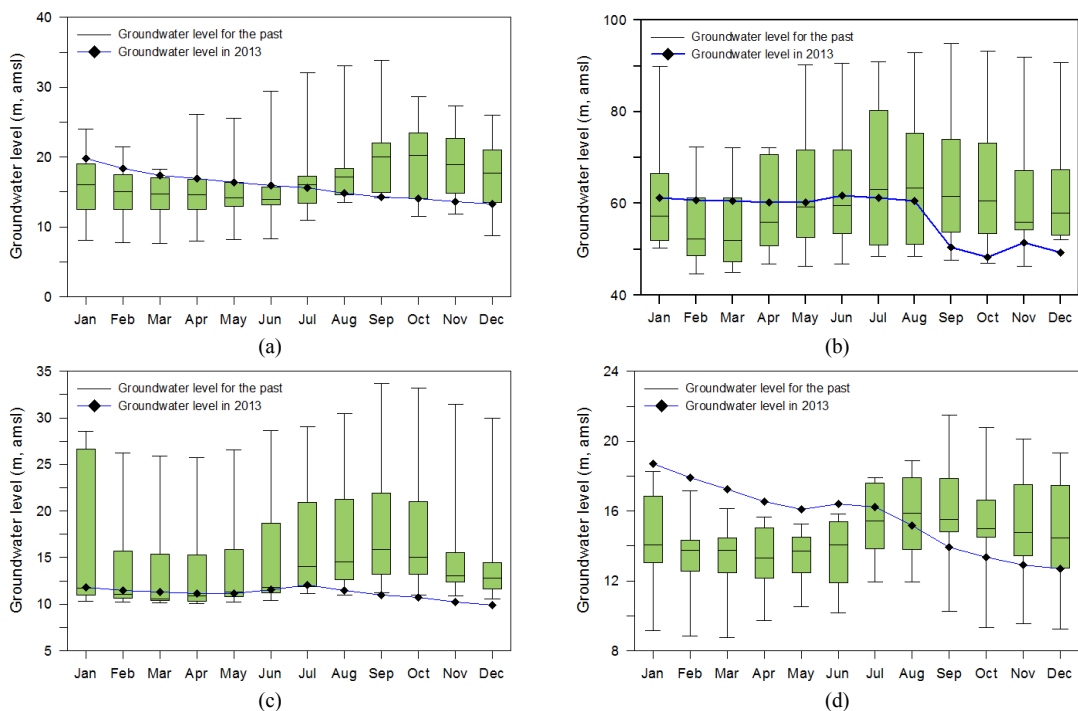


Fig. 5. Box plot for monthly groundwater level in 2013 compared to the average value in northern(a), southern(b), eastern(c), and western(d) regions in Jeju Island.



월별 지하수위 변화를 살펴보면, 전반적인 지하수위는 가뭄에 따른 강수량 감소폭이 급증하는 6월 이후부터 하강하고 7월 이후에는 평년 평균값보다 낮은 값으로 지속된 후, 12월에 가까워짐에 따라 하강폭이 감소하는 형태로 나타났다. 2013년 8월의 경우, 동부, 서부, 남부, 북부지역 월평균 지하수위는 과거 동일기간 대비 각 -1.96 m, -2.57 m, -3.80 m, -2.20 m 낮아지는 것으로 분석되었으며, 특히 남부와 동부지역의 월평균 지하수위 하강현상이 폭 넓게 관측되었다. 이러한 지하수위 하강에 따라 남부지역의 경우 가뭄에 따른 농작물의 피해 및 제한급수의 행정적인 조치가 이루어진 바 있다(Segye Daily News, 2013). 이후 강수량의 감소폭이 작아지는 12월(-23.1~0.6 mm)이 가까워

짐에 따라 권역별로 약간의 차이가 있지만, 지하수위 하강폭은 전체적으로 감소(-4.01~-2.24 m)하는 것으로 분석되었다(Fig. 5).

이러한 경향은 앞서 분석된 SPI 6 가뭄지수의 변동양상과 유사한데(Table 4), 이는 지하수위 변동이 강수에 의한 반응에 일정시간 지연되어 나타나기 때문으로 판단된다.

지금까지의 분석결과를 공간적으로 도시한 결과, 2013년 6월부터 동부와 남부지역의 지하수위 하강 현상이 뚜렷하게 나타나며, 특히 8월 이후부터는 지하수위 하강이 모든 지역에서 광범위하게 발생한다(Fig. 6). 지하수위가 본격적으로 하강하기 시작한 7월 이후부터의 변동폭은 동부와 서부지역에 비해 남부와 북

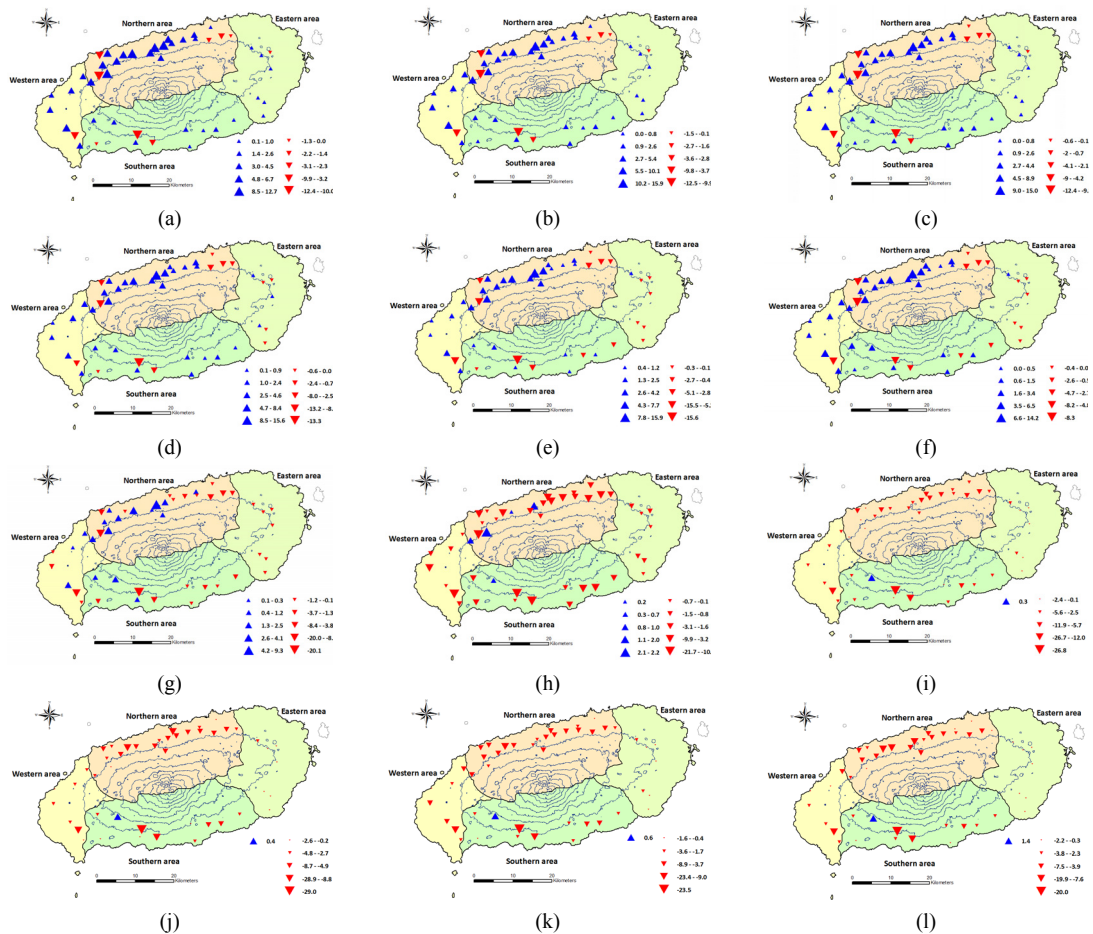


Fig. 6. Groundwater level variation in 2013 compared to the average value from January(a) to December(l) in Jeju Island.

부지역이 상대적으로 큰 것으로 도시되며, 연말까지 제주지역 전역으로 광범위하게 하강하는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

제주도의 2013년 여름철(7~9월) 강수량은 30년 월평균 강수량에 비해 5.4~44.9% 수준으로 그 중 7월의 감소폭이 가장 큰 5.4% 수준으로 나타났으며, 특히 남부와 서부지역의 가뭄이 가장 심한 것으로 나타났다. 제주특별자치도에서 운영 중인 115개소 지하수위 관측망 중 양수의 영향이 없이 강수량 변화에 따른 영향만을 받고 있는 48개소에 대한 과거 동일기간의 월평균 지하수위와 2013년 월평균 지하수위를 비교하였다. 가뭄이 가장 심하게 나타난 남부지역의 경우, 강수량의 감소가 100 mm 이상 관측된 2013년 7월부터 월평균 지하수위가 -2.63 m 이상 낮아지기 시작했으며, 8월에 -3.80 m, 9월에 -5.42 m까지 하강한 후 2013년 연말까지 지속되는 것으로 나타났다. 이러한 지하수위 변화는 여름철의 강수량 감소에 따른 가뭄의 영향이 지하수계에 직접적인 영향을 미친 것으로 판단되며, 강수량 감소가 크게 나타난 7월 보다 8월의 지하수위 강하량이 큰 것은 강수량 변동에 따른 지하수의 반응이 늦어짐에 따라 나타나는 것으로 판단된다. 특히 지하수위가 본격적으로 하강하기 시작한 7월 이후부터의 변동폭은 동부와 서부지역에 비해 남부와 북부지역이 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 이러한 지하수위 하강으로 남부지역의 경우 여름철 제한급수에 따른 영농활동에 심각한 문제가 발생한 반면, 서부지역의 경우 주로 가을철에 용수수요가 증가되는 농업 형태에 따라 타 권역에 비해 가뭄의 영향이 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 결과적으로 가뭄의 영향이 권역별 지하수계에 직접적인 영향으로 나타남에 따라, 미래 제주 수자원의 합리적인 관리 뿐만 아니라 체계적인 용수 공급정책 수립이 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업 “제주 수자원 연구단(10지역기술혁신B02)” 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

- Freeze, R. A., Cherry, J. A., 1979, Groundwater. Prentice-Hall.
- Kim, G. B., Lee, S. H., 2012, Applicability of logistic regression model of groundwater levels to drought forecast, *Journal of the Geological Society of Korea*, 48(3), 275-284.
- Kim, G. B., Yun, H. H., Kim, D. H., 2006, Relationship between standardized precipitation index and groundwater levels: a proposal for establishment of drought index wells, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 11(3), 31-42.
- Kim, S. S., Jang, S. M., Baek, H. J., Choi, H. Y., Kwon, W. T., 2006, Climatological variability of temperature and precipitation in Jeju, *Journal of Korean Earth Science Society*, 27(2), 188-197.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J., 1993, The relationship of drought frequency and duration of time scales, 8th Conference on Applied Climatology, January, Anaheim, CA, 179-184.
- Segye Daily News, 2013, <http://www.segye.com/content/html/2013/08/06/20130806003849.html>
- Sherif, M. M., Singh, V. P., 1999, Effect of climate change on sea water intrusion in coastal aquifer, *Hydrological Processes*, 13, 1277-1287.
- Song, S. H., Choi, K. J., Kim, J. S., 2012, Correlation between groundwater level fluctuation and climate change with spring drought in 2012, *Proceeding of workshop for 6<sup>th</sup> Jeju water resources management advancement*, 47-68.
- Song, S. H., Choi, K. J., Kim, J. S. 2013a, Evaluation of regional characteristics using time-series data of groundwater level in Jeju Island, *Journal of Environmental Science International*, 22(5), 609-624.
- Song, S. H., Yoo, S. H., Bae, S. J., 2013b, Regional drought assessment considering climate change and relationship with agricultural water in Jeju Island, *Journal of Environmental Science International*, 22(5), 625-638.
- Song, S. H., Zemansky, G., 2012, Vulnerability of groundwater systems with sea level rise in coastal aquifers, South Korea, *Environmental Earth Sciences*, 65(6), 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, *Environmental Earth Sciences*, 70(5), 2167-2178.
- Todd, D. K., 1980, *Groundwater hydrology*, second edition. John Wiley & Sons Inc.
- Yoo, S. H., 2009, *Analyzing agricultural drought affected by climate change*. Ph.D. thesis, Seoul National University, Korea.