

표준강수지수(SPI)를 이용한 가뭄에 대한 지표수와 지하수 반응 비교

구민호^{1*} · 김원겸² · 송성호³

¹공주대학교 지질환경과학과

²(주)인텔리지오

³한국농어촌공사 농어촌연구원

Comparison of Surface Water and Groundwater Responses to Drought using the Standardized Precipitation Index (SPI)

Min-Ho Koo^{1*} · Wonkyeom Kim² · Sung-Ho Song³

¹Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University

²Intellegeo Co. Ltd.

³Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

ABSTRACT

A correlation analysis was performed to investigate differences in the response of surface water and groundwater to drought using the Standardized Precipitation Index (SPI). Water level data of 20 agricultural reservoirs, 4 dams, 2 rivers, and 8 groundwater observation wells were used for the analysis. SPI was calculated using precipitation data measured at a nearby meteorological station. The water storage of reservoirs and dams decreased significantly as they responded sensitively to the drought from 2014 to 2016, showing high correlation with SPI of the relatively long accumulation period (AP). The responses of rivers varied greatly depending on the presence of an upstream dam. The water level in rivers connected to an upstream dam was predominantly influenced by the dam discharge, resulting in very weak correlation with SPI. On the contrary, the rivers without dam exhibited a sharp water level rise in response to precipitation, showing higher correlation with SPI of a short-term AP. Unlike dams and reservoirs, the responses of groundwater levels to precipitation were very short-lived, and they did not show high correlation with SPI during the long-term drought. In drought years, the rise of groundwater level in the rainy season was small, and the lowered water level in the dry season did not proceed any further and was maintained at almost the same as that of other normal years. Conclusively, it is confirmed that groundwater is likely to persist longer than surface water even in the long-term drought years.

Key words : Drought, Groundwater, Surface water, Standardized Precipitation Index (SPI), Accumulation period

1. 서 론

최근 국내에서는 가뭄 시 일부 지역에서 댐과 저수지의 용수공급능력이 현저히 떨어지면서 식수 부족 및 농작물 피해가 빈번히 발생하고 있다. 충남 서북부 지역에서는 2014년에서 2017년까지 발생한 가뭄으로 보령댐의 저수

율이 연일 최저치를 갱신하면서 용수공급 위기상황이 발생하기도 하였다. 최근 이러한 지표수자원의 부족에 대비한 분산형 수원 확보(취수원의 다변화)의 방안으로 지하수의 역할이 중요하게 대두되고 있으며, 이와 관련하여 가뭄에 대한 지하수의 반응을 평가하는 연구들이 활발히 수행되고 있다. Kim et al.(2006)은 표준강수지수(Standardized Precipitation Index: SPI)와 지하수위의 상관성 분석을 통하여 가뭄 평가 인자로서의 지하수위 자료의 활용가능성을 보여주었다. Song et al.(2014)은 제주도의 월별 가뭄지수와 월평균 강수량 변화에 따른 지하수위 변동 특성으로부터 가뭄이 지하수계에 미치는 영향을 평가하였다. 극심한 가뭄이 지속될 경우, 농촌 지역에서는 농업용 지하수 이용량이 급증하고 전국적으로 지하수위 하강이 뚜

주저자: 구민호, 교수

공저자: 김원겸, 대리; 송성호, 연구소장

*교신저자: 구민호, 교수

Email: koo@kongju.ac.kr

Received : 2022. 09. 05 Reviewed : 2022. 09. 13

Accepted : 2022. 10. 06 Discussion until : 2022. 12. 31

렷하게 관측되는 것으로 보고되기도 하였다(Song, 2015). 국내의 경우 농업적 가뭄을 평가할 때 강수량과 저수지의 저류량 및 유입량 등이 주요 평가지표로 이용되는데(Ahn et al., 2009), 최근에는 지하수 자료를 가뭄 평가에 활용하는 연구가 늘고 있다. 지표수와 지하수를 모두 고려하는 가뭄평가 방법이 제시되었으며(Kwon et al., 2006; Kwon and Kim, 2007), 지하수위 로지스틱 회귀 모형을 이용한 가뭄 예측 모형이 개발되기도 하였다(Kim and Lee, 2012).

한편, 국외에서는 지하수 관측을 통하여 가뭄을 평가하는 연구를 오래전부터 수행해 오고 있다. 미국은 1931년 대가뭄 이후 지하수위 변동을 모니터링하기 위한 가뭄관측망을 운영하고 있으며, 지하수위 관측자료를 이용하여 가뭄 단계를 결정하고 있다. 또한 기후변화가 지하수계에 미치는 영향을 모니터링하기 위한 목적으로 지하수기후변화관측망(Ground-Water Climate Response network)을 운영하고 있다. 한편, 가뭄에 대한 지하수 역할이 중요하게 대두되면서, 수문학적 가뭄 평가에 지하수자원을 포함시키려는 연구도 활발하다. Bloomfield and Marchant (2013)는 표준강수지수(SPI)와 동일한 개념의 표준지하수위 지수(Standardized Groundwater level Index: SGI)를 정의하고 14개 관측정 자료를 이용하여 SPI와 SGI의 시계열 분석을 수행하였다. Kumar et al.(2016)는 2000여 개 관측정에서 측정된 지하수위 자료를 이용하여 독일과 네덜란드 지역에서의 SPI와 SGI의 관계를 분석하였다. Leelaruban et al.(2017)은 미국 지하수기후변화관측망 자료를 이용하여 파머가뭄지수, 파머수문가뭄지수, 표준강수지수 등 다양한 가뭄지수와 지하수위와의 상관성을 분석하였다.

가뭄은 기상학적, 수문학적, 농업적, 사회경제적 가뭄으로 분류되며, 여러 가지 가뭄지수를 이용하여 가뭄의 정도를 정량적으로 평가한다. 농업적 가뭄은 작물의 성장에 영향을 미치는 토양수분함량 부족이 지속되는 정도에 의해 정의되고, 강수량, 농업용저수지 저수율, 토양의 유효수분함량, 농업용수 공급능력 등을 토대로 가뭄단계를 결

정한다. 전술한 선행 연구가 보여주는 바와 같이 지하수는 지표수와 마찬가지로 강수에 반응하면서 용수공급 능력이 달라지는 동적 수체이므로 가뭄 대응적 측면에서 가뭄 평가에 적극적으로 활용되어야 한다. 특히, 국내 대부분의 농업 지역에서는 가뭄 시 지하수 이용량을 늘려 가뭄을 극복하므로 대수층의 지하수 공급능력 변화는 매우 중요한 농업적 가뭄의 평가 인자가 되어야 한다. 본 연구에서는 국내의 수문 시계열 관측자료를 이용하여, 지표수와 지하수의 강수(가뭄)에 대한 반응이 어떤 차이가 있는지 분석하였으며, 이를 통하여 지표수-지하수 통합수자원 기반의 농업가뭄 평가의 필요성을 확인하였다.

2. 연구방법

국내 20개 저수지, 4개 다목적댐, 2개 하천, 및 8개 지하수 관측정에서 측정된 수문 시계열 자료를 이용하여 가뭄에 대한 지표수와 지하수의 반응 차이를 분석하였다(Table 1). 강수량은 수문 관측소와 가장 가까운 11개 기상관측소에서 1997년부터 2016년까지 20년 동안 관측된 시계열 자료를 이용하였다.

20개 저수지는 모두 충남지역에 위치하며 공주(우목), 공주(한천), 부여(상천), 보령(성연), 보령(신구), 보령(옥서), 보령(진죽), 청양(적누), 청양(매산), 청양(수정), 청양(화암), 금산(화림), 논산(강청), 서천(축동), 아산(동암), 아산(상성), 아산(성내), 아산(신희), 아산(월랑), 및 아산(죽산) 저수지이다. 한국농어촌공사에서 1997년부터 2016년까지 20년간 관측한 저수율 시계열 자료를 분석에 이용하였다. 댐 및 하천의 경우국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 수문 시계열 자료를 분석에 이용하였으며, 대청댐, 보령댐, 소양강댐, 및 의암댐의 댐수위 자료와 소양강과 가평천에서 관측된 하천수위 자료가 해당된다.

지하수위 분석에는 국가지하수측정망의 3개소(춘천(우두), 가평(가평), 충주(가금))와 농어촌지하수관측망 5개소(공주(우성), 금산(금성), 아산(선장), 아산(영인), 아산(음봉))

Table 1. List of agricultural reservoirs, dams, rivers, and observation wells of which water level monitoring data were used in the study

Agricultural reservoirs (20)	Gongju (Umog), Gongju (Hancheon), Buyeo (Sangcheon), Boryeong (Seongyeon), Boryeong (Singu), Boryeong (Ogseo), Boryeong (Jinjug), Cheongyang (Jeognu), Cheongyang (Maesan), Cheongyang (Sujeong), Cheongyang (Hwaam), Geumsan (Hwalim), Nonsan (Kangchung), Seochon (Chookdong), Asan (Dongam), Asan (Sangseong), Asan (Seongnae), Asan (Sinhyu), Asan (Wallang), Asan (Jooksan)
Dams (4)	Daecheong, Boryeong, Soyanggang, Uiam
Rivers (2)	Soyang River, Gapyeongcheon
Observation wells (8)	Chuncheon (Udo), Gapyeong (Gapyeong), Chungju (Gageum), Gongju (Woosung), Geumsan (Geumseong), Asan (Seonjang), Asan (Youngin), Asan (Eumbong)

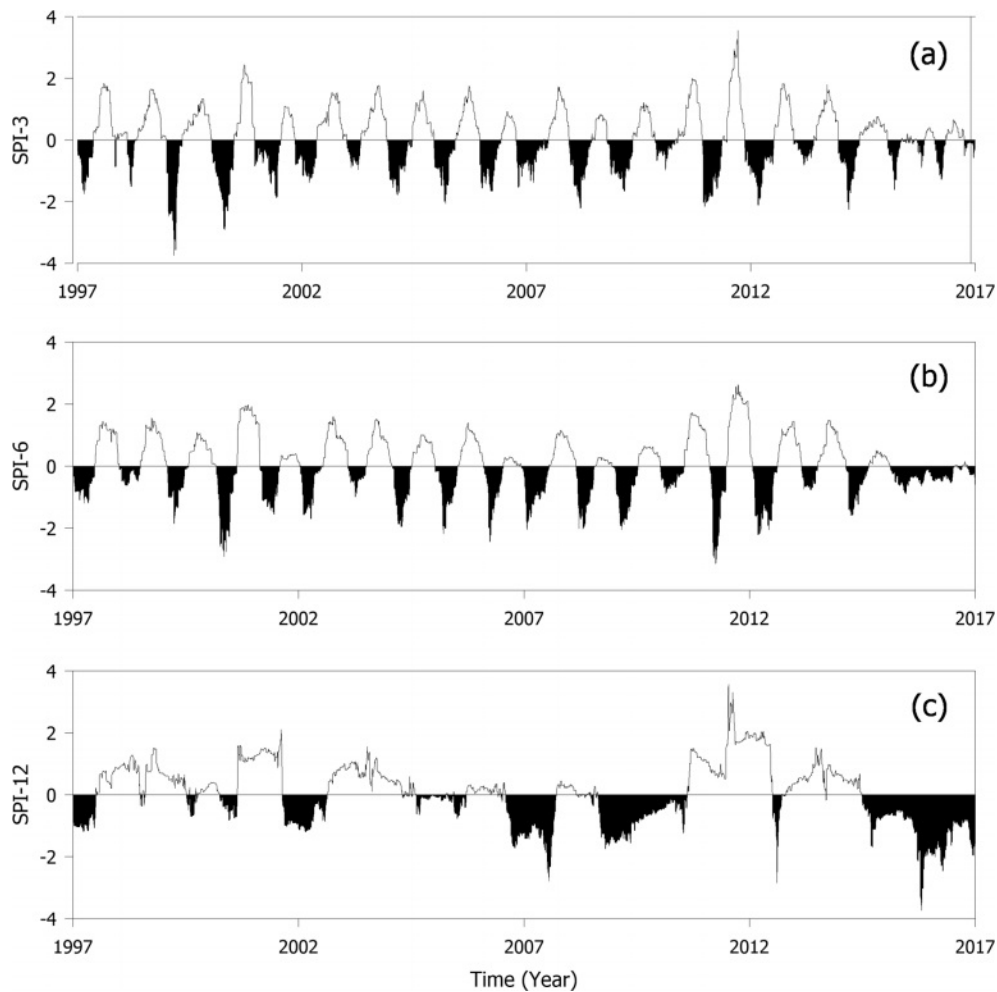


Fig. 1. SPI Time series calculated from precipitation data of Boryung: (a) AP=3, (b) 6, and (c) 12 months.

등 총 8개소의 관측 자료를 이용하였다. 국가지하수측정망 3개소의 경우 1997년부터 2016년까지 20년 동안 관측된 지하수위 시계열 자료를 이용하였으며, 농어촌지하수관측망 5개소 중 2개소(공주(우성), 금산(금성))는 2009년부터 2016년까지 8년 동안 관측된 시계열 자료, 나머지 3개소(아산(전장), 아산(영인), 아산(음봉))는 2006년부터 2016년까지 11년의 시계열 자료를 이용하였다.

표준강수지수(SPI)를 이용하여 가뭄에 대한 지표수 및 지하수의 반응을 분석하기 위하여, 먼저 11개 강수량 관측소별로 강수량 누적기간(accumulation period: AP)에 따른 SPI의 시계열 변화를 계산하였다. SPI는 가뭄의 정도를 평가하기 위해 널리 사용되는 지표로서, AP에 따른 누적강수량 시계열 자료의 확률분포를 정규화하여 표현한 수치이다. Fig. 1은 AP가 3개월(SPI-3), 6개월(SPI-6), 12개월(SPI-12)일 경우, 보령지역의 SPI 변화를 보여준다. SPI-3과 SPI-6은 우기인 여름철에 양의 값을 보이고 건기

인 겨울철에 음의 값을 보여 강수의 계절적 변화가 잘 나타났다. 극심한 가뭄이 발생했던 2014년~2016년의 SPI-3과 SPI-6을 살펴보면 우기에 나타나는 양의 상승 곡선이 매우 약해지면서, 전체적으로 연주기 변동폭이 줄어든 것을 볼 수 있다. 한편, SPI-12는 가뭄기간 내내 음의 값을 보이면서 SPI의 최저값이 나타나, SPI-12에서 장기 가뭄이 잘 표현되는 것으로 확인되었다.

SPI와 수문 관측자료(저수지 저수율, 댐수위, 하천수위 및 지하수위)의 시계열 상관분석을 통해 강수에 대한 지표수 및 지하수의 반응이 어떤 차이를 보이는지 정량적으로 분석하였다. AP를 1개월부터 12개월까지 변화시키면서 SPI 시계열 자료를 생성하였으며, 수문 시계열 자료와의 상관분석을 통해 AP에 따라 상관계수가 어떻게 달라지는지 탐색하였다. 시계열 상관분석은 20년의 전체 관측기간(1997년~2016년)과 3년의 가뭄기간(2014년~2016년)으로 구분하여 수행하였다.

3. 연구결과

3.1. 가뭄에 대한 지표수와 지하수의 반응

3.1.1. 저수지 저수율

20개 저수지의 저수율과 저수지가 위치한 지역의 강수량 자료로부터 계산된 SPI-12를 시계열로 도시하여 비교하였다. Fig. 2는 공주(우목), 청양(적누) 및 부여(상천) 등 3개 저수지에 대한 분석 결과이다. 농업용수를 공급하기 위해 축조된 저수지의 저수율은 농번기인 5월~7월 사이

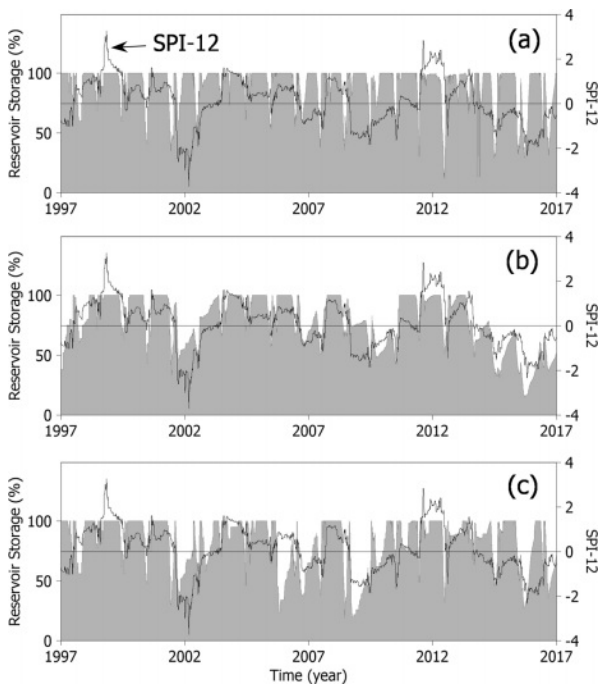


Fig. 2. Time series comparison between SPI-12 and reservoir storage: (a) Gongju (Umog), (b) Cheongyang (Jeongnu), and (c) Buyeo (Sangcheon).

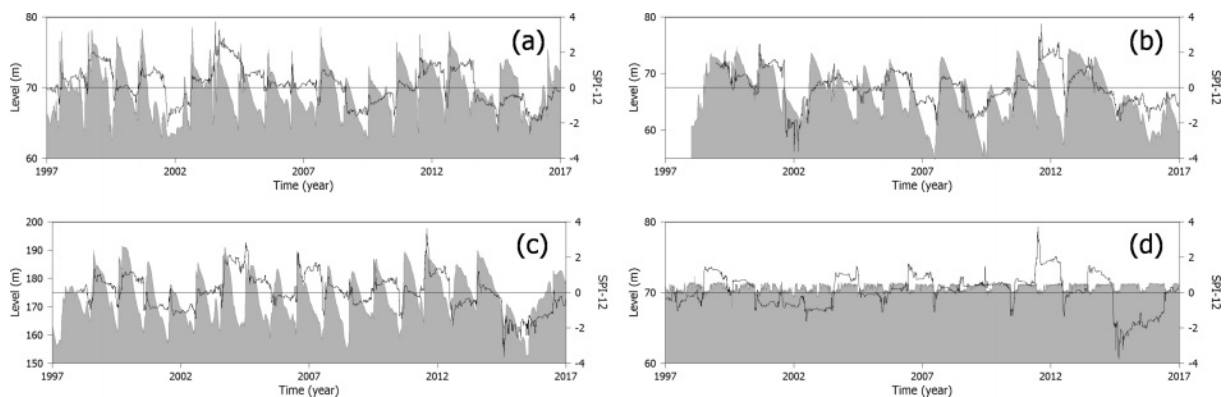


Fig. 3. Time series comparison between SPI-12 and dam level: (a) Daechong Dam, (b) Boryeong Dam, (c) Soyanggang Dam, and (d) Uiam Dam.

농업용수 사용으로 인해 감소하는 것으로 나타났다. 저수지 저수율의 변화폭은 SPI-12에 비해 대체적으로 작았으며 가뭄기에 민감하게 반응하는 것으로 확인되었다. 관측소별로 살펴보면 공주(우목), 보령(진죽) 및 아산(죽산) 등 3개 저수지의 경우, SPI-12에 따른 저수율의 변화는 거의 나타나지 않았으며, 매년 거의 일정한 연변화를 보였다 (Fig. 2a). 공주(한천), 청양(적누), 보령(성연), 청양(수정) 및 논산(강청) 등 5개 저수지의 경우, SPI-12에 따른 저수율 변동이 잘 관측되었으며, 특히 2014년~2016년의 장기 가뭄 동안 저수율이 크게 감소한 것으로 나타났다(Fig. 2b). 한편, 부여(상천), 보령(신구), 보령(옥서), 청양(매산), 청양(화암), 금산(화림), 서천(축동), 아산(동암), 아산(상정), 아산(성내), 아산(신희) 및 아산(월량) 등 대부분의 저수지에서는, SPI-12에 따른 저수율의 변화가 비교적 잘 관측되었으나, 2014년~2016년의 장기 가뭄에도 저수율이 크게 떨어지지 않아 장기 가뭄에 상대적으로 덜 취약한 것으로 나타났다(Fig. 2c).

3.1.2. 댐수위

Fig. 3은 대청댐, 보령댐, 소양강댐, 및 의암댐의 수위와 해당 지역 강수량의 SPI-12를 비교한 것이다. 댐수위는 저수지와 같이 연주기의 주기적인 변동이 잘 관측되었다. 하지만, 다목적댐은 수력발전, 홍수조절, 관개, 상수 및 농업용수 공급 등 다양한 목적으로 이용되므로, 농번기 농업용수 공급에 주로 이용되는 저수지와는 상이한 연주기 변동 패턴을 보였다. 특히, 의암댐의 경우 전력생산을 목적으로 건설된 발전용 댐으로 다른 다목적댐과는 수량관리 방식이 달라 매우 특징적인 수위 변동이 나타났다(Fig. 3d). 의암댐을 제외한 3개 다목적댐의 수위는 SPI-12와 유사한 시계열 변화를 보여 장기 가뭄에 민감하게 반응하

는 것으로 확인되었다.

3.1.3. 하천수위

Fig. 4는 소양강댐 하류 소양강의 춘천관측소와 북한강의 지류인 가평천의 가평관측소에서 측정된 하천수위와 해당 지역 강수량의 SPI-12를 비교한 것이다. 앞서 살펴

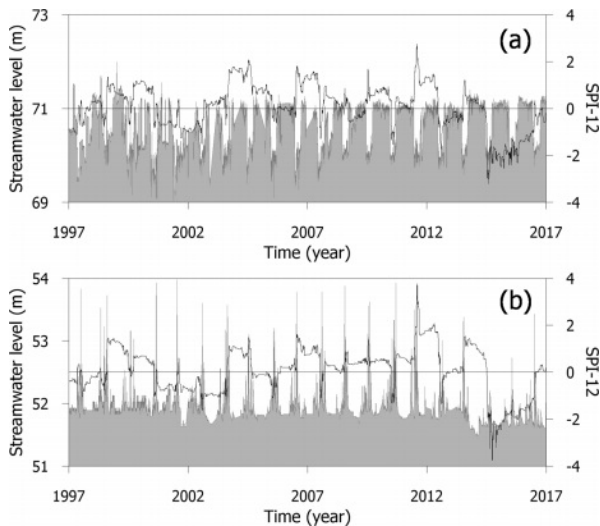


Fig. 4. Time series comparison between SPI-12 and river level: (a) Soyang River and (b) Gapyeongcheon.

본 저수지 및 댐 수위와 달리 하천수위는 강수에 의해 급격히 상승하였다가 하강하는 단기적인 변동이 잘 관측되었다. 소양강댐 하류에 위치한 소양강의 수위는 댐 방류량에 지배적인 영향을 받으며, 장기 가뭄의 영향은 잘 나타나지 않았다(Fig. 4a). 한편, 상류에 댐이 위치하지 않는 가평천의 경우(Fig. 4b), 유출량이 조절되지 않는 국내 자연 하천에서 관측되는 특징적인 하천수위 감수곡선이 잘 나타났다. 즉, 개별 강수 사상에 대한 수위 상승 반응이 매우 뚜렷하며, 장기 가뭄기에는 상승 피크가 약해지며 저수위도 평년에 비해 떨어지는 SPI-12와의 동조화 현상이 잘 나타났다.

3.1.4. 지하수위

Fig. 5는 8개 관측정의 지하수위와 해당 지역 강수량의 SPI-12를 비교한 것이다. 관측된 지하수위는 하천수위와 같이 강수에 의해 상승과 하강을 반복하는 단주기의 변동을 잘 보였으며, 대부분의 관측소에서 1~2 m 내외의 변동이 관측되었다. 아산(음봉) 관측소에서는 매년 농번기에 20 m 정도의 수위강하가 관측되었는데(Fig. 5h), 이는 주변 관정의 양수에 의해 발생한 것으로 추정된다. 공주(우성) 관측소에서는 2011년~2012년에 1 m 정도 지하수위가 하강하여 유지되고 있는데(Fig. 5d), 이는 4대강 사업의

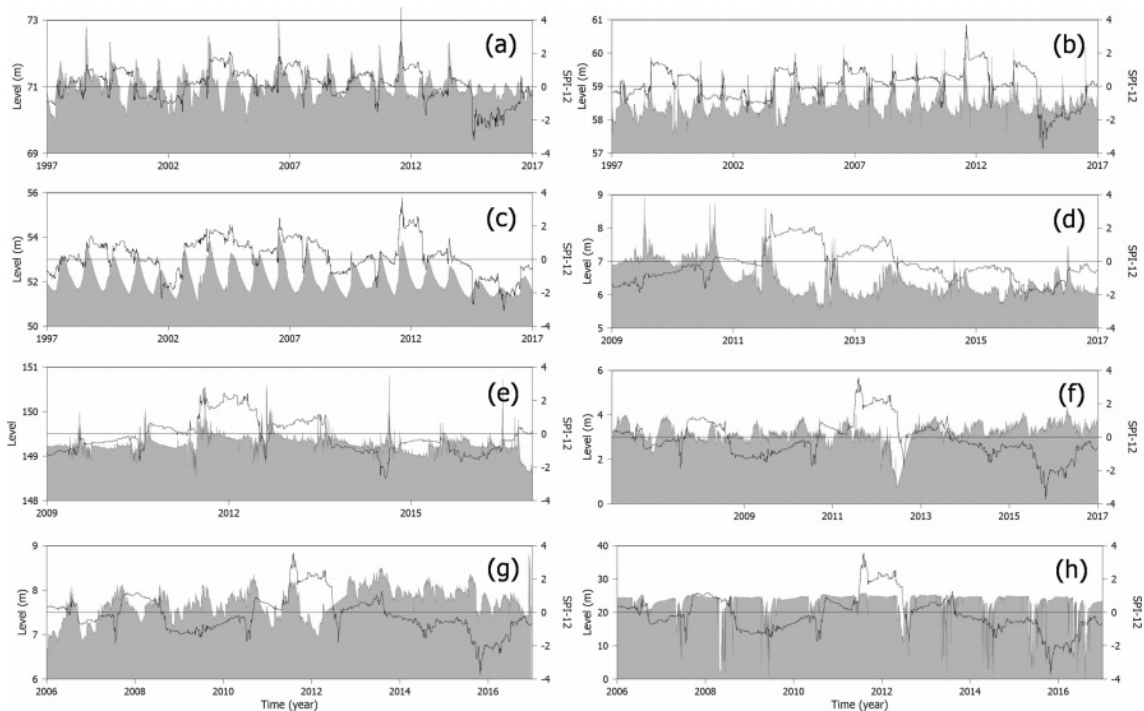


Fig. 5. Time series comparison between SPI-12 and groundwater level: (a) Chuncheon (Udo), (b) Gapyeong (Gapyeong), (c) Chungju (Gageum), (d) Gongju (Woosung), (e) Geumsan (Geumseong), (f) Asan (Seonjang), (g) Asan (Youngin), and (h) Asan (Eumbong).

영향인 것으로 해석된다. 공주(우성) 관측소는 공주보 하류 금강 지류인 유구천 인근에 위치하며, 준설의 영향으로 금강과 유구천의 수위가 하강하면서 인근 지역 지하수에도 영향을 준 것으로 해석된다.

Fig. 5와 같이 분석에 이용된 관측정의 지하수위는 댐 및 저수지와 달리 2014년~2016년의 장기 가뭄 시 SPI-12와의 동조화 현상이 거의 관측되지 않았다. 가뭄기간의 지하수위 변동을 살펴보면, 평년의 풍수기에 잘 관측되는 지하수위 상승은 매우 약해지지만, 갈수기에 관측되는 저수위는 장기간 가뭄이 지속되어도 더 떨어지지 않고 평년과 거의 유사하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 즉, 풍수기의 지하수위는 개별 강수 사상에 빠르게 반응하면서 단기적인 변동을 보여, 풍수기에 함양된 지하수에 대한 대수층의 장기적 저수능력(지속성)은 매우 낮은 것으로 해석된다. 하지만, 2014년~2016년과 같이 장기간 가뭄이 지속될 경우, 지하수는 지표수(댐과 저수지)와 달리 가뭄에 동조화되지 않고 저수위가 유지되는 경향성을 보였다. 결론적으로, 장기 가뭄기에도 지하수는 지표수에 비해 부존량의 감소가 크지 않으며, 대수층의 지하수 공급능력은 크게 떨어지지 않는 것으로 추론된다.

3.2. 수체별 SPI와의 상관분석

3.2.1. 저수지 저수율

Fig. 6은 AP에 따른 SPI와 저수지 저수율의 상관관계수 변화를 도시한 것으로, 1997년~2016년까지의 전체 관측기간과 2014년~2016년의 가뭄기간을 구분하여 분석한 결과이다. 저수지 저수율은 전체적으로 AP가 작을 때 SPI와 낮은 상관성을 보였으며, AP가 커지면서 SPI와의 상관성이 증가하며 AP가 9-11개월 정도에서 가장 큰 값을 보이는 것으로 분석되었다. 저수지별 상관관계수의 변화는

저수지의 규모, 해당 용수구역의 농업용수 수요량 및 저수지의 용수공급 비율 등 다양한 요인에 의하여 발생한 것으로 추정되며, 이에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

Fig. 6의 가뭄기간에 대한 상관분석 결과(white circle)와 전체기간의 결과(black circle)를 비교할 때 상관도의 변화는 매우 유사하게 나타났으며, 최대상관계수는 가뭄기간의 결과에서 더 큰 값을 보였다. Fig. 6과 같이 대부분의 저수지에서의 가뭄기간에 대한 분석에서 3개월 이내의 짧은 AP 기간에 상관도가 다소 감소하는 경향을 보였다. 한편, 논산(강청)과 아산(월랑) 저수지의 경우 가뭄기간에 대한 분석에서 AP에 관계없이 상관관계수가 음의 값으로 산정되어, 전체기간에 대한 분석 결과와 상이한 결과를 보였다(Fig. 6c).

3.2.2. 댐수위

Fig. 7은 AP에 따른 SPI와 댐수위의 상관분석 결과이다. 댐 수위도 저수지와 마찬가지로 AP가 길어질수록 상관관계수가 커지는 경향을 보여, 시계열 자료의 비교에서 논의된 바와 같이 장기적인 강수량의 변동(또는 가뭄)에 동조화되는 것으로 해석된다. 한편, 수력발전용으로 이용되는 의암댐의 경우, 매우 낮은 상관관계수를 보여(Fig. 7d) 강수량의 장단기적 변동에 거의 영향을 받지 않는 것으로 해석된다. 가뭄기간의 분석 결과는 전체기간의 결과와 비교할 때 상관관계수의 최대치가 나타나는 AP가 더 커지는 경향을 보였다. 따라서 가뭄이 장기화 될수록 댐의 수위는 가뭄에 더욱 민감하게 영향을 받게 되며, 가뭄에 대한 댐의 이러한 반응 특성은 2014년~2016년 충남지역에서 발생한 극심한 가뭄 동안 일부 댐에서 관측된 저수율 자료에 잘 나타난다.

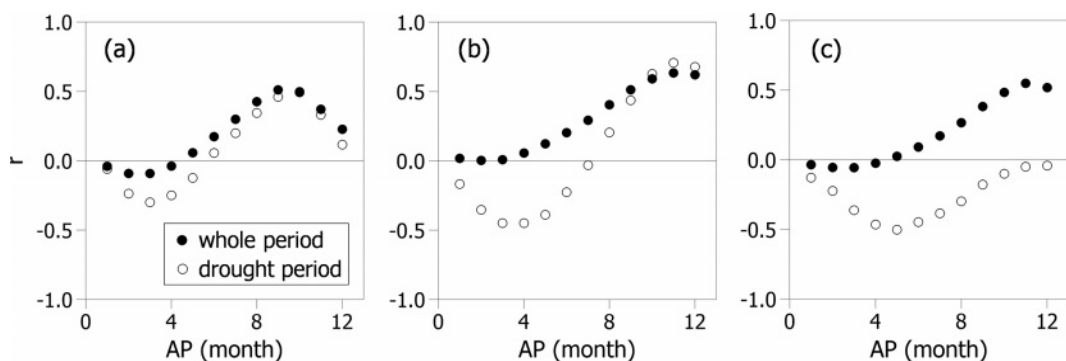


Fig. 6. Correlation analysis between SPI and reservoir storage: (a) Gongju (Umog), (b) Cheongyang (Jeognu), and (c) Nonsan (Kangchung).

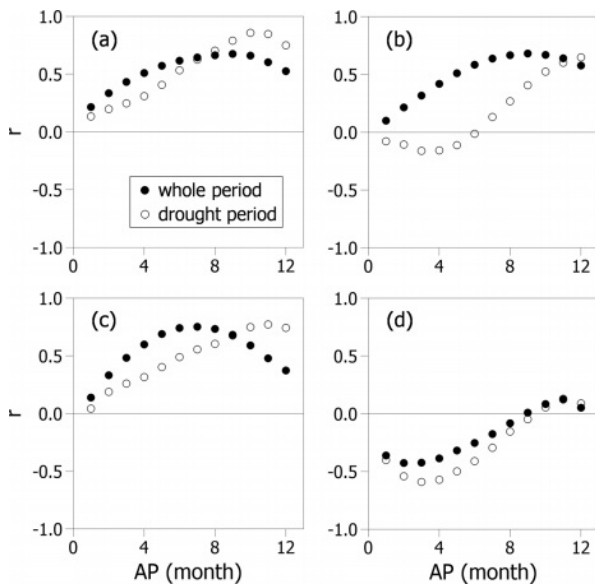


Fig. 7. Correlation analysis between SPI and dam level: (a) Daecheong, (b) Boryeong, (c) Soyanggang, and (d) Uiam Dam.

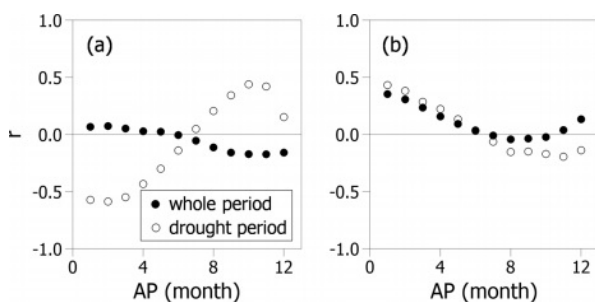


Fig. 8. Correlation analysis between SPI and river level: (a) Soyang River and (b) Gapyeongcheon.

3.2.3. 하천수위

Fig. 8은 SPI와 하천수위의 상관분석 결과이다. 전체 관측기간에 대한 분석 결과를 보면, SPI와 하천수위의 상관성은 저수지와 댐의 분석 결과와 비교할 때 상대적으로 낮게 나타났다. 소양강의 수위는 AP에 관계없이 SPI와의 상관성이 거의 없으며(Fig. 8a), 가평천의 수위는 단기간의 AP에서 SPI와 상관성이 다소 나타난다(Fig. 8b). 즉, 하천수위는 단기간의 강수량 변동에 민감하게 반응하며, 가뭄과 같이 장기적인 강수량 변동에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 해석된다.

한편, 가뭄기간에 대한 상관분석 결과를 보면, 전체기간의 상관분석에서 SPI와의 상관성이 보이지 않았던 소양강의 수위는 장기간의 AP에서 SPI와의 상관성이 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 8a). 이러한 결과는 소양강의 상류

에 위치한 소양강댐이 장기적인 강수량 변화, 즉 장기 가뭄에 민감하게 반응하면서 결과적으로 소양강의 수위에 영향을 주었기 때문인 것으로 해석된다. 하천의 상류지역에 댐 또는 저수지가 위치하는 경우, 하천으로의 방류량이 인위적으로 조절되면서 인공구조물이 없는 자연하천과는 다른 특징적인 하천수위 변동을 보이며, 결과적으로 가뭄에 대한 반응도 크게 달라진다. Fig. 8은 댐에 의해 유출량이 조절되는 하천과 그렇지 않은 자연하천의 가뭄에 대한 반응 차이를 잘 보여준다.

3.2.4. 지하수위

지하수위는 다양한 요인에 의하여 변동하지만, 주로 강수의 함양과 유출에 의하여 끊임없이 상승과 하강을 반복한다. 하천 주변 대수층의 경우 하천과 대수층의 상호작용을 통하여 지하수위 변동이 발생하기도 한다. 국내의 경우 대부분의 지하수 관정이 하천 주변에 위치하고 있어, 하천과 대수층의 상호작용에 의한 지하수위 변동이 크게 발생하고 있는 것으로 보고되고 있다. 수변지역 대수층의 경우 강수 함양과 함께 하천-대수층 상호작용이 중첩되어 지하수위 변동으로 나타난다(Koo et al., 2013). 국내의 많은 하천은 상류지역에 설치된 저수지 또는 댐의 영향을 받으므로, 결국 저수지(댐), 하천 그리고 대수층은 수리적으로 연결된 수체라고 할 수 있다.

Fig. 9는 SPI와 지하수위의 상관분석 결과이며, 지표수(저수지와 댐)와는 매우 다르게 나타났다. 지하수위는 대체적으로 짧은 AP의 SPI와 높은 상관성을 보였으며(Fig. 9a, 9b, 9d, 9g), 최대 상관계수를 나타내는 AP가 길어지거나(Fig. 9c, 9h), AP에 따른 상관성이 크게 달라지지 않거나(Fig. 9e), 상관성이 거의 없는(Fig. 9f) 등 매우 다양한 분석 결과를 보였다.

가뭄기간에 대한 지하수위의 상관분석 결과는 일부 관측소를 제외하고 전체기간에 대한 분석 결과와 유사하다. 가뭄기간의 지하수위는 지표수에 비해 SPI와의 상관성이 비교적 낮으며, 대체적으로 AP가 짧을 때 SPI와 높은 상관도를 보였다. 이는 전술한 바와 같이, 지하수위는 개별 강수 현상에 빠르게 반응하면서 단기적인 변동을 나타내기 때문이다. 한편, 2014년~2016년의 장기 가뭄 동안에도 갈수기에 관측되는 저수위는 더 떨어지지 않고 평년과 거의 유사하게 유지되므로(Fig. 5), AP가 길어지면서 SPI와의 상관성이 떨어지는 결과로 나타났다. 장기 가뭄이 발생하여도 대수층의 지하수 부존량이 유지되는 것을 보여주는 분석 자료이다.

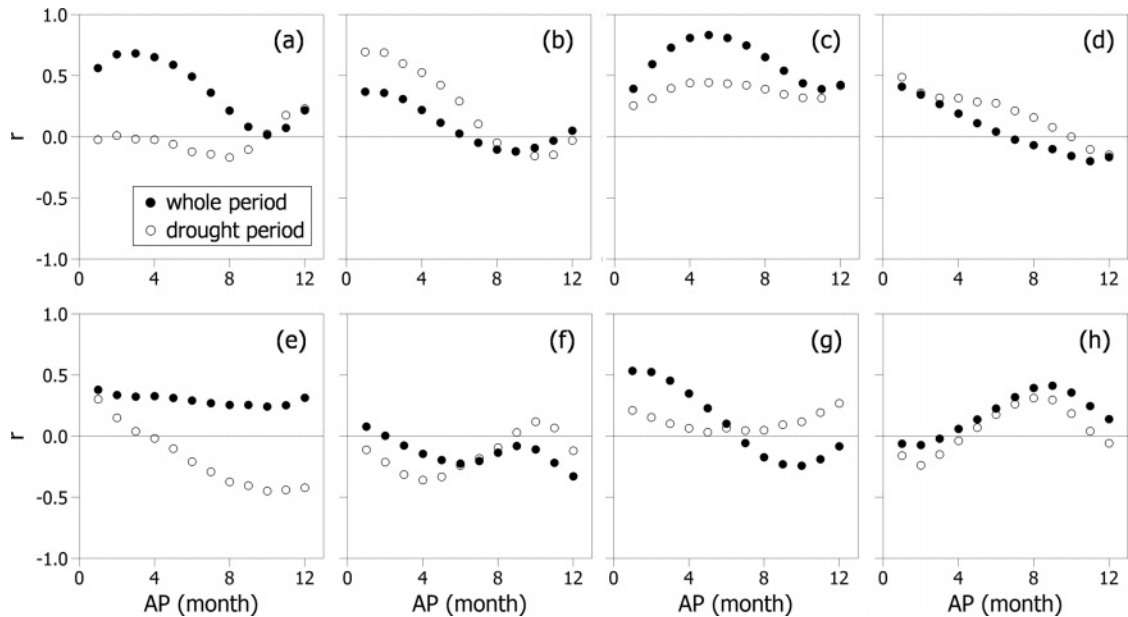


Fig. 9. Correlation analysis between SPI and groundwater level: (a) Chuncheon (Udo), (b) Gapyeong (Gapyeong), (c) Chungju (Gageum), (d) Gongju (Woosung), (e) Geumsan (Geumseong), (f) Asan (Seonjang), (g) Asan (Youngin), and (h) Asan (Eumbong).

4. 결 론

국내 농업 지역에서는 가뭄 시 주로 지하수 개발을 통하여 부족한 용수를 확보하므로 가뭄에 대한 지하수의 반응, 즉 대수층의 지하수 공급능력 변화를 파악하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 국내 수문 관측자료를 이용하여 SPI 시계열 자료를 생성하고, 20개의 저수지, 4개 댐, 2개 하천 및 8개 지하수 관측점에서 측정된 수위와의 시계열 상관분석을 통하여 장기 가뭄에 대한 지표수와 지하수의 반응이 어떤 차이를 보이는지 탐색하였다. 2014년~2016년에 국내에서 발생한 극심한 가뭄은 SPI-12에 잘 나타났으며, SPI와의 수체별 상관분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

먼저, 20개 저수지의 가뭄에 대한 반응을 살펴보면, 17개 저수지에서 SPI-12에 동조하는 저수율 변화가 잘 관측되었다. 17개 중 5개소에서는 2014년~2016년의 장기 가뭄 동안 저수율이 크게 감소하였으며, 나머지 12개에서는 저수율이 크게 떨어지지 않아 장기 가뭄에 상대적으로 덜 취약한 것으로 확인되었다. 한편, SPI와 저수율의 상관성은 대부분의 저수지에서 AP가 9-11개월일 때 가장 높게 나타났다.

다목적댐의 수위는 전체적으로 SPI-12와 유사한 시계열 변화를 보여 장기 가뭄에 민감하게 반응하는 것으로 확인되었다. 댐수위도 저수지와 마찬가지로 AP가 길어질수록

상관계수가 커지는 경향을 보여, 장기적인 강수량의 변동(또는 가뭄)에 동조화되는 것으로 해석된다. 다만, 전력생산을 목적으로 건설된 의암댐의 경우 수량관리 방식이 달라 다른 다목적댐과는 상이한 특징적인 수위 변동을 보였으며, 강수량의 단기적 또는 장기적인 변동에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

하천수위는 상류 댐(또는 저수지)에 의한 하천 유출량 조절 여부에 따라 강수에 대한 반응이 크게 달라진다. 소양강의 수위는 소양강댐 방류량에 지배적인 영향을 받으며, SPI와의 상관성이 거의 없는 것으로 분석되었다. 하지만, 소양강의 수위는 가뭄기간에 대한 상관분석에서 AP가 커질수록 SPI와의 상관성이 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 소양강댐이 장기 가뭄에 민감하게 반응하면서 결과적으로 소양강의 수위에 영향을 주었기 때문인 것으로 해석된다. 상류에 댐이 존재하지 않는 가평천의 경우, 개별 강수에 대한 수위 상승 반응이 뚜렷하며, 단기간의 AP에서 SPI와 다소의 상관성이 있는 것으로 나타났다. 또한, 가평천은 장기 가뭄기간에는 상승 피크가 약해지며 저수위도 평년에 비해 떨어지는 SPI-12와의 동조화 현상이 잘 나타났다.

한편, 지하수는 강수에 대한 반응 기간이 매우 짧았으며, 댐 및 저수지와 달리 장기 가뭄 시 SPI-12와의 동조화 현상이 거의 나타나지 않았다. 가뭄 해의 지하수는 풍수기에 관측되는 지하수위 상승은 매우 약해지지만, 갈수

기의 저수위는 더 떨어지지 않고 평년과 거의 유사하게 유지되면서 장기 가뭄기에도 지표수에 비해 부존량의 감소가 크지 않은 것으로 확인되었다. 결론적으로, 국내 대수층은 풍수기에 함양된 지하수에 대한 장기적 저수능력(지속성)은 매우 낮지만, 장기 가뭄 시 지표수와 달리 가뭄에 동조화되지 않으면서 지하수 공급능력이 크게 떨어지지 않는 것으로 추론된다.

용수구역 내 부존하는 지하수는 지표수(저수지)와 동일한 농업용수 공급 능력을 가지므로 가뭄 평가 인자로 대등하게 활용되어야 한다. 특히, 가뭄이 장기간 지속될 경우 대수층은 저수지보다 더 장기적인 저수 유지 능력을 보이므로 가뭄대응 측면에서 지하수가 더 중요하게 다루어져야 한다. 용수구역 내 농업용 지하수 공급능력을 가뭄 평가에 반영할 경우, 저수지의 저수율에 주로 의존하는 기존의 평가방법에 비해 좀 더 실질적인 농업적 가뭄 평가 결과를 제공할 수 있을 것으로 예상된다. 따라서, 지표수-지하수 통합수자원 기반의 평가 모델을 개발하고, 시범 용수구역을 대상으로 현장 적용성을 평가하는 후속 연구가 필요하다.

사 사

이 논문은 2020년 공주대학교 학술연구지원사업의 연구지원에 의해 연구되었습니다.

References

- Ahn, S., Park, J., Jung, I., Na, S., and Kim, S., 2009, Hydrological drought assessment of agricultural reservoirs based on SWSI in Geum River Basin, *J. Kor. Soc. Agric. Eng.*, **51**(5), 35-49 (in Korean with English abstract).
- Bloomfield, J.P., Marchant, B.P., 2103, Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **17**, 4769-4787.
- Kim, G. and Lee, S., 2012, Applicability of logistic regression model of groundwater level to drought forecast, *J. Geol. Soc. Kor.*, **48**(3), 275-284 (in Korean with English abstract).
- Kim, G., Yun, H., and Kim, D. 2006, Relationship between standardized precipitation index and groundwater levels: A proposal for establishment of drought index wells, *J. Soil Groundw. Environ.*, **11**(3), 31-42 (in Korean with English abstract).
- Koo, M., Kim, T., Kim, S., Chung, S., Kang, I., Lee, C., and Kim, Y., 2013, Estimating groundwater recharge using the water-table fluctuation method: effect of stream-aquifer interactions, *J. Soil Groundw. Environ.*, **18**(5), 65-76 (in Korean with English abstract).
- Kumar, R., Musuuza, J.L., Van Loon, A.F., Teuling, A.J., Barthel, R., Broek, J.T., Mai, J., Samaniego, L., and Attinger, S., 2016, Multiscale evaluation of the Standardized Precipitation Index as a groundwater drought indicator, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **20**, 1117-1136.
- Kwon, H. and Kim, S., 2007, Methodology of drought assessment using national groundwater monitoring network data, *J. Kor. Soc. Civi Eng.*, **27**(2B), 193-199 (in Korean with English abstract).
- Kwon, H., Park, H., Hong, D., and Kim, S., 2006, A study on semi-distributed hydrologic drought assessment modifying SWSI, *J. Kor. Water Resour. Assoc.*, **39**(8), 645-658 (in Korean with English abstract).
- Leelaruban, N., Padmanabhan, G., and Oduor, P., 2017, Examining the relationship between drought indices and groundwater levels, *Water* **9**(2), 82; doi:10.3390/w9020082.
- Song, S., 2015, Effect of drought on the decrease of the amount of groundwater for agriculture, *J. Kor. Soc. Agricultural Eng.*, **57**(4), 25-30 (in Korean with English abstract).
- Song, S., Lee, B., Choi, K., Kim, J., and Kim, G., 2014, Evaluation of drought effect on groundwater system using groundwater level data in jeju island, *J. Environ. Sci. International.*, **23**(4), 637-647 (in Korean with English abstract).