

표준지하수위지수를 이용한 지하수계의 기후변화 취약성 평가

송성호* · 황가영

한국농어촌공사 농어촌연구원

Evaluation of Climate Change Vulnerability on Groundwater System using Standardized Groundwater Level Index(SGI)

Sung-Ho Song* · Ga-Young Hwang

Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

ABSTRACT

The impact of climate change on the groundwater system for 8 hydrogeological units were quantitatively evaluated with time-series groundwater level data from 80 monitoring wells for more than 10 years. The evaluation was based on accumulation period (AP) correlated with the standardized precipitation index (SPI) and standardized groundwater level index (SGI). The analysis showed that when the AP of the aquifer is relatively short, the aquifer is considered to be temporarily responsive to short-term droughts but relatively less affected by long-term droughts. On the other hand, if the AP of the aquifer is long, it is estimated that the resilience of the groundwater system decreases in the event of a relatively long drought, and consequently the vulnerability to climate change increases. In conclusion, regardless of the hydrogeological unit, as the AP of the aquifer has increased in recent years, it is estimated that the impact of climate change on the groundwater system is gradually increasing.

Key words : Climate change, Vulnerability, Groundwater system, Hydrogeological unit, Standardized groundwater level index (SGI)

1. 서 론

최근의 기후위기(climate crisis)는 기존의 기후변화 속도가 인위적인 요인에 의해 급격하게 증가함에 따라 심화되고 있으며, 이로부터 극한 가뭄 및 홍수와 같은 극사상(extreme event)이 빈번하게 발생하고 있다. 우리나라의 경우에도 연간 강수량은 증가하는 반면 강수일수가 감소함에 따라, 시·공간적으로 집중 호우와 함께 가뭄 빈도와 강도가 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타나고 있다 (Choi et al., 2013; Kim et al., 2021). 이러한 수문순환의 급격한 변화는 지하수 수문계(hydrological system)의 변

동성을 증가시키는데, 수자원을 관리하는 측면에서는 다양한 변동성에 효과적인 대응이 어려운 실정이다(Döll, 2009; Aslam et al., 2018; Alegria, 2022).

이러한 지하수계(groundwater system)의 변동성을 정량적으로 평가하기 위한 수단으로, 지하수 관측공에서 수집되는 장기간 지하수위 시계열 자료를 분석하는 방법이 이용된다. 이때 시계열 자료의 정규화(normalization)를 통한 정량적 해석 기법은, 강수량, 하천 유량, 저수지의 저수량, 토양수분 함량 등 수문자료 중 상대적으로 영향이 큰 요소들 사이의 상관분석을 목적으로 주로 이용된다(Vincente-Serrano and Lopez-Moreno, 2005; Shukla and Wood, 2008; Mishra and Singh, 2010; McEvoy et al., 2012). 이 중 강수량을 정규화한 표준강수지수(standard precipitation index, SPI)는, 다양한 시간 간격으로 강수량을 구분하여 가뭄 영향을 정량적으로 평가할 수 있도록 제시된 대표적인 기법이다(McKee et al., 1993).

한편 지하수위 시계열 자료를 정규화한 표준지하수위지

주저자: 송성호, 전문위원

공저자: 황가영, 선임연구원

*교신저자: 송성호, 전문위원

E-mail: shsong@ekr.or.kr

Received : 2024. 11. 25 Reviewed : 2024. 12. 3

Accepted : 2024. 12. 12 Discussion until : 2025. 2. 28

수(standardized groundwater level index, SGI)는, 기상학적 기품이 지하수계에 미치는 영향을 평가하는 주요한 도구로 사용된다(Bloomfield and Marchant, 2013). 이러한 SGI는 SPI와의 상관분석을 통하여 대수층 유형별로 기품에 취약한 정도를 정량적으로 해석하는데 매우 유용하다(Song, 2018).

Song(2018)은 우리나라 행정구역별 대표 관측공 68곳을 대상으로 SPI와 SGI 상관분석에 따른 상관계수(correlation coefficient)가 가장 높은 누적기간(accumulation period, AP)을 이용하여, 관측공별 대수층 특성에 따른 기품이 지하수계에 미치는 영향을 평가하였다. Koo et al.(2022)은 SPI와 저수율의 상관분석을 통하여 저수지 수위의 경우 AP는 9~11개월과 상관성이 가장 높게 나타나지만, 지하수위는 강수에 대한 반응 기간이 저수위에 비해 상대적으로 매우 짧은 것으로 해석하였다.

이 연구에서는 전국적으로 분포하는 농촌지역 지하수 관측망을 대상으로, 기존의 접근방법을 이용하여 기후변화 심화가 지하수계에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 또한 대수층의 특성에 따른 기후변화 영향의 차이를 평가하기 위하여, 관측망이 위치한 수문지질단위(hydrogeological unit)별로 구분하여 분석하였다. 이를 위하여 10년 이상 관측자료가 축적된 80개소의 관측망을 대상으로, 전체 관측기간과 풍수기 및 갈수기를 각각 전반기와 후반기로 나누어 구분하였다. 이를 토대로 SGI와 SPI 사이의 AP를 각각 계산한 후, 해당 관측공이 위치한 수문지질단위별로 전반기와 후반기의 AP 변화를 이용하여 기후변화의 심화가 지하수계에 미치는 취약성을 평가하였다.

2. 연구 방법

2.1. 수문지질단위

수문지질단위는 지하수 부존 형태, 지층 구조, 지하수 수질, 유동 방향 등 대수층의 물리·화학적 특성을 구분하기 위해 분류되며, 이때 중요한 매개변수는 공극율, 수리전도도, 저류계수, 비산출률 등으로 이를 통해 대수층의 특성을 파악한다(Fetter, 1988). 따라서 이러한 매개변수를 이용하면 대수층의 지하수 저류 및 유동 특성을 파악할 수 있어, 지하수 개발 가능량 판단에 효과적으로 이용이 가능하다.

이러한 수문지질단위는 지질시대, 암석의 종류, 암상, 지형, 공극의 형태 및 수리지질 특성 등에 따라 나누어지는데, 우리나라에서는 수문지질도(hydrogeological map) 작성을 위해 대표적인 암석을 기준으로 8가지 수문지질 단위(미고결 쇄설성 퇴적층, 다공질 화산암, 반고결 쇄설성

퇴적암, 비다공질화산암, 관입화성암, 쇄설성 퇴적암, 탄산염(석회암), 및 변성암)로 구분하고 있다(NGIC, 2004). 북한의 경우에는 남한에는 분포하지 않은 고생대의 사일루리아기 후기, 데본기 및 신생대 중기 암석을 기초로, 7가지(변성암류, 관입암류, 쇄설 퇴적암류, 카르스트 탄산염암, 제4기 미고결 퇴적암, 제4기 분출 균열암 및 풍화대) 수문지질 단위로 구분하여 사용하고 있다(Song et al., 2015).

이 연구에서 이용된 80개소의 관측공은 5개 수문지질 단위(비다공질화산암(non-porous volcanic rock), 관입화성암(intrusive igneous rock), 쇄설성 퇴적암(clastic sedimentary rock), 탄산염암(석회암, limestone), 및 변성암(metamorphic rock))에 분포하고 있다(Fig. 1).

2.2. SPI와 SGI 상관분석을 이용한 누적기간 결정

다양한 시간 간격(1, 3, 6, 12, 24개월 등)에 대한 강수량의 부족을 정량화하기 위해 개발된 SPI는, 평균값과 표준편차가 각각 0과 1의 누적정규분포(cumulative normal distribution) 결과를 표준정규분포(standard normal distribution)로 변환시키는 방법으로 계산된다(McKee et al.,

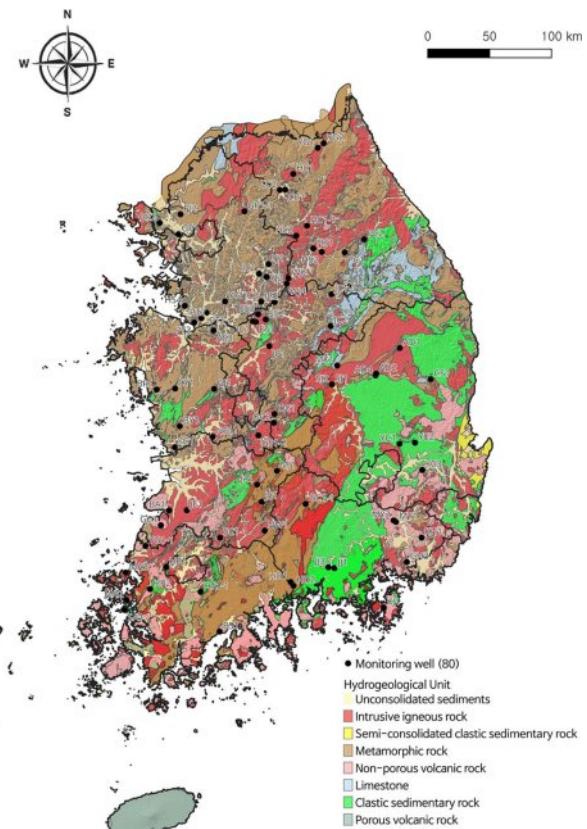


Fig 1. 80 groundwater monitoring wells over the hydrogeological map (modified from NGIC, 2024).

1993). 지하수위는 강수량과 달리 연속적인 시계열 변동 자료로, SPI 계산에서 중간과정으로 사용되는 감마분포(gamma distribution)를 이용한 정규화 과정을 거칠 필요가 없다. 따라서 지하수위 시계열 자료를 정규화시키면, 가뭄이 발생하는 경우 지하수계의 변화를 정량적으로 평가할 수 있다(Song, 2018).

이 연구에서는 관측공별 지하수위 시계열 자료를 대상으로 계산된 SGI와 1개월 단위로 계산된 SPI에 대한 상관분석을 실시하였으며, SGI와 1개월 단위의 SPI 사이의 상관계수 중 최대값을 갖는 개월을 AP로 설정하였다.

상관분석은 두 변량 간의 상관 정도를 계량화한 상관계수를 계산하는 방법으로, 상관계수 r_{xy} 는 두 변량의 통계적 관계를 정량화한 값이다. 이때 상관계수는 측정값 (x, y) 에 대하여 n 개인 측정값 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ 을 주어졌을 때 식 (1)을 이용하여 계산된다.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)s_x s_y} \quad (1)$$

이때, \bar{x} 와 \bar{y} 는 x, y 의 평균값, s_x 와 s_y 는 x 와 y 의 표준편차, $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ 는 x 와 y 의 공분산이다.

2.3. 지하수 관측망

이 연구에 이용된 농어촌 지하수 관측망은 농림축산식품부와 한국농어촌공사가 전국적으로 운영 중이며, 2023년 12월 기준 총 1,045개소(농촌지하수: 778, 해수침투: 267)가 설치되어 있다(KRC, 2024). 이 중 농촌지하수관리 관측망은 농어촌용수구역(511개)별로 수량 부족 및 수질 악화 우려 지역에 설치하여, 기후변화를 대비하여 농어촌

Table 1. Current status of 80 groundwater monitoring wells

Name	SY ¹⁾	Long ²⁾	Lat ³⁾	Elev ⁴⁾	HU ⁵⁾	Name	SY ¹⁾	Long ²⁾	Lat ³⁾	Elev ⁴⁾	HU ⁵⁾	Name	SY ¹⁾	Long ²⁾	Lat ³⁾	Elev ⁴⁾	HU ⁵⁾
GP1-1	2014	127.36	37.77	116.2	M	OC1	2012	127.63	36.28	112.8	I	BS1	2013	127.13	34.70	4.1	N
GP1	2010	126.76	37.59	8.6	M	OC2	2012	127.62	36.22	133.3	I	SA1	2013	126.29	34.86	13.4	M
GP2	2010	126.59	37.67	12.8	M	ES1	2007	127.46	36.96	79.1	I	YG1-1	2013	126.48	35.33	4.2	I
YJ1	2011	127.59	37.37	36.6	I	ES2	2007	127.56	36.97	94.1	I	HP1	2013	126.66	35.17	52.3	C
YJ2	2011	127.56	37.29	44.9	I	ES3	2007	127.49	37.01	103.7	I	HP2	2013	126.53	35.01	2.8	N
YY1	2013	127.19	37.11	44.3	M	JC1-1	2007	128.16	37.15	259.2	I	HS1-1	2011	126.96	34.99	38.3	C
IC1	2008	127.50	37.30	40.4	I	JC2	2007	128.15	36.92	246.3	L	MK1	2013	128.20	36.63	79.1	L
IC2	2008	127.52	37.10	78.7	I	JP1	2010	127.59	36.78	66.8	I	SJ1	2010	128.15	36.50	91.0	M
IC3	2008	127.63	37.10	63.7	I	JC1	2009	127.44	36.96	82.2	I	SJ2	2010	128.15	36.50	89.0	M
PJ2	2012	126.78	37.74	10.3	M	GJ1	2009	127.09	36.47	12.8	C	AD1	2011	128.77	36.75	286.1	I
PT1	2007	127.02	37.02	10.2	M	GS1-2	2009	127.48	36.13	149.9	I	AD2	2011	128.55	36.57	73.5	M
PT2	2007	126.97	36.98	8.0	M	NS1	2011	127.07	36.12	6.8	I	AD4	2013	128.54	36.56	72.5	C
PT3	2007	126.91	36.95	21.2	M	BR1	2014	126.57	36.46	3.6	M	YC1	2008	128.75	36.06	176.7	C
HS4	2006	126.82	37.07	10.0	M	BY1	2011	126.78	36.21	9.0	M	YC2	2008	128.89	36.06	122.0	C
YG1	2012	128.05	38.22	320.1	I	SC1	2013	126.74	36.04	3.5	M	YC3	2008	128.95	35.86	134.4	C
YG2	2012	128.12	38.26	528.2	M	AS3	2006	127.08	36.89	30.2	I	CS1	2012	129.04	36.52	200.4	C
WJ2	2007	127.77	37.27	49.6	I	CY1	2013	126.74	36.47	46.6	M	KJ1	2013	128.58	34.87	21.8	I
WJ4	2007	127.75	37.23	55.5	I	GC1	2011	126.61	35.48	9.7	N	GC1-1	2012	127.90	35.63	245.4	M
CC1	2008	127.74	37.92	78.1	I	NW1	2013	127.53	35.44	459.5	I	KH1	2004	128.92	35.35	11.3	I
CC2	2008	127.69	37.91	84.6	I	MJ1	2013	127.65	35.87	403.5	M	GH3	2006	128.80	35.19	26.3	N
PC1	2010	128.28	37.46	583.8	I	BA1	2006	126.69	35.58	6.5	I	MY1	2013	128.71	35.49	73.6	N
PC2	2010	128.46	37.55	534.6	I	SC1-1	2009	127.14	35.39	96.5	I	MY2	2013	128.68	35.50	38.7	N
HC1-1	2010	127.94	37.65	205.3	I	JS1	2010	127.51	35.65	412.1	I	JJ1	2008	128.15	35.16	28.7	C
HC2	2010	127.84	37.58	236.4	I	JE1	2009	126.84	35.59	23.7	I	JJ3	2008	128.10	35.17	48.8	C
HC1	2012	127.82	38.03	230.6	I	JA1	2011	127.43	35.79	293.3	M	HD1	2012	127.76	35.06	5.5	M
HS1	2009	128.00	37.49	124.8	I	MA2	2005	126.31	34.93	10.9	M	HD2	2010	127.79	35.03	14.7	M
HS2	2013	128.07	37.46	199.1	I	MA3	2007	126.30	35.13	6.3	M						

¹⁾SY: starting year, ²⁾Long: longitude, ³⁾Lat: latitude, ⁴⁾Elev: elevation (m), ⁵⁾HU: hydrogeological unit

*Letters in HU column are as followed (C: clastic sedimentary rock, N: non-porous volcanic rock, I: intrusive igneous rock, L: limestone, M: metamorphic rock)

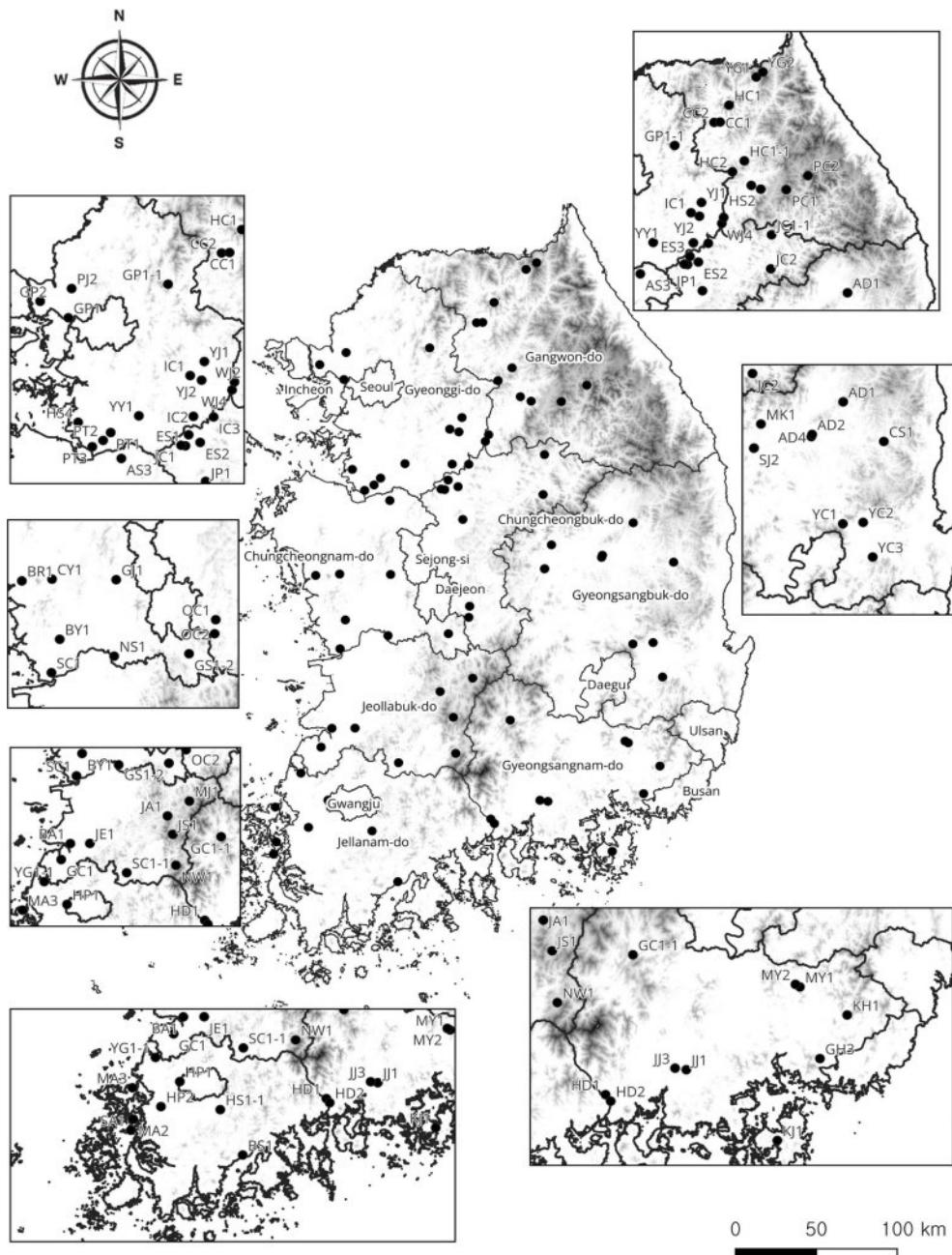


Fig 2. Location map of 80 groundwater monitoring wells.

지역 지하수의 합리적 개발 이용 및 지하수 보전을 목적으로 운영 중이다.

이 연구에서는 농촌지하수관리관측망 중 관측 기간이 10년 이상인 관정 98개소 중 결측 기간이 짧고 자료 품질이 양호한 80곳을 선정하여 분석에 이용하였다(Table 1) (Fig. 2). 이를 관측공을 수문지질단위별로 분류하면, 쇄설성 퇴적암 10개소, 관입 화성암 37개소, 변성암 25개소, 비단공질 화산암 6개소 및 석회암 2개소에 해당된다. 또

한 해발고도별로는 0~50 m 37개소, 50~100 m 17개소, 100~50 m 8개소, 150~200 m 2개소, 200~250 m 6개소, 250 m 이상 10개소가 분포한다.

3. 분석 결과

3.1. 분석 기준

가뭄이 대수층에 미치는 영향을 분석한 기존 연구에 따

르면 SPI와 SGI 상관분석에 대한 AP는 1~4개월로 짧지만, 지표수를 저장하는 저수지 수위의 AP는 9~11개월로 상대적으로 긴 것으로 나타났다(Song, 2018; Koo et al., 2022). 결과적으로 누적 강수량에 대한 지하수위 반응이 상대적으로 짧은 AP의 경우는, 대수층이 단기간의 가뭄에는 일시적으로 반응하는 반면 장기간의 가뭄에는 지표수에 비해 영향이 적다는 것을 의미한다. 반면에 누적 강수량에 대해 저수지 수위의 반응이 상대적으로 긴 AP로 나타

나는 경우는, 장기 가뭄 발생 시 지표수의 공급 능력이 급격하게 낮아지는 것으로 해석된다. 따라서 지하수계는 지표수와 비교하여 장기간의 가뭄에 상대적으로 영향이 적지만, 기존 연구에서 제시된 바와 같이 관측공이 위치한 지역별로 AP가 1~4개월로 넓게 분포함에 따라 이러한 원인에 대한 체계적인 해석이 필요하다.

결과적으로 기후변화에 따라 시·공간적으로 빈번하게 발생하는 극한 가뭄과 이에 따른 급격한 수문순환 변화를

Table 2. Accumulation periods with correlation coefficients for 80 monitoring wells under three conditions including total period, rainy seasons, and dry seasons

Hydrogeological unit (number)	Well name	Monitoring period (years)	Total period						Rainy seasons (from 21 of June to 20 of September)						Dry seasons (except for rainy seasons)					
			Total period		The first half		The second half		Total period		The first half		The second half		Total period		The first half		The second half	
			AP ¹⁾	Cor ²⁾	AP	Cor	AP	Cor	AP	Cor	AP	Cor	AP	Cor	AP	Cor	AP	Cor	AP	Cor
Clastic sedimentary rock (10)	GJ1	2009-2023 (15)	1.0	0.56	1.0	0.53	1.0	0.60	1.0	0.69	1.0	0.65	1.0	0.74	2.0	0.40	1.0	0.34	3.0	0.47
	AD4	2013-2023 (11)	1.0	0.43	2.0	0.69	1.0	0.47	6.5	0.35	1.0	0.62	12.0	0.07	1.5	0.56	2.0	0.66	1.0	0.46
	YC1	2008-2023 (16)	3.0	0.42	2.0	0.69	3.0	0.35	2.5	0.62	4.0	0.66	1.0	0.58	3.5	0.44	2.0	0.61	5.0	0.26
	YC2	2008-2023 (16)	3.0	0.45	3.0	0.66	3.0	0.30	5.5	0.54	10.0	0.60	1.0	0.47	3.5	0.43	3.0	0.62	4.0	0.25
	YC3	2008-2023 (16)	1.0	0.42	1.0	0.67	2.0	0.30	5.5	0.40	1.0	0.62	10.0	0.18	1.5	0.45	1.0	0.54	2.0	0.36
	JJ1	2008-2023 (16)	3.0	0.62	3.0	0.65	3.0	0.59	1.0	0.69	1.0	0.72	1.0	0.66	3.0	0.62	3.0	0.66	3.0	0.59
	JJ3	2008-2023 (16)	4.0	0.16	4.0	0.31	4.0	0.41	7.0	0.47	12.0	0.50	2.0	0.45	10.5	0.39	10.0	0.37	11.0	0.40
	CS1	2012-2023 (12)	9.0	0.60	9.0	0.58	9.0	0.70	7.0	0.72	2.0	0.68	12.0	0.76	8.5	0.66	9.0	0.63	8.0	0.68
	HP1	2013-2023 (11)	3.0	0.60	2.0	0.49	3.0	0.80	5.0	0.75	7.0	0.59	3.0	0.91	3.0	0.59	2.0	0.47	4.0	0.70
	HS1-1	2011-2023 (13)	2.0	0.62	2.0	0.62	2.0	0.64	9.5	0.28	7.0	0.35	12.0	0.21	2.0	0.53	2.0	0.50	2.0	0.56
Intrusive igneous rock (37)	KJ1	2013-2023 (11)	2.0	0.66	2.0	0.53	2.0	0.75	6.0	0.36	1.0	0.14	11.0	0.59	2.0	0.61	2.0	0.59	2.0	0.63
	GS1-2	2009-2023 (15)	1.0	0.34	1.0	0.43	1.0	0.29	1.0	0.49	1.0	0.60	1.0	0.38	10.5	0.38	10.0	0.44	11.0	0.33
	KH1	2004-2023 (20)	3.0	0.50	3.0	0.61	3.0	0.45	6.0	0.59	11.0	0.46	1.0	0.72	7.0	0.54	2.0	0.59	12.0	0.49
	NW1	2013-2023 (11)	1.0	0.52	1.0	0.55	2.0	0.55	4.5	0.58	7.0	0.45	2.0	0.70	6.5	0.59	1.0	0.45	12.0	0.72
	NS1	2011-2023 (13)	4.0	0.77	4.0	0.78	5.0	0.83	6.5	0.72	6.0	0.65	7.0	0.78	4.5	0.83	4.0	0.81	5.0	0.86
	BA1	2006-2023 (18)	10.0	0.37	8.0	0.31	10.0	0.44	1.0	0.46	1.0	0.36	1.0	0.55	10.0	0.36	10.0	0.35	10.0	0.38
	SC1-1	2009-2023 (15)	10.0	0.65	10.0	0.51	10.0	0.80	5.5	0.66	7.0	0.52	4.0	0.80	9.0	0.62	9.0	0.43	9.0	0.80
	AS3	2006-2023 (18)	9.0	0.61	9.0	0.65	9.0	0.54	4.0	0.70	2.0	0.77	6.0	0.63	8.5	0.58	9.0	0.66	8.0	0.50
	AD1	2011-2023 (13)	1.0	0.60	1.0	0.57	2.0	0.64	1.0	0.68	1.0	0.71	1.0	0.64	1.5	0.54	1.0	0.45	2.0	0.62
	YG1	2012-2023 (12)	1.0	0.36	1.0	0.32	1.0	0.46	1.0	0.58	1.0	0.99	1.0	0.17	1.0	0.23	1.0	0.14	1.0	0.33
	YJ1	2011-2023 (13)	4.0	0.49	5.0	0.55	4.0	0.50	6.0	0.54	2.0	0.57	10.0	0.52	6.5	0.50	7.0	0.55	6.0	0.46
	YJ2	2011-2023 (13)	2.0	0.72	2.0	0.74	2.0	0.68	4.5	0.41	2.0	0.46	7.0	0.36	2.0	0.64	2.0	0.65	2.0	0.64
	YG1-1	2013-2023 (11)	1.0	0.43	1.0	0.43	1.0	0.43	1.0	0.52	1.0	0.58	1.0	0.46	1.0	0.41	1.0	0.41	1.0	0.40
	OC1	2012-2023 (12)	6.0	0.47	5.0	0.38	7.0	0.75	11.0	0.51	12.0	0.44	10.0	0.58	8.0	0.64	10.0	0.53	6.0	0.75
	OC2	2012-2023 (12)	4.0	0.55	3.0	0.35	4.0	0.82	7.5	0.42	12.0	0.21	3.0	0.63	3.0	0.67	2.0	0.50	4.0	0.83
	WJ2	2007-2023 (17)	2.0	0.46	2.0	0.80	2.0	0.38	1.0	0.43	1.0	0.73	1.0	0.12	7.0	0.65	2.0	0.67	12.0	0.63
	WJ4	2007-2023 (17)	2.0	0.60	1.0	0.46	2.0	0.77	1.5	0.77	1.0	0.74	2.0	0.81	1.5	0.41	1.0	0.19	2.0	0.62
	ES1	2007-2023 (17)	2.0	0.59	1.0	-0.75	3.0	0.64	2.0	0.38	1.0	0.41	3.0	0.34	2.0	0.64	1.0	0.67	3.0	0.61
	ES2	2007-2023 (17)	2.0	0.50	2.0	0.81	2.0	0.35	6.5	0.65	2.0	0.85	11.0	0.46	3.0	0.47	2.0	0.69	4.0	0.25
	ES3	2007-2023 (17)	6.0	0.30	6.0	0.36	5.0	0.47	12.0	0.51	12.0	0.31	12.0	0.71	12.0	0.53	12.0	0.54	12.0	0.53
	IC1	2008-2023 (16)	7.0	0.65	8.0	0.67	5.0	0.69	1.0	0.74	1.0	0.72	1.0	0.75	7.0	0.74	8.0	0.75	6.0	0.74
	IC2	2008-2023 (16)	2.0	0.75	2.0	0.81	3.0	0.85	1.5	0.77	1.0	0.79	2.0	0.75	2.5	0.78	2.0	0.75	3.0	0.81
	IC3	2008-2023 (16)	2.0	0.71	2.0	0.70	2.0	0.77	1.0	0.77	1.0	0.76	1.0	0.78	7.0	0.58	2.0	0.57	12.0	0.60
	JS1	2010-2023 (14)	1.0	0.64	1.0	0.72	1.0	0.58	1.0	0.67	1.0	0.75	1.0	0.59	1.0	0.48	1.0	0.59	1.0	0.38
	JE1	2009-2023 (15)	1.0	0.51	1.0	0.57	1.0	0.55	1.5	0.27	2.0	0.46	1.0	0.08	1.0	0.52	1.0	0.49	1.0	0.54
	JC1-1	2007-2023 (17)	2.0	0.68	2.0	0.66	3.0	0.73	2.0	0.60	1.0	0.52	3.0	0.67	2.5	0.61	2.0	0.60	3.0	0.63
	JP1	2010-2023 (14)	6.0	0.69	6.0	0.83	6.0	0.71	6.0	0.79	8.0	0.88	4.0	0.71	6.0	0.74	6.0	0.78	6.0	0.69
	JC1	2009-2023 (15)	5.0	0.40	5.0	0.46	8.0	0.46	1.5	0.46	2.0	0.46	1.0	0.47	6.5	0.51	5.0	0.46	8.0	0.56
	CC1	2008-2023 (16)	2.0	0.82	2.0	0.84	2.0	0.83	1.0	0.80	1.0	0.82	1.0	0.79	2.5	0.75	2.0	0.76	3.0	0.75
	CC2	2008-2023 (16)	3.0	0.72	3.0	0.75	3.0	0.76	2.5	0.80	2.0	0.81	3.0	0.79	3.5	0.67	3.0	0.71	4.0	0.64
	PC1	2010-2023 (14)	1.0	0.42	1.0	0.45	1.0	0.41	1.0	0.50	1.0	0.53	1.0	0.47	1.0	0.30	1.0	0.31	1.0	0.28
	PC2	2010-2023 (14)	1.0	0.35	1.0	0.55	1.0	0.28	6.5	0.57	1.0	0.71	12.0	0.43	1.0	0.25	1.0	0.26	1.0	0.25
	HC1-1	2010-2023 (14)	3.0	0.79	3.0	0.88	3.0	0.73	12.0	0.67	12.0	0.90	12.0	0.43	3.0	0.75	3.0	0.80	3.0	0.70
	HC2	2010-2023 (14)	5.0	0.52	6.0	0.78	5.0	0.51	6.5	0.46	8.0	0.67	5.0	0.25	5.0	0.72	5.0	0.86	5.0	0.58
	HC1	2012-2023 (12)	2.0	0.58	1.0	0.51	2.0	0.68	1.0	0.66	1.0	0.57	1.0	0.76	2.0	0.52	2.0	0.43	2.0	0.60
	HS1	2009-2023 (15)	3.0	0.62	4.0	0.65	3.0	0.61	6.0	0.66	10.0	0.82	2.0	0.49	7.5	0.56	12.0	0.60	3.0	0.52
	HS2	2013-2023 (11)	2.0	0.33	1.0	0.15	2.0	0.64	1.0	0.41	1.0	0.08	1.0	0.74	1.5	0.30	1.0	0.24	2.0	0.35

Table 2. Continued

Hydrogeological unit (number)	Well name	Monitoring period (years)	Total period				Rainy seasons (from 21 of June to 20 of September)						Dry seasons (except for rainy seasons)							
			Total period		The first half		The second half		Total period		The first half		The second half		Total period		The first half		The second half	
			AP ¹⁾	Cor ²⁾	AP	Cor	AP	Cor	AP	Cor	AP	Cor	AP	Cor	AP	Cor	AP	Cor		
Metamorphic rock (25)	GP1-1	2014-2023 (10)	3.0	0.85	3.0	0.86	3.0	0.88	2.0	0.83	2.0	0.85	2.0	0.81	3.0	0.82	3.0	0.78	3.0	0.87
	GC1-1	2012-2023 (12)	5.0	0.72	6.0	0.66	5.0	0.78	5.5	0.85	8.0	0.83	3.0	0.87	8.0	0.71	7.0	0.65	9.0	0.78
	GP1	2010-2023 (14)	2.0	0.43	2.0	0.67	2.0	0.49	1.0	0.22	1.0	0.33	1.0	0.11	2.0	0.53	2.0	0.63	2.0	0.43
	GP2	2010-2023 (14)	3.0	0.50	3.0	0.61	3.0	0.45	6.0	0.59	11.0	0.46	1.0	0.72	7.0	0.54	2.0	0.59	12.0	0.49
	MA2	2005-2023 (19)	3.0	0.63	3.0	0.64	3.0	0.61	6.5	0.63	1.0	0.55	12.0	0.71	3.0	0.61	3.0	0.60	3.0	0.63
	MA3	2007-2023 (17)	10.0	0.46	10.0	0.54	10.0	0.37	2.0	0.57	1.0	0.57	3.0	0.57	10.0	0.42	10.0	0.54	10.0	0.29
	MJ1	2013-2023 (11)	1.0	0.65	1.0	0.64	1.0	0.73	1.0	0.58	1.0	0.62	1.0	0.54	1.0	0.58	1.0	0.57	1.0	0.59
	BR1	2014-2023 (10)	12.0	0.48	12.0	0.48	12.0	0.66	11.0	0.77	12.0	0.77	10.0	0.78	12.0	0.52	12.0	0.43	12.0	0.61
	BY1	2011-2023 (13)	1.0	0.51	2.0	0.55	1.0	0.55	8.5	0.16	5.0	0.06	12.0	0.25	1.0	0.52	1.0	0.57	1.0	0.48
	SJ1	2010-2023 (14)	1.0	0.33	1.0	0.35	5.0	0.43	1.0	0.63	1.0	0.52	1.0	0.73	9.0	0.50	12.0	0.59	6.0	0.41
	SJ2	2010-2023 (14)	1.0	0.22	1.0	0.25	1.0	0.38	1.0	0.57	1.0	0.50	1.0	0.64	6.5	0.37	12.0	0.42	1.0	0.32
	SC1	2013-2023 (11)	2.0	0.72	2.0	0.61	2.0	0.79	2.0	0.72	2.0	0.72	2.0	0.71	7.0	0.62	12.0	0.59	12.0	0.04
	SA1	2013-2023 (11)	4.0	0.45	8.0	0.42	3.0	0.52	7.5	0.63	3.0	0.58	12.0	0.69	10.0	0.45	9.0	0.46	11.0	0.44
	AD2	2011-2023 (13)	3.0	0.31	2.0	0.49	3.0	0.15	1.0	0.31	1.0	0.35	1.0	0.27	12.0	0.26	12.0	0.48	12.0	0.04
	YG2	2012-2023 (12)	2.0	0.55	2.0	0.51	2.0	0.58	1.5	0.69	2.0	0.69	1.0	0.70	1.5	0.36	1.0	0.25	2.0	0.47
	YY1	2013-2023 (11)	1.0	0.44	1.0	0.51	1.0	0.54	2.5	0.82	3.0	0.81	2.0	0.84	1.0	0.43	1.0	0.50	1.0	0.36
	JA1	2011-2023 (13)	2.0	0.45	2.0	0.53	2.0	0.39	1.5	0.14	2.0	0.26	1.0	0.01	2.0	0.32	2.0	0.35	2.0	0.29
	CY1	2013-2023 (11)	1.0	0.43	2.0	0.35	1.0	0.58	11.0	0.25	12.0	0.16	10.0	0.34	1.0	0.30	1.0	0.24	1.0	0.37
	PJ2	2012-2023 (12)	2.0	0.66	2.0	0.75	2.0	0.70	3.5	0.45	2.0	0.47	5.0	0.43	1.5	0.57	1.0	0.58	2.0	0.55
	PT1	2007-2023 (17)	12.0	0.39	12.0	0.48	12.0	0.42	1.5	0.16	1.0	0.13	2.0	0.19	11.0	0.56	12.0	0.61	10.0	0.51
	PT2	2007-2023 (17)	6.0	0.50	6.0	0.64	3.0	0.53	8.0	0.61	4.0	0.68	12.0	0.55	7.5	0.61	11.0	0.71	4.0	0.51
	PT3	2007-2023 (17)	3.0	0.83	3.0	0.83	3.0	0.83	7.5	0.66	8.0	0.55	7.0	0.77	3.0	0.79	3.0	0.81	3.0	0.78
	HD1	2012-2023 (12)	3.0	0.80	3.0	0.75	3.0	0.85	3.0	0.69	3.0	0.67	3.0	0.71	2.5	0.78	2.0	0.77	3.0	0.80
	HD2	2010-2023 (14)	3.0	0.72	3.0	0.68	4.0	0.77	2.0	0.56	1.0	0.44	3.0	0.69	3.0	0.71	3.0	0.67	3.0	0.75
	HS4	2006-2023 (18)	2.0	0.36	1.0	0.23	2.0	0.64	3.5	0.26	1.0	0.06	6.0	0.46	2.0	0.34	2.0	0.19	2.0	0.48
Non-porous volcanic rock (6)	GC1	2011-2023 (13)	2.0	0.58	2.0	0.72	2.0	0.48	9.0	0.58	6.0	0.68	12.0	0.49	2.0	0.51	2.0	0.61	2.0	0.42
	GH3	2006-2023 (18)	3.0	0.65	3.0	0.78	3.0	0.65	2.0	0.69	2.0	0.63	2.0	0.75	7.5	0.65	4.0	0.74	11.0	0.55
	MY1	2013-2023 (11)	3.0	0.53	2.0	0.45	3.0	0.77	6.0	0.52	1.0	0.11	11.0	0.92	2.0	0.59	1.0	0.50	3.0	0.68
	MY2	2013-2023 (11)	3.0	0.50	3.0	0.50	2.0	0.56	5.5	0.47	7.0	0.45	4.0	0.49	8.0	0.41	4.0	0.41	12.0	0.41
	BS1	2013-2023 (11)	1.0	0.44	1.0	0.56	1.0	0.35	1.0	0.45	1.0	0.59	1.0	0.31	1.0	0.43	1.0	0.52	1.0	0.33
	HP2	2013-2023 (11)	1.0	0.51	1.0	0.57	1.0	0.66	1.0	0.58	1.0	0.53	1.0	0.62	1.0	0.52	1.0	0.55	1.0	0.48
Limestone (2)	MK1	2013-2023 (11)	2.0	0.80	2.0	0.75	2.0	0.85	1.0	0.59	1.0	0.46	1.0	0.73	2.0	0.76	2.0	0.75	2.0	0.76
	JC2	2007-2023 (17)	1.0	0.44	1.0	0.60	1.0	0.35	1.0	0.70	1.0	0.65	1.0	0.74	5.5	0.34	1.0	0.43	10.0	0.24

¹⁾AP: accumulation period (months), ²⁾Cor: correlation coefficient

대비하기 위해서는, 우리나라의 수리지질 특성을 대표하는 수문지질단위별로 분석 기간을 구분하여 기후변화에 따른 취약성을 평가하는 것이 필요하다.

3.2. 수문지질단위

이 연구에서는 수문지질단위별로 위치한 80개 관측공의 일단위 지하수위 시계열 자료를 이용하였다. 관측공별 지하수위 관측 기간은 최소 10년부터 최대 20년까지로, 기후변화가 지하수계에 미치는 영향을 평가하기에는 비교적 짧은 기간으로 판단된다. 따라서 일차적으로 관측공별 전체 기간을 전반기(5~10년)와 후반기(5~10년)로 구분한 후, 수문지질단위별로 위치한 각 관측공의 AP 변화를 분석하였다. 또한 최근 집중호우와 극한 가뭄 발생 주기가 짧아짐에 따른 지하수계의 영향을 평가하기 위하여, 각 관측공을 대상으로 풍수기와 갈수기를 구분한 후 각각 전반기와 후반

기의 AP를 분석하였다(Table 2). 이때 풍수기와 갈수기는 환경부의 『댐과 보 등의 연계운영규정』에 따라, 각각 6월 21일부터 9월 20일까지와 풍수기를 제외한 나머지 기간으로 구분하여 적용하였다(MoE, 2018).

전체 대상기간에 대한 수문지질단위별 AP는 투수성이 상대적으로 양호한 석회암, 비단공질 현무암 및 쇄설성 퇴적암 분포 지역에서 각각 1.5, 2.2 및 3.0개월로 낮지만, 결정질 암석으로 구성된 관입회성암과 변성암 분포 지역에서는 각각 3.3개월과 3.5개월로 투수성이 높은 지역에 비해 AP가 상대적으로 높은 것으로 분석된다(Table 3)(Fig. 3).

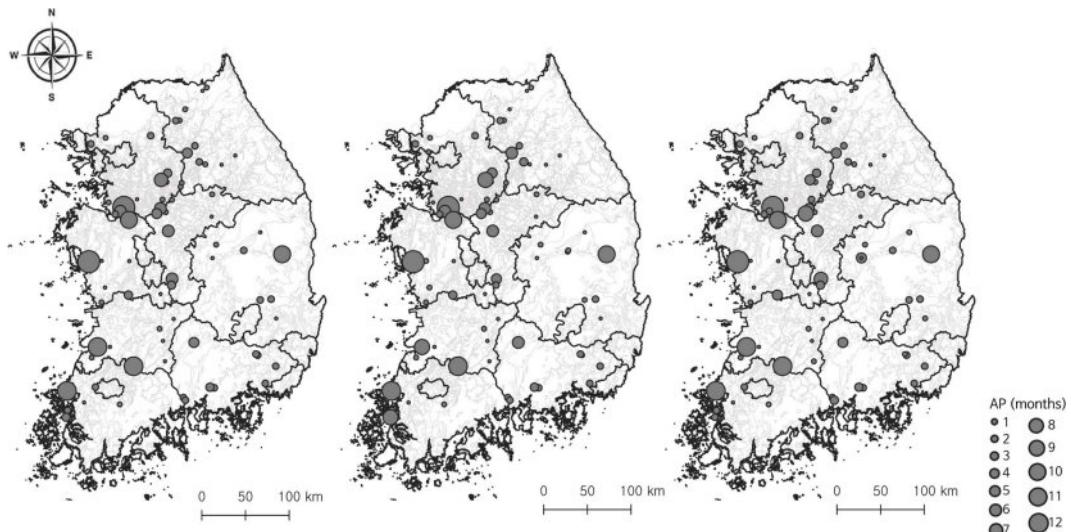
전체 대상 기간을 전반기와 후반기로 구분하여 분석한 결과 투수성이 가장 낮은 일부 변성암 지역 일부를 제외하면, 전체적으로 전반기에 비해 후반기의 AP가 평균 0.1개월(0~0.8개월) 상승하는 것으로 나타났다.

풍수기를 대상으로 분석한 결과 전체 대상기간에 대한

Table 3. Accumulation periods with correlation coefficients during each period

Hydrogeological unit	Number	Total period		First half		Second half	
		AP ¹⁾	Cor ²⁾	AP	Cor	AP	Cor
Clastic sedimentary rock	10	3.0	0.49	2.9	0.59	3.7	0.45
Intrusive igneous rock	37	3.3	0.56	3.2	0.55	3.5	0.60
Metamorphic rock	25	3.5	0.53	3.7	0.56	3.6	0.58
Non-porous volcanic rock	6	2.2	0.54	2.0	0.59	2.0	0.58
Limestone	2	1.5	0.62	1.5	0.67	1.5	0.60
Average	80	3.2	0.54	3.2	0.56	3.3	0.59

¹⁾AP: accumulation period (months), ²⁾Cor: correlation coefficient

**Fig. 3.** Accumulation periods during each period: total (a), first half (b), and second half (c).

수문지질단위별 AP는 석회암 지역의 1.0개월을 제외하면 3.9~5.1개월 범위(평균 4.0개월)에 해당하는 것으로 나타났다(Table 4)(Fig. 4). 전반기와 후반기로 구분한 평균 AP는 각각 3.7개월과 4.4개월로, 후반기의 AP가 동일시간 간격의 전반기(3.7개월)에 비해 0.7개월 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 동일한 조건의 장기간 가뭄이 발생하는 경우, 전반기에 비해 후반기의 지하수의 공급 능력이 상대적으로 낮아진다고 해석이 가능하다. 따라서 최근

기후변화 심화에 따른 가뭄 취약성이 증가하는 것으로 판단된다. 수문지질단위별로는 결정질 암석인 관입화성암의 AP 증가폭이 0, 3개월로, 다른 수문지질단위에 비해 적은 것으로 나타났다.

갈수기를 대상으로 분석한 결과 전체기간에 대한 수문지질단위별 AP는 3.6~5.1개월(평균 4.5개월) 범위에 비교적 균질하게 분포하며, 풍수기 AP(4.0개월)에 0.5개월 증가한 것으로 나타났다(Table 5) (Fig. 5). 전반기와 후반기로 구분

Table 4. Accumulation periods with correlation coefficients for rainy season

Hydrogeological unit	Number	Total period		First half		Second half	
		AP ¹⁾	Cor ²⁾	AP	Cor	AP	Cor
Clastic sedimentary rock	10	5.1	0.55	4.6	0.60	5.5	0.50
Intrusive igneous rock	37	3.9	0.58	3.7	0.60	4.0	0.56
Metamorphic rock	25	4.1	0.53	3.6	0.51	4.6	0.56
Non-porous volcanic rock	6	4.1	0.55	3.0	0.50	5.2	0.60
Limestone	2	1.0	0.65	1.0	0.55	1.0	0.74
Average	80	4.0	0.56	3.7	0.56	4.4	0.56

¹⁾AP: accumulation period (months), ²⁾Cor: correlation coefficient

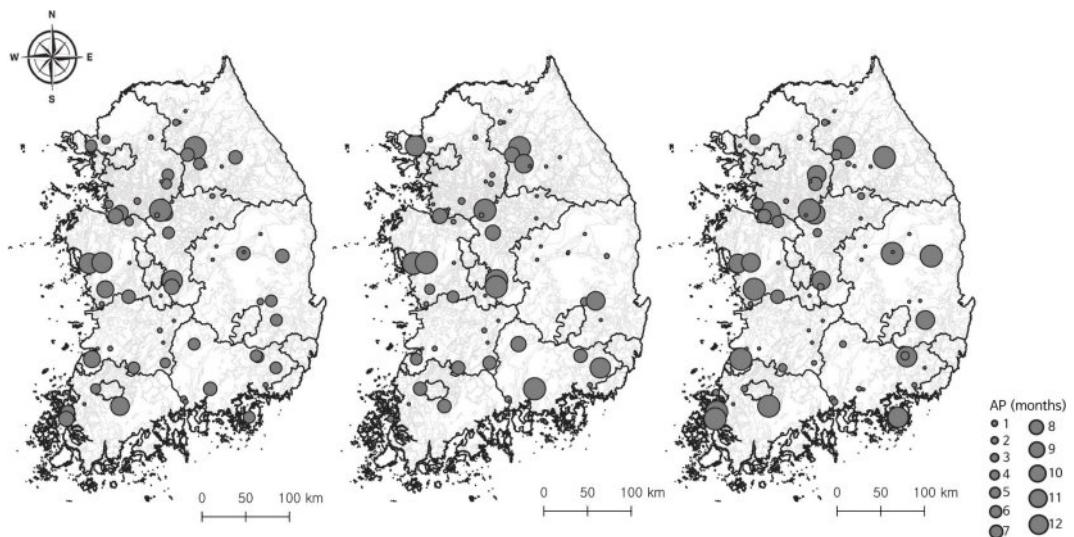


Fig. 4. Accumulation periods for rainy season: total (a), first half (b), and second half (c).

한 평균 AP는 각각 4.2개월과 4.9개월로, 후반기의 AP가 전반기에 비해 0.7개월 증가하는 것으로 분석되었다. 그러나 전반기와 후반기의 AP는 풍수기에 비해 각각 0.5개월

증가한 것으로 나타났다. 이는 풍수기와 마찬가지로 전반기에 비해 후반기의 지하수의 공급 능력이 상대적으로 낮아지며, 특히 갈수가 풍수기에 비해 가뭄이 지하수계에

Table 5. Accumulation periods with correlation coefficients for dry season

Hydrogeological unit	Number	Total period		First half		Second half	
		AP ¹⁾	Cor ²⁾	AP	Cor	AP	Cor
Clastic sedimentary rock	10	3.9	0.51	3.5	0.54	4.3	0.47
Intrusive igneous rock	37	4.5	0.56	3.9	0.55	5.1	0.57
Metamorphic rock	25	5.1	0.53	5.5	0.54	4.7	0.52
Non-porous volcanic rock	6	3.6	0.52	2.2	0.56	5.0	0.48
Limestone	2	3.8	0.55	1.5	0.59	6.0	0.50
Average	80	4.5	0.54	4.2	0.55	4.9	0.53

¹⁾AP: accumulation period (months), ²⁾Cor: correlation coefficient

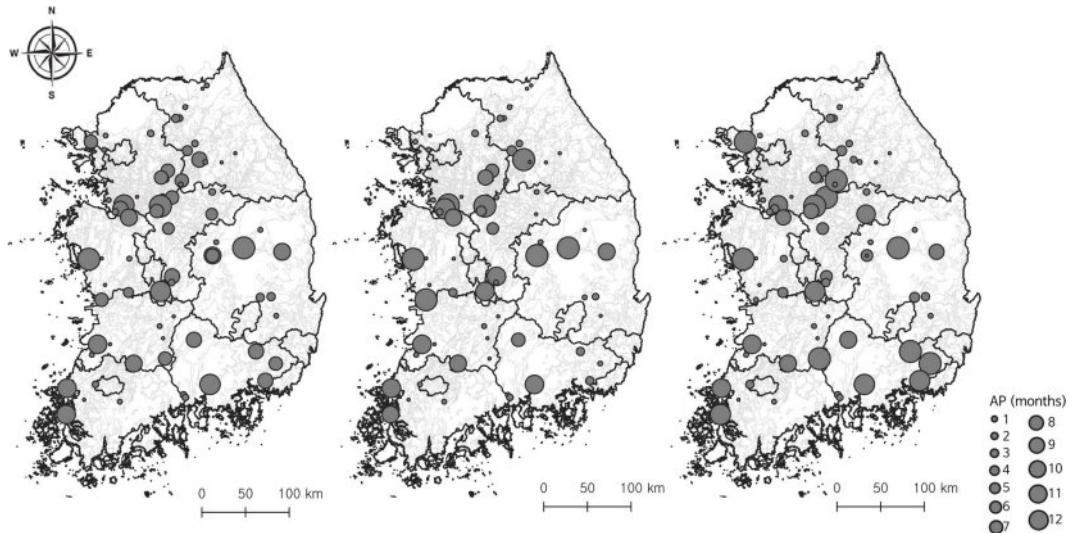


Fig. 5. Accumulation periods for dry season: total (a), first half (b), and second half (c).

미치는 영향이 커지는 것으로 해석이 가능하다. 따라서 기후변화 심화에 따른 가뭄 취약성이 풍수기에 비해 갈수기에 상대적으로 커지는 것으로 판단된다.

4. 토의 및 결론

최근 기후위기 심화에 따라 가뭄 발생의 빈도와 강도가 증가하고 있으며, 이에 따라 수자원의 효율적인 이용 측면에서 시·공간적인 불확실성이 증가하고 있다. 그러나 지하수위 변동은 자연적인 변화 요인과 별개로 지구 온난화에 따른 극사상 증가, 토지피복 변화에 따른 불투수층 증가 및 지하수 이용량 증가 등 인간 활동에 따른 영향이 복합적으로 작용한다.

지하수위는 강수량과 달리 특정한 기간 중의 자료를 누적할 필요가 없는 연속적인 변동자료로, 극한 가뭄 등이 발생하는 경우 관측공에서 측정되는 시계열 자료를 적절한 정규화 과정을 거쳐 대수층 내의 지하수자원의 변동을 정량적으로 평가할 수 있다.

기후변화에 수반된 급격한 수문변화가 대수층에 미치는 영향을 체계적으로 평가하기 위해서는, 수문지질단위별로 많은 관측공으로부터 장기간의 지하수위 관측자료 확보가 필수적이다. 이 연구에서는 제한된 조건에서 양질의 자료 획득이 가능한 농촌지하수관측망 중 10년 이상 자료가 축적된 80개소 관측공을 분석 대상으로 선정하였다.

분석 기준은 SPI와 SGI 상관분석에서 계산된 상관계수의 최대 개월수인 AP를 이용하였다. 분석 방법은 대상 관측공의 지하수위 시계열 자료를 전체 관측기간과 풍수기 및 갈수기에 대해 각각 전반기와 후반기로 구분하였으며, 해당 관측공이 위치한 수문지질단위별로 전반기와 후반기의 AP 변화를 분석하였다. 이때 5개 수문지질단위별로 계산된 평균 AP 값은 관측망이 위치한 지점의 지형 또는 단층(또는 절리 등)과 같은 수리구조의 특성이 반영될 수 있는 한계가 있지만, 이 연구에서는 전반적인 평가에 주안점을 두고 해석하였다.

이러한 분석 결과를 종합하여 기후변화 심화가 지하수계에 미치는 취약성을 평가하면, 다음과 같은 결론 도출이 가능하다.

- 전체 대상기간에 대해 계산된 AP는 투수성이 상대적으로 앙호한 석회암, 비단공질 현무암 및 쇄설성 퇴적암 분포 지역에서 낮게 나타났으며, 투수성이 불량한 관입화성암과 변성암 분포 지역에서 상대적으로 높게 나타났다. 전체 대상기간을 전반기와 후반기로 구분하면, 전반기에 비해 후반기의 AP가 상승하는 것으로 평가된다.

- 풍수기의 경우 전체 대상기간에 대해 계산된 평균 AP는 4.0개월, 전반기와 후반기의 평균 AP는 각각 3.7개월과 4.4개월로 나타났다. 따라서 동일한 조건의 장기간 가뭄이 발생하는 경우, 전반기에 비해 후반기의 지하수 공급 능력이 상대적으로 낮아지는 것으로 판단된다. 또한 투수성이 불량한 지역의 관측공에서의 AP 증가폭이 상대적으로 적게 나타남에 따라, 대수층에 대한 강수의 영향이 적은 것으로 평가된다.

- 갈수기의 경우 전체 대상기간에 대해 계산된 평균 AP는 4.5개월, 전반기와 후반기의 평균 AP는 각각 4.2개월과 4.9개월로 나타났다. 그러나 전반기와 후반기의 AP는 풍수기동일 기간에 비해 각각 0.5개월 증가하였다. 결과적으로 풍수기와 동일하게 전반기에 비해 후반기의 지하수의 공급 능력이 상대적으로 낮아지며, 특히 갈수기가 풍수기에 비해 가뭄이 지하수계에 미치는 영향이 커지는 것으로 판단된다.

종합하면 누적 강수량에 대한 지하수위 반응이 상대적으로 짧은 AP의 경우에는, 대수층이 단기간의 가뭄에는 일시적으로 반응하는 반면 장기간의 가뭄에는 지표수에 비해 상대적으로 영향이 적은 것으로 평가가 가능하다. 반면 지하수위의 반응이 상대적으로 긴 AP로 나타나는 경우는, 장기간의 가뭄 발생 시 지하수계의 회복력이 낮아져 기후변화에 취약성이 높아지는 것으로 해석이 가능하다. 결론적으로 SGI와 SPI의 상관관계에 따른 AP를 이용하여 가뭄에 의한 지하수계의 영향을 평가한 결과, 우리나라 지하수계에 미치는 기후변화 심화에 따른 가뭄 취약성은 점차 증가하는 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 농림축산식품부 재해예방계측사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- Alegría, A., Diaz, D., Ebi, K.L., Eriksen, S.H., Frieler, K., Jamshed, A., Maharaj, S., McLeeman, R., McMillan, J., and Thomas, A., 2022, Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Technical summary of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva.
- Aslam, R.A., Shrestha, S., and Pandey, V.P., 2018, Groundwater vulnerability to climate change: A review of the assessment methodology, *Sci. Tot. Environ.*, **612**, 853-875.
- Bloomfield, J.P. and Marchant, B.P., 2013, Analysis of ground-

- water drought building on the standardised precipitation index approach, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **17**, 4769-4787.
- Choi, Y., Lee, H., and Kwon, J., 2013, Recent change on frequency-magnitude of summer extreme rainfall events over the Republic of Korea. *Geograp. J. Korea*, **47**, 83-97.
- Döll, P., 2009, Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global-scale assessment, *Environ. Res. Lett.*, **4**, 1-12.
- Fetter, C.W., 1988, Applied Hydrogeology. Merrill Publishing Company, Ohio, p.692.
- Kim, D.J., Kang, D.G., Park, J.H., Kim, J.H., and Kim, Y., 2021, Changes in the spatiotemporal patterns of precipitation due to climate change, *Korean J. Agri. Forest Method.*, **23**, 424-433.
- Koo, M.H., Kim, W., and Song, S.H., 2022, Comparison of surface water and groundwater responses to drought using the standardized precipitation index (SPI), *J. Soil Groundwater Environ.*, **27**(5), 1-9.
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 2024, <http://www.groundwater.or.kr>
- McEvoy, D. J., Huntington, J. L., Abatzoglou, J. T., and Edwards, L. M., 2012, An evaluation of multiscalar drought indices in Nevada and eastern California, *Earth Interact.*, **16**(18), 1-8.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., and Leist, J., 1993, The relationship of drought frequency and duration time scales, 8th Conference on Applied Climatology, 17-22 January 1993, Anaheim, California, USA, p.179-184.
- Mishra, A. K. and Singh, V. P., 2010, A review of drought concepts, *J. Hydrol.*, **391**(1-2), 202-216.
- MoE (Ministry of Environment), 2018, Directive of MoE.
- NGIC (National Groundwater Information Center), 2024, <http://www.gims.go.kr>
- Shukla, S. and Wood, A.W., 2008, Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought, *Geophys. Res. Lett.*, **35**(2), L02405.
- Song, S.H., 2018, Assessment of drought effects on groundwater system in rural area using standardized groundwater level index (SGI), *J. Soil Groundwater Environ.*, **23**(3), 1-9.
- Song, S.H., Park, J., and An, J.G., 2015, Estimation of the available amount of groundwater using classifications of landforms and hydrogeological units in N. Korea, *J. Soil Groundwater Environ.*, **20**(7), 23-33.
- Vincente-Serrano, S.M. and Lopez-Moreno, J.I., 2005, Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the Standardized Precipitation Index in a mountainous Mediterranean basin, *Hydro. Earth Syst. Sci.*, **9**(5), 523-533.