



# Combined analysis of meteorological and hydrological drought for hydrological drought prediction and early response - Focussing on the 2022-23 drought in the Jeollanam-do -

Jeong, Minsu<sup>a</sup> · Hong, Seok-Jae<sup>b</sup> · Kim, Young-Jun<sup>c</sup> · Yoon, Hyeon-Cheol<sup>d</sup> · Lee, Joo-Heon<sup>e\*</sup>

<sup>a</sup>Senior Researcher of Drought Research Center, Goyang, Korea

<sup>b</sup>Master, Department of Civil Engineering, Joongbu University, Goyang, Korea

<sup>c</sup>Ph.D Student, Department of Civil Engineering, Joongbu University, Goyang, Korea

<sup>d</sup>Center Manager, National Integrated Drought Center, National Disaster Management Research Institute, Ulsan, Korea

<sup>e</sup>Professor, Civil Engineering Department, Joongbu University, Goyang, Korea

Paper number: 23-083

Received: 22 October 2023; Revised: 22 February 2024; Accepted: 7 March 2024

## Abstract

This study selected major drought events that occurred in the Jeonnam region from 1991 to 2023, examining both meteorological and hydrological drought occurrence mechanisms. The daily drought index was calculated using rainfall and dam storage as input data, and the drought propagation characteristics from meteorological drought to hydrological drought were analyzed. The characteristics of the 2022-23 drought, which recently occurred in the Jeonnam region and caused serious damage, were evaluated. Compared to historical droughts, the duration of the hydrological drought for 2022-2023 lasted 334 days, the second longest after 2017-2018, the drought severity was evaluated as the most severe at -1.76. As a result of a linked analysis of SPI (Standardized Precipitation Index), and SRSI (Standardized Reservoir Storage Index), it is possible to suggest a proactive utilization for SPI(6) to respond to hydrological drought. Furthermore, by confirming the similarity between SRSI and SPI(12) in long-term drought monitoring, the applicability of SPI(12) to hydrological drought monitoring in ungauged basins was also confirmed. Through this study, it was confirmed that the long-term dryness that occurs during the summer rainy season can transition into a serious level of hydrological drought. Therefore, for preemptive drought response, it is necessary to use real-time monitoring results of various drought indices and understand the propagation phenomenon from meteorological-agricultural-hydrological drought to secure a sufficient drought response period.

**Keywords:** Drought Propagation, Meteorological Drought, Standardized Precipitation Index, Standardized Reservoir Supply Index, Hydrological drought

## 수문학적 가뭄 예측과 조기대응을 위한 기상-수문학적 가뭄의 연계분석 - 2022~23 전남지역 가뭄을 대상으로

정민수<sup>a</sup> · 홍석재<sup>b</sup> · 김영준<sup>c</sup> · 윤현철<sup>d</sup> · 이주현<sup>e\*</sup>

<sup>a</sup>중부대학교 가뭄연구센터, 책임연구원, <sup>b</sup>중부대학교 토목공학과, 석사, <sup>c</sup>중부대학교 토목공학과, 박사과정,  
<sup>d</sup>국립재난안전연구원 방재연구실 국가통합가뭄센터, 국가통합가뭄센터장, <sup>e</sup>중부대학교 토목공학과 교수

## 요 지

본 연구는 전남지역 지역을 대상으로 과거에 발생했던 주요 가뭄사상을 선정하여 기상학적 가뭄과 수문학적 가뭄 발생 메커니즘을 분석하였다. 강우량 및 댐저수량을 입력자료로 일단위의 가뭄지수를 선정하였으며 기상학적 가뭄에서 수문학적 가뭄으로의 가뭄전이특성을 분석하였다. 최근에 전남지역에서 발생하여 심각한 피해를 야기한 2022~23년의 가뭄 특성을 평가하였으며, 과거에 발생했던 가뭄과 비교하면, 수문학적 가뭄의 지속기간은 2017~2018년 다음으로 장기간인 334일 지속되었고, 가뭄 심도는 -1.76으로 가장 심각한 것으로 평가되었다. 또한, 기상학적 가뭄지수인 SPI (Standardized Precipitation Index)와 수문학적 가뭄지수인 SRSI(Standardized Reservoir Storage Index)를 연계분석한 결과, 수문학적 가뭄 대응을 위한 SPI(6)의 선행적 활용방안을 제시할 수 있었다. 더우기, SRSI와 SPI(12)의 가뭄감시의 유사성을 통하여 미계측 지역의 수문학적 가뭄감시에 SPI(12)의 적용가능성도 확인하였다. 본 연구결과를 통하여 여름철 우기에 발생하는 장기간의 건조현상은 심각한 수준의 수문학적 가뭄으로의 전이가 될 수 있음을 확인했다. 따라서 선제적 가뭄대응을 위해서는 다양한 가뭄지수 실시간 모니터링 결과를 활용하고, 기상-농업-수문학적 가뭄으로의 전이현상을 이해하여 충분한 대응기간을 확보할 필요가 있다.

**핵심용어:** 가뭄전이 특성, 기상학적 가뭄, 표준강수지수, 표준저수지공급지수, 수문학적 가뭄

\*Corresponding Author. Tel: +82-31-8075-1615

E-mail: leejh@joongbu.ac.kr (Lee, Joo-Heon)

## 1. 서론

가뭄 판단의 근거는 일차적으로는 강수의 부족을 꼽을 수 있다(Kwak *et al.*, 2012). 강수의 부족은 자연이 유역에 공급할 수 있는 물 부족을 의미하는 것으로 인간이 주도할 수 있는 권한 밖 일일 것이다. 2022년 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)의 발표에 따르면 2020년 9월부터 트리플 딥 라니냐(triple-dip La Niña, 3년 연속 가뭄발생)에 따라 전 세계 가뭄 발생의 위험이 높음을 제시한 바 있으며, 한반도는 강우 발생이 Below-Normal 단계인 60이하로 평가되었고, 2022년 9월부터 2023년 2월까지 6개월간 지속 가능성을 75%의 확률로 내다본 바 있다. 결과적으로 2022~23년 남부지방에 기상학적 가뭄에서 수문학적 가뭄으로의 전이는 상당한 가뭄 피해를 야기시켰다. 따라서 과거로부터 축적된 관측 자료를 기반으로 기후변화 시대에 맞는 실질적 가뭄 대응 및 정책적 활용방안 마련이 절실히 되고 있다.

복잡한 가뭄상황을 정량적으로 모니터링하기 위하여 가뭄 정의에 따른 다양한 가뭄지수가 개발되었다(Sur *et al.*, 2019; Shin *et al.*, 2020). 따라서 어떤 가뭄지수를 선택하고, 어떤 방법으로 가뭄을 감시할지를 결정하는 것은 중요한 문제이다(Won and Chung, 2016; Lee *et al.*, 2021). 가뭄지수를 산정하는 경우 여러 입력 자료로 복잡한 절차에 따라 산정을 할 수도 있고, 단일 입력 자료 기반으로 산정할 수도 있다. 다만, 대상지역의 상황을 고려한 최선의 가뭄지수 선정이 필요하다. Nalbantis (2008)은 하천 유량의 단일한 입력 자료를 적용함에 따른 자료 수집, 절차의 단순성 및 수문학적 가뭄지수 분석에 효과성을 제시한 바 있다.

유역의 수문순환을 고려하는 가뭄 전이 분석은 가뭄의 발생 및 전이과정을 이해하고, 이를 통해 가뭄 대응을 위한 중요한 기초 정보를 수집하는데 있어 유용성을 갖는다. Maliva and Missimer (2012)는 가뭄의 시작을 강수량 부족에 따른 물수지 불균형 현상으로 정의하고, 가뭄의 시작을 강수량 부족에서 비롯됨을 제시하였다(Lee *et al.*, 2020). 따라서 자연적인 상태에서 유역에 유입되는 강수의 부족은 농업적 또는 수문학적 가뭄으로의 시간 흐름에 따른 순차적인 가뭄 전파로 이어지는 양상을 가뭄전이로 이해할 수 있다(Wang *et al.*, 2016; Savenije *et al.*, 2014).

동일 지역의 가뭄은 유사한 발생 특성을 가질 수 있지만, 기상상태의 시간적 변화 양상과 인위적 활동 등 다양한 상황을 고려하는 경우 동일 지역이라 하더라도 복잡한 양상을 보일 수 있다. 따라서 가뭄 전이 분석은 가뭄 유형을 구분하는데 유용성을 가질 수 있다. Yu *et al.* (2018)은 가뭄 저수지의 저수율

을 이용한 전이 분석을 통해 계절성을 고려한 가뭄 및 강수의 발생형태에 따른 가뭄 등 5가지 유형의 가뭄으로 구분하여 제시하였고, Peters (2003)는 강수량, 토양수분, 지하수 수위, 하천 유량 비교를 통해 가뭄 전이의 발생원인 및 계절 특성 등에 따라 다를 수 있음을 통해 네 가지 가뭄 상황을 구분한 바 있다.

전이특성에는 가뭄 지속기간(Duration), 규모(Magnitude), 심도(Severity)로 구분되며, 두 지수 간의 지체(Lag), 연장(Lengthen), 감쇠(Attenuation), 풀링(Pooling) 등과 같은 전이특성 분석에 적용된다(Van Loon, 2015). 이를 위해서는 가뭄사상별 가뭄 시작(Onset)과 종료(Termination)일이 결정되어야 하며, 낮은 수준의 습윤 발생을 강수 부족량으로 간주하는 풀링개념이 함께 검토될 수 있다(Yoo *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2021).

본 연구는 2022-2033년 발생한 전라남도 가뭄 중에서 순천 지역에 위치하는 주암댐을 대상으로 기상학적 가뭄과 수문학적 가뭄의 발생기작에 대해 평가하고 이에 대한 인과관계를 확인하였다. 기상학적 가뭄평가는 순천의 일별 강수량을 입력 인자로 SPI (Standardized Precipitation Index; McKee *et al.*, 1993)를 적용하였고, 수문학적 가뭄평가는 일별 댐 저수량을 입력인자로 하는 SRSI (Standardized Reservoir Supply Index; Gusyev *et al.*, 2015)를 적용하였다. 또한, 가뭄지수 간의 전이 분석을 수행하였다.

본 연구의 주안점을 둔 부분은, SPI가 시간규모(Time Scale) 별 여러 지속기간을 갖고 있으므로 다양한 형태의 가뭄 감시에 활용될 수 있는 장점이 있음에도 불구하고, 기상인자인 강수량만을 사용한다는 점에서 기상학적 가뭄 감시에만 활용되는 상황이다. 따라서 서로 다른 시간규모별 SPI를 적용하여 수문학적 가뭄과의 연계분석 및 효율적인 가뭄 감시와 전망 방안을 도출하고자 하였다.

## 2. 대상지역 선정 및 입력자료 구축

### 2.1 연구대상지역 선정: 순천 주암댐

본 연구에서는 2022~2023년 발생한 남부지방 가뭄 중에서 가장 심각한 가뭄 피해를 경험한 전남지역을 대상으로 하였다. 특히, 전남지역의 생·공용수 공급을 담당하는 주요 댐의 용수 부족을 확인함에 따라 댐을 대상으로 수문학적 가뭄을 평가하였다. Fig. 1은 전남지역 22개 시군별 제1수원을 구분한 것으로 다목적 댐과 용수댐의 수원 공급을 색깔로 구분하여 나타내었다. 다목적 댐으로는 주암댐, 장흥댐, 섬진강댐이 있고, 생공용수 전용댐은 평림댐이 있다. 여러 댐들 중에서

광양 한 곳에만 물 공급이 이루어지는 섬진강댐을 제외하면 주암댐이 연간용수 공급계획량이 270.1(백만 m<sup>3</sup>)으로 가장 많고, 전남 22개 시군 중에서 7개 시군에 생활 및 공업용수를 제공하고 있으며, 1991년부터 가장 오랜 관측기록을 보유하고 있다. 따라서 기상에서 수문학적 가뭄으로의 전이 분석 대상으로 순천지역에 위치하는 주암댐을 선정하였다.

2.2 입력 자료구축

본 연구의 기상학적 가뭄평가에는 강수량을 입력자료로 산정할 수 있는 SPI(6)을 적용하였고, 수문학적 가뭄평가는 댐 저수량으로 평가하였다. 강수와 댐 저수량은 2016년부터 시행되고 있는 기상 및 수문학적 가뭄평가를 통한 월별 가뭄 예·경보(관심, 주의 경계 심각)를 위한 인자이다.

강수량 자료는 주암댐이 위치하는 순천지역을 대상으로 하였다. 티센망법의 적용을 위해 기상청 ASOS (Automated Surface Observing System)에 따른 순천(174), 여수(168)의 강우 자료를 수집하였다. 댐의 저수량 자료는 WAMIS (Water Resources Management Information System)에서 제공되는 주암댐의 일별 자료를 적용하였다. 주암댐의 일저수량 자료는 댐의 완공 시기인 1991년부터 제공되고 있다.

Fig. 2는 1991년부터 주암댐 일별 댐 저수량을 도시한 것으

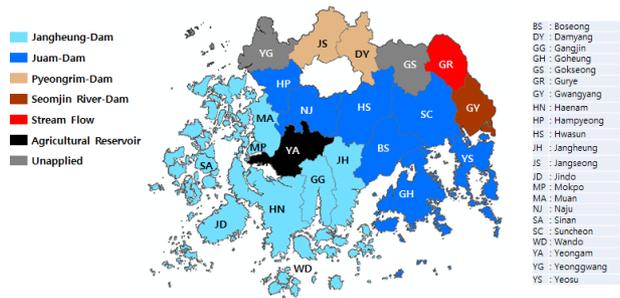


Fig. 1. Classification of Jeollanam-do area considering the domestic and industrial water supply

로 예년 대비 초과(파랑), 비초과(노랑) 및 저수량 부족(빨강)을 구분하였다. 댐 가뭄 예·경보에 사용되는 관심, 주의, 경계, 심각 기준을 함께 도시하였다. 다만, 구분기준은 댐의 자체적인 용수공급조정 기준에 의한 용수 사용량이 업데이트되므로 적용은 불가한 것으로 판단하였다. 대신하여 농업용 저수지 구분기준인 예년 대비 저수량의 70%(관심), 60%(주의), 50%(경계), 40%(심각) 기준을 적용하였다. 예년은 과거 30년 기준의 평균값을 의미한다.

Fig. 2에서 2022~2023년을 포함한 저수량 부족(빨강)이 7회 이상 발생을 보이고 있다.

3. 연구방법론

3.1 가뭄지수(SPI & SRSI) 선정

가뭄 정의별 가뭄지수 산정을 위한 다양한 방법들이 제시되고 있어 가뭄평가를 위한 지수 선택 문제는 중요하다. 본 연구에서는 국내 가뭄 예·경보에 사용되는 입력자료 기반의 가뭄지수를 선정 대상으로 검토하였다. 그 결과로 기상학적 가뭄은 SPI, 수문학적 가뭄은 SRSI를 적용하였다.

SPI는 강수량만으로 기상학적 가뭄을 평가하기 위해 McKee et al. (1993)이 제시한 대표적인 가뭄지수로 현재까지 가장 많이 사용되는 방법이다. 또한, 입력자료 확보의 용이성, 장기적인 자료 보유 가능성, 산정절차의 단순성, 및 가뭄평가의 적합성 등의 장점이 있다.

SPI 산정절차는 강수를 입력 자료로 통계적 절차에 따라 가뭄 지수화를 통한 입력자료별 값의 상대적인 정도와 가뭄 발생유무를 평가하는 방법이다. SRSI도 SPI와 가뭄 산정절차가 동일하며, SPI와 동일한 가뭄 구분 범주를 가짐에 따라 가뭄 전이 분석에 이점을 갖는다.

Fig. 3은 SPI와 SRSI의 산정절차를 나타내었다. SPI는 강수 시계열을 구성하는 시간규모(Time Scale)별로 3, 6, 12개

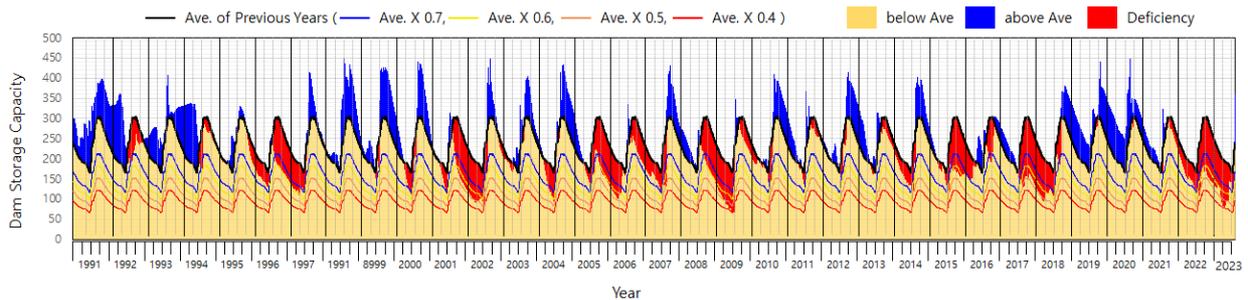


Fig. 2. Time series of Juam-Dam storage capacity compared with historical average and drought occurrences (1991~2023)

월을 적용하였으며, SRSI는 1개월로 고정하여 가뭄지수를 산정하였다. 가뭄지수의 시간단위는 기상청과 동일하게 365개 입력 자료의 누적 자료 구성을 통한 일 단위 가뭄지수를 산정하였다.

**3.2 주요 가뭄사상 선정**

기상학적인 가뭄은 유역에 발생하는 가뭄의 원인적 측면을 제공한다. 반면에 유역의 가용수자원 부족 여부는 댐 저수량으로 판단되며, 예년 대비 가용수자원 부족 시 유역에 직접적인 가뭄 피해로 이어진다. 따라서 수문학적 가뭄지수를 토대로 주요 가뭄 사상을 구분하였다. 선정된 가뭄 사상은 국가 가뭄정보포털(<https://www.drought.go.kr>)에서 확인되는 전남지역 역사적 가뭄기록과 SRSI와 유사한 가뭄 발생으로 판단되는 SPI(12)의 가뭄 사상과도 함께 비교 검토하였다.

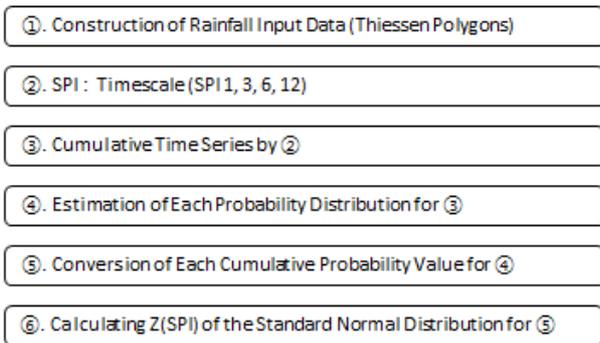


Fig. 3. Calculating procedure of SPI & SRSI

Table 1은 역사적 가뭄기록을 토대로 가뭄 발생연도인 Year를 구분하였고, SPI(12) 및 SRSI를 통한 추가된 가뭄연도를 기입하였다. 각각의 가뭄 발생 여부에 따라 발생은 ○, 미발생은 X로 구분하고, 과거기록에서 2년 연속으로 가뭄이 발생한 연도에서 지수상으로 1년만 가뭄 발생이라고 판단하는 경우는 △로 구분하였다.

역사적 기록에서는 10번의 가뭄 발생이 기록되었고, 이 중 SPI(12)와 6번 일치하였다. 다만, 2015년과 2016년은 수문학적 가뭄지수인 SRSI에서 가뭄 발생을 확인함에 따라서 역사적 가뭄기록과 가뭄지수 간의 가뭄 발생 연도는 10번 중 8번 일치하였고, 2번은 불일치 하는 것으로 나타났다. 다만, 역사적 가뭄기록은 전라남도 22개 시군 모두를 대상으로 하는 반면에 가뭄지수는 순천 주암댐만을 대상으로 비교함에 따라 주요 가뭄 발생 연도는 상당히 높은 일치성을 보이고 있다.

SRSI와 SPI(12)는 2015년, 2016년을 제외하고는 대부분 일치하였다. 다만, 주암댐 완공시점인 1991년부터 1995년까지 댐 운영 초기에는 기상학적 가뭄과 수문학적 가뭄 발생 패턴이 상이한 것을 확인하였다. 2015년과 2016년 및 2017년과 2018년은 SRSI 판단에 따라 연속된 가뭄 사상으로 구분하고, 2006년은 2005~2006년 가뭄으로 정의하였다.

Fig. 4는 수문학적 가뭄인 SRSI 기준으로 주요 가뭄사상을 구분한 것으로 1996~1997, 2001~2002, 2005~2006, 2008~2009, 2015~2016, 2017~2018, 2022~2023년 등 7회 발생한 것으로 나타났다.

Table 1. Comparison of major drought events

Year	Historical Record (Jeollanamdo)	Drought Index based Drought Year (Suncheon)	
		SRSI	SPI(12)
1992~93	X	△ (1992)	○
1994~95	○	△ (1994)	○
1996~97	X	○	○
2000	○	X	X
2001~02	X	○	△ (2002)
2006	○	○ (2005~06)	○ (2005~06)
2008~09	○	○	○
2012	○	X	X
2015	○	○	X
2016	○	○	X
2017	○	○	○
2018	○	○	○
2022~23	○	○	○

### 3.3 독립된 가뭄 사상의 구분기준

개별 가뭄 사상의 결정은 연속이론 개념(Yevjevich, 1967; Kwak *et al.*, 2012)으로 설명될 수 있다. Yoo *et al.* (2016)은 가뭄의 1회 발생을 구분하는데 있어 풀링(Pooling) 개념을 적용하였다. 이 경우 연속적인 건조와 습윤 구간의 상대적인 크기 비교에 따라 가뭄을 구분하였다.

본 연구에서는 다양한 측면에서 가뭄 1회 발생을 구분하고자 하였다. 우선은 가뭄지수는 0을 기준으로 건조(가뭄 포함) 및 습윤 상태가 반복적으로 발생하므로 범례를 크게 습윤과 건조로 나누고, 건조구간을 다시 건조와 가뭄으로 구분하여 “1회 가뭄 발생”을 결정하였다. 건조는 가뭄과 습윤 중 어디에

도 속하지 않는 물 부족의 초기 상태이다. 따라서 습윤(Index > 0), 건조(0 > Index > -1), 가뭄(Index < -1)의 3단계로 구분하여 가뭄 지속기간 전후 습윤 발생 여부에 따른 “1회 가뭄 발생”을 구분하였고, Fig. 5로 제시하였다.

3가지 범례에 따른 1회 가뭄 발생 범주를 적용하여 1991년부터 2023년까지 가뭄지수별 가뭄 발생횟수를 산정하였다. SPI(3), SPI(6), SPI(12)와 SRSI 가뭄 발생횟수는 각각 38, 26, 10, 7회 발생하였다. SPI(3)은 33년간 38회(연평균 1.2회) 발생으로 변동성이 높게 나타남에 따라 역사적 가뭄 발생연도와 연관 분석에서는 제외하였다.

제시된 3가지 범례에 따른 1회 가뭄 발생을 구분하는 것은

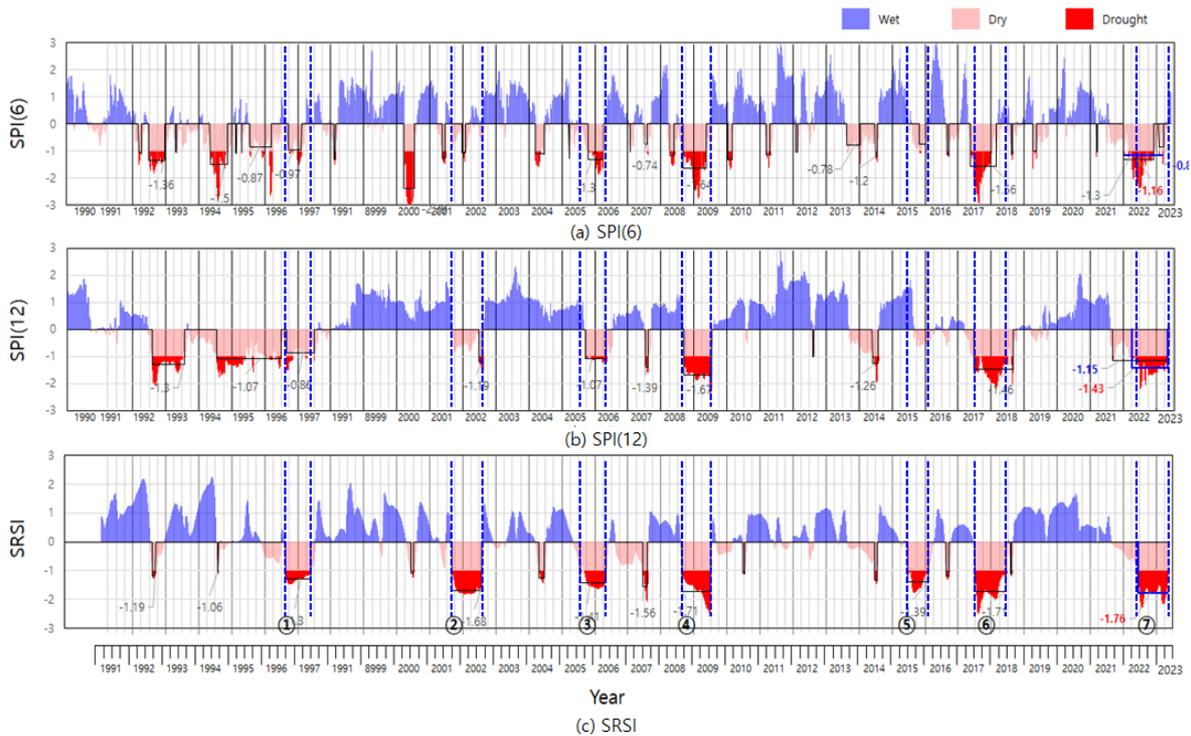


Fig. 4. Plot and meteorological drought events of Suncheon using SPI 3, 6, 12 and Juam-Dam's SRSI (1991~2023)

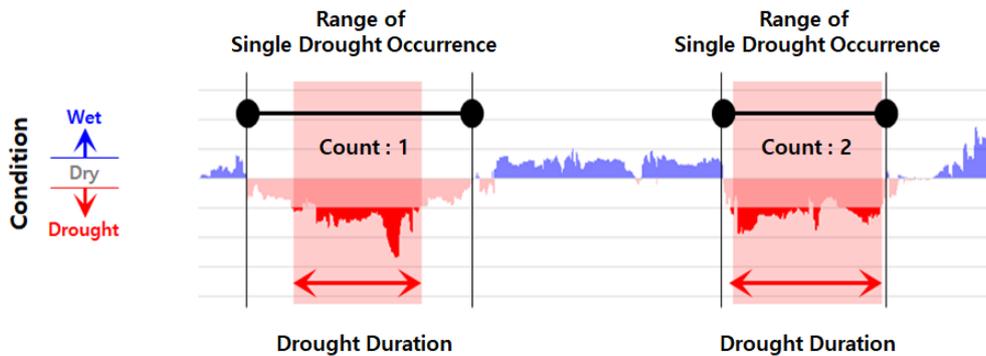


Fig. 5. Concept of temporal category for single drought event

단순하고 빠른 분류가 가능하지만, 실제적인 가뭄 사상으로 적용하기 위해서는 몇 가지 단점이 보완되어야 한다. 풀링(Pooling)은 이러한 단점을 보완하기 위한 방법 중 하나로 습윤 상태가 이전 건조에 비해 크지 않아 가뭄 영향이 지속될 수 있다는 전제하에 두 개 이상의 사상을 하나의 가뭄으로 구분하는 것이다(Yoo et al., 2016; Wang et al., 2021).

따라서 풀링을 적용하여 가뭄 1회 발생에 대한 2차 검토를 수행하였다. Fig. 6은 SPI(6)에 풀링개념을 적용한 가뭄 사상의 2차 검토 방법을 제시하였다. 이 경우 SPI(6)은 2회 가뭄사상과 1회 건조구간 사이에 두 번의 습윤 구간이 발생하고 있다. SPI(6)이 두 번의 가뭄과 하나의 습윤 구간은 풀링개념에 따라 습윤 구간 규모가 가뭄구간에 비해 작게 판단하여 단일 가뭄 사상으로 구분하였다. 반면에 두 번째 가뭄과 세 번째 건조구간 사이에 습윤 구간의 규모를 고려함에 따라 단일 가뭄 사상 구분에서 배제하였다.

1차 및 2차에 걸친 가뭄 1회 구분은 그 자체로 타당성이 있다. 다만, 가뭄 전이를 고려한 연계분석에서는 의문을 가질 수 있다. Fig. 6에서 SPI(6)의 경우는 두 번의 가뭄으로 구분하였지만, 동일 자료의 장기적 시간 규모인 SPI(12)의 경우는 건조구간과 가뭄 구간을 묶어 하나의 사상으로 구분될 수 있다는 것이다. 따라서 가뭄 1회 발생을 구분에 있어 가뭄지수 간 전이 상황을 연계하는 추가 요인을 검토하였다.

또한, 건조구간 발생 시기에 대한 요인도 추가하였다. Fig. 6에서 SPI(12)는 건조구간에서 가뭄까지 연속 1회 가뭄 발생 범주로 구분하였다. SPI(6)의 선행적인 가뭄 발생을 고려하는 경우에 두 번째 습윤 구간은 SPI(12)가 건조에서 0으로 근접하는데 영향을 주는 것으로 판단하였다. 다만, 습윤 상태로 전환되지 않았으며, 우기인 6~9월 사이에 SPI(6)이 지속적 건

조상태를 보임에 따라 SPI(12)는 가뭄으로 이어지는 것으로 판단하였다. 따라서 SPI(6)의 세 번의 건조구간과 두 번의 습윤 구간을 단일 가뭄 사상으로 판단하였다.

결과적으로 두 지수 간 가뭄 전이에 따른 연계 상황 및 가뭄 발생 시기 등의 요인도 가뭄 1회를 구분하는데 함께 고려되는 것으로 판단하였다.

3.4 분야별 가뭄지수 간 전이 분석 및 연관성 분석방법

단일 가뭄지수는 가뭄 시작(Onset)과 종료(Termination)를 결정하고 나면 가뭄 지속기간(Duration), 규모(Magnitude) 및 심도(Severity)를 계산할 수 있으며, 이러한 결과를 토대로 가뭄 전이 분석에 사용된다(Fig. 6). Fig. 4(3.2 참조)는 SPI(6), (12) 및 SRSI 가뭄지수를 습윤, 건조, 가뭄으로 구분하였고, 주요 가뭄사상별 1회 가뭄 발생 범주를 구분하여 지속기간별 가뭄 규모에 따른 가뭄 심도를 제시하였다. 두 지수 간의 가뭄전이 분석에는 감쇠(Attenuation, 가뭄 전이 시 심도의 감소), 지체(Lag, 가뭄지수 간에 가뭄 발생 시점의 차이), 연장(Lengthening, 가뭄 종료 시점 차이에 따른 가뭄 연장/감소) 및 풀링(Pooling) 등 4가지 인자의 분석 결과를 토대로 판단할 수 있다(Van Loon, 2015).

시간적 가뭄 전이는 동일한 계열의 가뭄지수 사이(ex. SPI(6), SPI(12))에서는 단기, 중기 및 장기적 측면에서 접근할 수 있다. 또한, 분야별 가뭄지수 간(ex. SPI(6), SRSI)에는 수문순환을 고려한 가뭄 전이 양상으로 나타날 수도 있다. 이외에도 두 지수 간(ex. SPI(12), SRSI)의 유사성 검토에 활용될 수 있다.

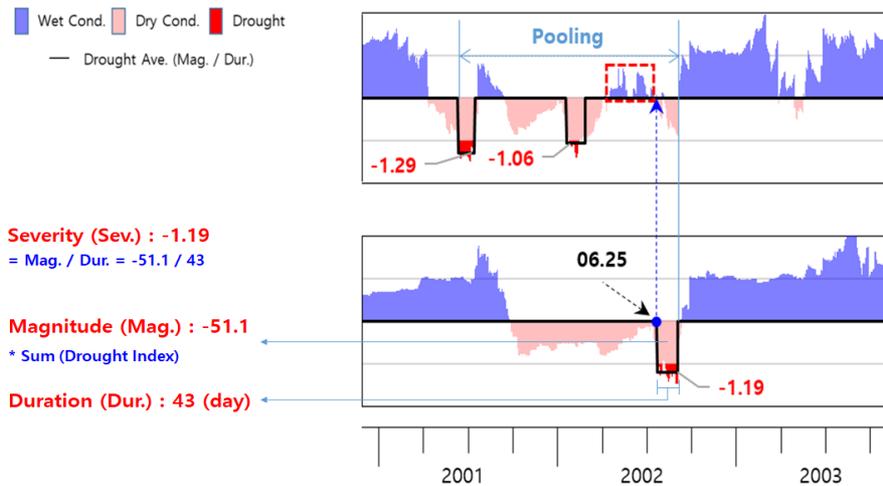


Fig. 6. Pooling of SPI(6) drought events considering SPI(12) and calculation concept of drought duration, magnitude, and severity

### 4. 기상학적 가뭄과 수문학적 가뭄 간 연관관계 분석

#### 4.1 가뭄지수 간 전이특성 분석

이번 장에서는 가뭄지수 간 전이 특성 및 유사성 검토를 수행하였다. SPI(6)과 SPI(12) 간 및 SPI(6)과 SRSI 간의 전이 분석을 수행하였다. 또한, SRSI와 SPI(12)의 가뭄 전이 거동의 유사성도 함께 정리하였다. Table 2는 가뭄전이 분석에 앞서 SRSI의 가뭄 시작, 종료 및 가뭄 지속기간, 규모 및 심도에 대해 정리한 결과이며, 각 특성별 순위를 함께 정리하였다. SRSI 시계열 자료는 Fig. 6(d)와 같으며, 주요 가뭄은 7회 발생하였다.

2022~2023년을 제외한 이전 6번의 과거 가뭄 사상 중에서 3번은 가뭄의 지속기간이 300일 이상 지속되었다. 가뭄 규모와 심도는 300일 미만인 가뭄 사상들보다 큰 것으로 확인되었다. 또한, 2017~2018년 가뭄은 348일 지속되었고, 규모 및 심도가 각각 -596.7, -1.71로 가장 심각한 것으로 확인되었다.

다음 Fig. 7은 가뭄 사상별 SRSI의 가뭄 시작 시기를 기준으로 가뭄 발생 시점 및 추세를 검토하였다.

가뭄은 모두 우기인 6~9월 사이에 발생하여 이듬해 우기 전까지 지속되었으며, 근래에 들어서 가뭄의 시작 시기가 9월에서 7월로 점차적으로 빨라지는 경향이 있다. 가장 심각한 2017~2018년 가뭄의 시작일은 7월 20일부터 시작되어 이듬해 6월까지 약 11개월간 지속된 것으로 확인되었다.

#### 4.1.1 SPI(12) vs SRSI

Fig. 4에서 SPI(12)와 SRSI 유사성을 확인하였으며, 두 가뭄지수 간 가뭄의 발생 및 종료 시점과 가뭄 지속기간 등에 대해 Table 2(4.1 참조)로 정리하였다. Table 2의 Diff\_O는 두 가뭄지수 간 가뭄 시작일의 차이인 가뭄지체로 양의 값은 SPI

(12)가 선행, 음은 후행을 의미한다. Diff\_T는 가뭄 종료일 차이인 연장으로 양의 값은 SPI(12)가 먼저 가뭄이 종결하는 것을 의미하고, Diff\_Dur은 두 가뭄지수 간 지속기간의 차로 양은 SRSI 확대(Magnification), 음은 감쇠를 의미한다.

주요 가뭄 사상은 SRSI 기준으로 2022~2023년을 제외한 6번의 가뭄 사상에서 가뭄 시작일의 평균은 SRSI와 SPI(12) 각각 236.5, 232.3일로 약 4.2일 SRSI가 선행하였고, 종료일 평균은 SRSI와 SPI(12) 각각 172, 183.5일로 SRSI가 약 11.5일 먼저 종결되었다. 가뭄 시작과 종료까지의 지속기간의 평균은 SRSI와 SPI(12) 각각 301.5, 317.3으로 SRSI가 약 15일 적은 것으로 확인되었다.

2017~2018년은 SPI(12)와 SRSI 가뭄 지속기간이 각각 435, 324일로 가장 오래 지속이 되었다. SPI(12)의 가뭄 발생일은 28일 지체하였다. 가뭄의 지속기간이 SRSI가 -111일 감쇠되었으며, SPI(12)는 가뭄이 28일 선행하고, 83일이 연장되었다. 반대로 2005~2006년은 SRSI의 가뭄 지속기간이 54일 더 길었으며, SRSI가 6일 선행하고 48일 연장되었다.

2001~2002년, 2015~2016년에는 SPI(12)의 가뭄 지속기간이 짧은 반면에 건조구간이 가뭄을 대처하는 것으로 확인

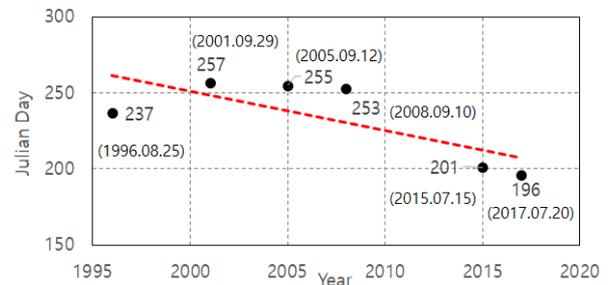


Fig. 7. Linear trend of starting date of SRSI Drought

Table 2. Summary of drought characteristic based SRSI and SPI(12)

Year	Julian Date of SRSI Drought Events		Duration (day) ③	Magnitude	Severity	Julian Date of SPI(12) Drought Events		Duration (day) ⑥	Diff_O ① - ④	Diff_T ② - ⑤	Diff_Dur (day) ③ - ⑥
	Onset ①	Termination ②				Onset ④	Termination ⑤				
1996~1997	1996.237	1997.146	275 (5)	-357.6 (5)	-1.3 (6)	1996.237	1997.176	305 (2)	0	-30	-30
2001~2002	2001.272	2002.227	321 (2)	-538.3 (3)	-1.68 (3)	Dry Condition		-	-	-	-
2005~2006	2005.255	2006.173	288 (4)	-405.6 (4)	-1.41 (4)	2005.261	2006.125	230 (4)	-6	48	58
2008~2009	2008.253	2009.210	318 (3)	-542.5 (2)	-1.71 (2)	2008.258	2009.191	299 (3)	-5	19	19
2015~2016	2015.201	2016.058	223 (6)	-317.2 (6)	-1.39 (5)	Dry Condition		-	-	-	-
2017~2018	2017.196	2018.159	353 (1)	-596.7 (1)	-1.71 (1)	2017.173	2018.242	435 (1)	23	-83	-82
Ave.	232.3	183.5	308.5	-475.6	-1.53	236.5	172.0	317.3	4.0	-11.8	-8.8

( ) : Rank of Risk, Diff\_O (Lag) = Drought Onset of SRSI - SPI(12), Diff\_T (Lengthening) = Drought Termination of SRSI - SPI(12)  
 Diff\_Dur (Attenuation) = Drought Duration of SRSI - SPI(12), Ave. = Average of Factors (1996~1997, 2005~2006, 2008~2009, 2017~2018)

되었다(Fig. 6). 다만, 2001~2002, 2015~2016년 각각 건조구간이 9월, 7월로 우기의 강수 부족이 수문학적 가뭄으로 전이되는 양상을 보였다.

따라서 가뭄과 건조를 모두 고려하는 경우에는 2017~2018년을 제외하면 유사한 거동을 보이는 것으로 판단하였다.

4.1.2 SPI(6) vs SPI(12)

SPI(12)는 SPI(6)과 동일한 기상학적 가뭄지수이지만, 상대적으로 장기적인 가뭄이다. 따라서 SPI(6)이 SPI(12)에 선행할 것으로 판단하였으며, 이에 따른 두 지수 간의 가뭄 전이 분석을 수행하였다. 전이 분석에는 두 지수 간 가뭄의 시작 및 종료일, 가뭄 지속기간, 규모 심도를 각각 산정하였다. 가뭄 사상의 선정기준은 SPI(12)를 기준으로 선정하였고, 전이 분석 결과는 Table 3으로 정리하였다. Diff.는 두 가뭄지수 간 가뭄 시작일 차이인 지체를 산정한 결과이며, 양의 값은 SPI(6)이 선행, 음은 후행을 의미한다.

SPI(12) 기준 6회의 주요 가뭄 발생 사상 중에서 5번은 SPI(12) 가뭄 지속기간이 2년 연속되었고, 1994~1996년은 3년간 지속했다. 반면에 SPI(6)은 1992, 1994년의 가뭄 시작과 종료해가 같고, 그 외는 2년간 지속했으며, 상대적으로 SPI(12)에 비해 가뭄 지속기간이 짧게 나타났다.

가뭄 사상별 지속기간, 규모 및 심도에 대한 각각의 순위를 매긴 결과 SPI(12) 기준 1994~1996년 가뭄이 지속기간 및 규모에서 가장 높았고, 심도는 2008~2009년이 -1.67로 확인되었다. 종합적으로는 SPI(6), SPI(12) 모두 2017~2018년이 가장 심각한 가뭄으로 확인되었다.

가뭄 발생만을 고려하여 가뭄 시작일 차이를 비교하는 경우에는 SPI(6)이 4번(평균 39.3일) 선행하였다. 다만, SPI(12)가 선행적 가뭄 발생을 보인 2005~2006년은 SPI(12)가 짧은 건조 기간 후에 8월말부터 급격한 가뭄으로 이어지는 반면에 SPI(6)은 우기 시작부터 건조구간의 점진적으로 확대되어 가

뭄으로 발전하였다. SPI(12)가 선행하는 경우는 1996~1997년 SPI(12)의 가뭄 심도가 건조구간 범위인 -0.86을 기록하는 등 위험 순위가 5위였고, 다른 경우도 6위를 기록함에 따라 SPI(6)이 선행할수록 가뭄 위험이 커지는 것으로 판단하였다.

4.1.3 SPI(6) vs SRSI

SRSI와 SPI(12)의 가뭄 시작일 차이는 평균 4.2일이고, 종료 시점 차이는 11.5일로 장기적인 가뭄 발생을 고려할 때 큰 차이를 보이지는 않았다. 따라서 기상학적 가뭄인 SPI(6)이 수문학적 가뭄인 SRSI보다 선행적인 가뭄 발생을 가정하여 두 지수 간 전이 분석을 수행하였다. 전이 분석에는 SPI(6)의 가뭄 발생 시점 및 건조구간 시작일을 구분하였다.

Table 4(a)는 SPI(6)의 가뭄 발생과 SRSI 간 가뭄 지체를 산정한 결과이다. 주요 가뭄 사상은 SRSI와 SPI(6) 모두 동일하게 6회 발생하였지만, SRSI와 SPI(6)이 일치되는 경우는 총 4회(1996~1997, 2005~2006, 2008~2009, 2017~2018년)였고, 나머지에서 불일치한 것을 확인하였다.

불일치한 경우를 보면, 완공 초기인 1991~1995년까지는 기상학적 가뭄에서만 2회 발생하였고, 수문학적 가뭄은 발생하지 않았다. 이는 주암댐 완공 초기 담수를 진행하는 댐 운영상의 이유로 추정된다. 다음은 2001~2002년, 2015~2016년에 해당하며, SPI(6)의 건조구간이 SRSI 가뭄 구간을 대치하는 경우이다. SRSI가 초기부터 가뭄이 지속된 반면에 SPI(6)은 건조구간이 지속되고, 단속적인 가뭄 발생을 보였으며, SPI(12)와 SPI(6) 간에도 유사한 패턴이 확인되었다.

따라서 SPI(6)의 건조구간을 고려하여 재산정하였으며, 결과는 Fig. 8과 같다. 또한, SPI(6)의 건조구간을 포함하여 SRSI의 가뭄시작 시점과 지체를 산정한 결과는 Table 4(b)로 나타내었다.

SPI(6)의 건조구간을 고려하여 재분석한 결과, 6번의 가뭄 사상 중에 SPI(6)의 가뭄사상이 발생하지 않은 2015~2016년

Table 3. Summary of Drought Characteristic based Meteorological Indices (SPI(6) & (12))

Date of SPI(6) Drought Events		①	②	③	Date of SPI(12) Drought Events		①	②	③	Diff.	Rank of Ave. (① ~ ③)	
Onset	Termination	Duration (day)	Magnitude	Severity	Onset	Termination	Duration (day)	Magnitude	Severity		SPI(6)	SPI(12)
1992.06.25	1992.12.19	178 (4)	-242.4 (5)	-1.36 (4)	1992.07.31	1993.07.25	360 (3)	-467.5 (4)	-1.30 (3)	<b>36</b>	<b>4</b>	<b>4</b>
1994.05.05	1994.11.16	196 (3)	-293.8 (4)	-1.50 (3)	1994.07.12	1996.06.23	712 (1)	-760.8 (1)	-1.07 (4)	<b>68</b>	<b>3</b>	<b>1</b>
1996.09.17	1997.02.07	144 (6)	-140.2 (3)	-0.97 (6)	1996.08.25	1997.06.25	305 (4)	-263.3 (5)	-0.86 (6)	<b>-23</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
2005.10.16	2006.04.03	170 (5)	-220.2 (6)	-1.30 (5)	2005.09.18	2006.05.05	230 (6)	-245.2 (6)	-1.07 (4)	<b>-28</b>	<b>6</b>	<b>6</b>
2008.08.28	2009.05.15	261 (2)	-427.0 (2)	-1.64 (1)	2008.09.15	2009.07.10	299 (5)	-500.3 (3)	-1.67 (1)	<b>18</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
2017.05.18	2018.02.25	284 (1)	-443.5 (1)	-1.56 (2)	2017.06.22	2018.08.30	435 (2)	-636.7 (2)	-1.46 (2)	<b>35</b>	<b>1</b>	<b>1</b>

\* ( ) : Rank of Risk, \*\* Diff. = Start time of SPI(12) - Start time of SPI(6) (Days according to the Timing of Drought Occurrence for SPI(6) and SPI(12))

에서만 SRSI가 20일 선행하는 것을 확인하였고, 그 외 가뭄 사상에서는 SPI(6)의 선행적인 발생을 확인하였다.

SPI(6)의 가뭄 시작을 기준으로는 가뭄 시작시기가 평균적

으로 9월(257.4일)에 시작하였고, SRSI에 비해 -20.8일로 후행하였다. 반면에 건조 구간이 포함되는 경우는 시작시기가 7월(189.8일)로 약 두 달 빠른 발생을 보였다. 또한, SRSI보다

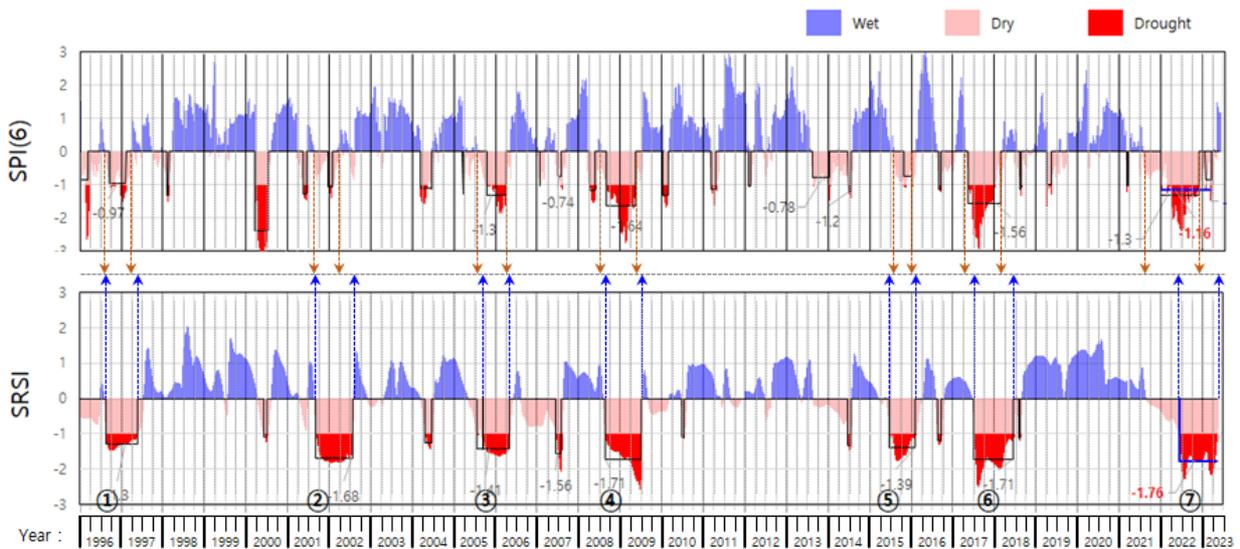
**Table 4.** Comparison of Starting Date of Drought and Dry Events using SPI(6) and SRSI

No.	Drought Year	Onset of Drought					** Reason
		SPI(6)		SRSI		Lag (SRSI - SPI(6))	
		Julian Day	Date	Julian Day	Date	Drought (day)	
①	1996~1997	270	09.27	237	08.25	-33	Initial Period after Dam Completion
②	2001~2002	350	11.16	257	09.14	-93	Considering Dry Condition
③	2005~2006	289	10.16	255	09.12	-34	Considering Dry Condition
④	2008~2009	240	08.28	243	08.30	3	Considering Dry Condition
⑤	2015~2016	-	-	181	06.30	-	No Drought of SPI(6)
⑥	2017~2018	138	05.18	191	07.10	53	-

(a) Drought Onset of SPI(6) and Drought Onset of SRSI

No.	Drought Year	Onset Drought (or Dry)							** Reason
		SPI(6)			SRSI		Lag (SRSI - SPI(6))		
		Dry ①	Drought ②	Dry Duration (② - ①)	Julian Day	Date	Dry Drought	Drought	
		Julian Day					(day)		
①	1996~1997	212	270	58	237	08.25	25	-33	Replace Drought with Dry
②	2001~2002	228	350	122	257	09.14	27	-93	Replace Drought with Dry
③	2005~2006	196	289	93	255	09.12	59	-34	Replace Drought with Dry
④	2008~2009	189	240	51	243	08.30	54	3	Replace Drought with Dry
⑤	2015~2016	209	-	-	181	06.30	-20	-	Application of Dry Onset
⑥	2017~2018	105	138	33	191	07.10	86	53	Replace Drought with Dry
Ave.		189.8	257.4		227.3	-	38.5	-20.8	

(b) Dry Onset of SPI(6) and Drought Onset of SRSI



**Fig. 8.** Time series and drought events of Suncheon SPI(6) and Juam-Dam's SRSI (1996~2023)

38.5일 선행하였다. 가장 심각한 가뭄으로 평가된 2017~2018년은 SPI(6)의 건조구간에서 가뭄 발생 시기까지 86일 차이로 가장 긴 건조구간임을 확인하였다.

#### 4.2 장기적인 수문학적 가뭄의 전조적인 특성 분석 및 2022~2023년 가뭄 평가

전남지역의 과거 가뭄 분석을 통해 기상학적 가뭄의 선제적인 발생 양상에 따라서 상당한 규모의 수문학적 가뭄으로 발전할 수 있는 전조적인 특징을 검토하였고, 다음과 같이 정리하였다.

우선, 가뭄 발생이 SPI(6), SPI(12) 및 SRSI 순으로 시간에 따라 순차적으로 발생하며, 동시에 선행되는 가뭄이 후행하는 가뭄과 중첩하여 가뭄 상태가 지속되는 특징을 보였다. 2017~2018년에 발생한 가뭄이 대표적이다. 다음은 기상 및 수문학적 가뭄 발생일 전까지 장기적 건조구간의 발생이며, SPI(6)과 수문학적 가뭄 간 연관 관계 분석을 통해 SPI(6)이 확연한 가뭄 구간 없이 장기적 건조상태에서도 수문학적 가뭄의 발생을 확인하였다. 또한, 장기 가뭄 발생의 시작 시점이 우기인 6~9월 사이에 발생한다는 것이다. 6개월 이상 지속된 수문학적 가뭄 발생은 모두 우기인 6~8월 사이에 발생하였고, 특히 연중 최대 강수량 발생월인 7월에 기상학적 가뭄이 시작되는 경우는 보다 장기적인 수문학적 가뭄으로 이어졌다. 2017-18년 가뭄은 7월에 발생해서 가뭄이 가장 긴 348일간 지속이 되었다.

마지막으로는 수문학적 가뭄의 발생패턴 변화이다. 기상학적 가뭄이 지속적인 습윤 상태를 보임에도 불구하고, 수문학적 가뭄은 음의 추세로 일정하게 감소되는 경향을 확인하였다. 2015~2016년에 발생한 가뭄이 이에 해당하며, 2014년부터 기상학적 가뭄은 높은 습윤 상태를 보이는 동시에 SRSI는 습윤 상태에서 가뭄의 발생까지 일정한 감소 추세를 나타내고 있다. 유사 상황이 2000, 2004, 2012년에도 발생하였지만, 2015년에서만 장기 수문학적 가뭄으로 이어진 것을 확인하였다.

이러한 경우는 우기의 집중적인 강수로 인한 홍수 발생위험을 고려하는 경우 저수지 운영을 예년보다 낮게 운영하여

홍수에 더욱 탄력적으로 대비하는 경우에 나타날 수 있는 현상으로 파악될 수 있다. 다만, 기후변화로 인한 “마른 장마” 등을 고려할 때 우기의 시작 시점인 6~7월의 강수 부족은 다음 우기가 오기 전까지 적어도 1년의 장기적인 가뭄 피해가 지속될 수 있으므로 홍수와 가뭄을 동시에 고려한 저수지의 운영 방안이 필요한 시점이다.

최근 발생한 전남 순천의 2022~2023년 가뭄도 상당한 규모의 장기적 가뭄으로 확인되었다. Table 5는 2022~2023년 가뭄 전이 특성을 정리한 결과로 앞서 가장 심각한 수문학적 가뭄을 보인 2017~2018년과 비교하는 경우 가뭄 지속기간은 두 번째로 긴 334일 지속되는 것을 확인하였다. 또한, 가뭄 심도는 -1.76으로 가장 심각한 상태를 보였다. 2022~2023년 가뭄 발생에 대한 전조적인 특징은 다음과 같다.

첫째로 2022~2023년 가뭄은 SPI(6), SPI(12), SRSI의 순차적인 가뭄 발생을 보였으며, 세가지 가뭄지수가 중첩되어 발생하였다. SPI(6)이 SPI(12)와 SRSI에 각각 235일, 155일 중첩되었고, SPI(12)는 SRSI와 307일 중첩되었다. 둘째로 기상 및 수문학적 가뭄 발생일 전까지 장기적인 건조구간이 발생을 보였다. SPI(6)은 2015년 7월부터 약 5개월, SPI(12)는 약 7개월간 건조구간이 지속되었고, SRSI는 약 9개월간 지속되었으며, 이러한 상황은 가뭄 발생 이전에 가용수자원 부족 상태로 평가될 수 있다. 셋째로 7월에 수문학적 가뭄의 발생이다. 가뭄이 7월 7일부터 이듬해 5월 30일까지 지속이 되었다. 마지막으로 SPI(12)는 습윤 상태인 반면에 SRSI는 상대적으로 약한 습윤 상태에서 일정한 추세로 감소되는 경향을 보였다. SRSI는 2020년 12월부터 건조구간의 시작 전까지 감소 추세를 보였으며, 가뭄 발생 전까지 이어졌다.

2022~2023년 가뭄에 대한 전조적 특징을 살펴본 결과 심각한 수문학적 가뭄 발생 요건을 모두 갖고 있는 것을 확인하였다.

다음으로는 선행적인 SPI(6) 가뭄에 따른 SRSI 가뭄 규모를 추정하였다. 적용 방법은 회귀분석을 이용하여 추정하였다. 입력자료는 2022~2023년을 포함한 가뭄 사상별 SPI(6)과 SRSI의 가뭄 규모를 대상으로 하였다. 회귀식 산정 결과는 Fig. 9와 같으며, 결정계수는 0.95로 높게 나타났다.

**Table 5.** Summary of severest meteorologic & hydrologic drought characteristic at Suncheon (2017 and 2022 drought events)

Drought 2022~2023	Date (yy.mm.dd)		Duration (day)	Magnitude	Severity
	Onset	Termination			
SPI(6)	2022.02.25	2023.12.03	281	-516.0	-1.16
SPI(12)	2022.04.12	2023.05.04	387	-553.9	-1.43
SRSI	2022.07.01	2023.05.30	334	-577.8	-1.76

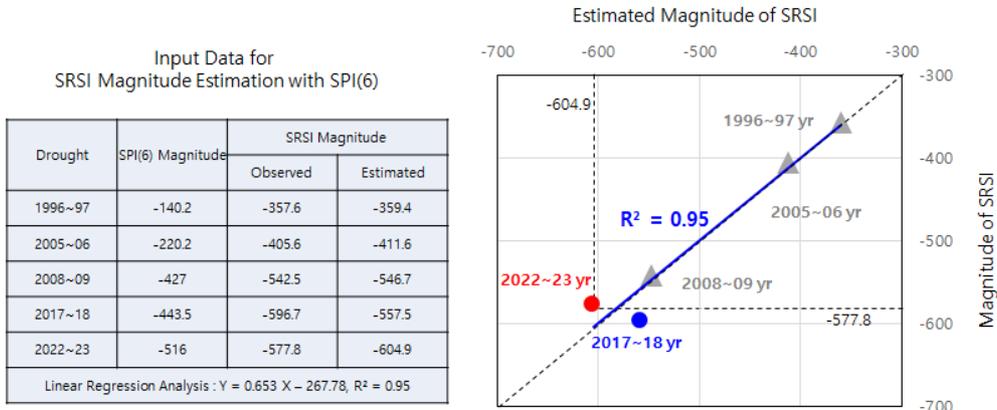


Fig. 9. Estimation of SRSI Magnitude according to SPI(6) Magnitude using simple linear regression model

또한, SRSI의 관측치와 회귀식을 통해 추정된 결과를 도시하여 나타내었다. 추정 결과 2017~2018년과 2022~2023년의 관측치 및 추정치 모두에서 가뭄 위험이 높은 것을 확인할 수 있다. 앞서 발생한 세 번의 가뭄 사상에서는 Fig. 9와 같이 결정계수가 1에 가까운 결과를 보인 반면에 2017-18년은 예측보다 관측이 40 정도 더 위험이 확대되었고, 2022-23년은 예측보다 50 정도 감소되어 실제적인 가뭄 위험이 감소되는 결과로 나타났다.

따라서 최근에 발생했던 두 번의 가뭄에서는 기후변화 등에 따른 가뭄 위험의 변동으로 이해할 수도 있지만, 2022~2023년 가뭄은 정부 및 지자체의 가뭄 대응 노력이 지속됨에 따라 가뭄 대응을 위한 사회적 노력에 의한 수문학적 가뭄 위험이 상대적으로 감소된 것으로 이해할 수도 있다. 다만, 단순 회귀분석을 위한 입력 자료가 충분하지 않음에 따라 장래 객관성 확보를 위한 지속적인 자료의 확보와 보완이 필요하다.

### 4.3 수문학적 가뭄 전망과 조기대응을 위한 기상학적 가뭄지수의 활용방안

수문학적 가뭄지수와 기상학적 가뭄의 연관관계 검토를 위해 가뭄전이 분석을 수행하였으며, 이에 따라 다음과 같이 세 가지 측면에서 수문학적 가뭄지수의 선제적 감시 및 전망을 위한 기상학적 가뭄지수의 적용방안을 제시하였다.

첫 번째는 SPI(6)이 수문학적 가뭄에 얼마나 선행적인 관계를 갖는가이다. 일반적으로 기상학적 가뭄이 수문학적 가뭄에 선행하지만, SPI(6)의 건조 구간이 지속되는 경우에는 SPI(6)이 SRSI에 후행될 수 있는 것을 확인하였으며, 건조 구간을 포함하여 평가할 경우에는 평균적으로 SPI(6)이 약 39일 선행하였다. 따라서 SPI(6)이 수문학적 가뭄에 선행되는 정도를 판단하는 경우에는 가뭄의 진행상황에 따른 가뭄 시작일

또는 건조일 기준이 제시되어야 한다.

두 번째는 건기, 우기 등 계절적 구분을 통해 댐 운영 등에 가뭄지수를 활용 필요성이 있다. 최근 두 번의 수문학적 가뭄이 시기적으로 이른 7월에 발생하여 심각한 가뭄으로 이어졌다. 가뭄 시작 시기가 빨라지는 것은 가뭄과 홍수의 위험이 동시에 커지는 것을 의미한다. 즉, 홍수 방어를 목적으로 우기 시작에 맞춰 댐의 저수공간을 마련할 수 있다. 다만, 기후변화의 심각성을 고려한다면 어느 정도 저수용량을 남기는가는 또 다른 해결 과제이다. 따라서 저수용량이 충분히 남는 경우 홍수 방어에는 적정하지만, 평년대비 부족한 강수량이 발생한다면 심각한 가뭄으로 이어질 수 있다.

따라서 댐의 저수공간을 확보 시 다양한 상황이 검토 될 수 있으며, 그 중 하나로 가뭄지수가 사용될 수 있다. 예로 SPI(6)은 단기적인 강수의 흐름, SPI(12)는 장기적인 강수 흐름을 파악할 수 있고, SRSI는 SPI 지수와의 관계 분석을 통해 저수공간의 적정한 운영에 활용될 수 있다.

세 번째로 SPI(12)의 가뭄 발생 시점과 지속기간이 수문학적 가뭄지수인 SRSI와의 유사성에 대한 검토이다. SPI(12)와 SRSI의 가뭄 발생일은 평균 232.3, 236.5일로 SRSI가 4.2일 더 선행을 보였고, 지속시간은 각각 317.3, 3015일로 SPI(12)가 약 15일 더 지속되는 것으로 나타났다. 가뭄 지체가 28일로 가장 크게 지속되는 2017~2018년을 제외하면 시작일 차이는 6일 이내로 크지 않았다. 지역에 따라서는 제1수원이 댐이 아닌 하천 유량, 지하수 등으로 판단되는 경우가 있다. 다만, 이러한 경우에는 짧은 자료기간 또는 데이터 확보 문제 등이 고려되어야 한다. 따라서 SPI(12)로 수문학적 가뭄지수의 부족한 점을 보완, 검토에 활용할 수 있으며, 불가피한 경우에는 SPI(12)로 수문학적 가뭄을 대신 평가하는데 활용될 수도 있는 것으로 판단되었다.

## 5. 결론

본 연구는 가뭄 전이의 인과관계 분석을 위해서 기상학적 가뭄과 수문학적 가뭄의 두 가지 서로 다른 가뭄지수를 적용하여 전라남도지역에서 발생했던 과거 가뭄을 기준으로 다양한 발생기작과 두 가지 가뭄 간 특성을 분석하였으며, 이에 따른 결론은 다음과 같이 정리하였다.

첫째로 수문학적 가뭄의 발생 추이를 살펴본 결과 6개월 이상의 장기적인 수문학적 가뭄 발생 시점이 우기인 6~9월에 시작되어 이듬해 5~8월까지 약 1년간 지속되는 것을 확인하였다. 이는 홍수의 위험이 높은 6~9월에 장기적인 가뭄 발생 위험도 커지고 있음을 의미한다. 또한, 가뭄 시작 시기가 기준에는 8, 9월에서 근래에는 6, 7월로 빨라지고 있다. 국내의 경우 7월 강수량이 최대로 발생하는 시기로 기후변화에 따른 강수량 부족이 발생한다면 비워진 저수지를 다시 채우기가 어려워 심각한 가뭄으로 이어질 수 있는 것으로 판단되었다.

둘째로 수문순환에 따른 분야별 서로 다른 두 지수간 전이 분석을 수행하였으며, 그 결과 SPI(6)이 가뭄이 아닌 건조상태가 지속되는 경우에도 수문학적 가뭄 위험이 높아질 수 있음을 확인하였다. 특히, 건조 구간이 우기까지 지속되는 경우에도 수문학적 가뭄 위험이 높은 것을 확인하였다. 건조구간이 가뭄으로 구분되지 않는 것은 명확하다. 다만, 건조는 물이 부족한 상태를 의미하며, 장기적인 건조 상태에서 가뭄으로 발전한다면 유역은 그만큼 물이 부족한 상태이므로 가뭄 대응에 어려움이 예견될 수가 있다. 또한, 모든 가뭄지수는 임계점을 고려한 가뭄 판단이 이루어지고 있지만, 이러한 판단은 개선되어야 한다. 예로 여름철 SPI가 건조구간인 경우에도 장기적인 수문학적 가뭄으로 이어지는 것을 확인하였다. 따라서 추후에는 시기적인 상황을 고려한 가변적이고 합리적인 가뭄지수의 임계점 선정기준 마련의 필요성을 판단하였다.

한편으로는 자연적 물순환 상태가 아닌 인공적 물순환 상황에서의 가뭄 발생 메커니즘은 별도로 검토되어야 한다. 즉, 수문학적 가뭄 발생은 장기간 지속되는 기상학적 가뭄으로 나타날 수 있지만, 기상학적 가뭄의 전조현상 없이도 여름철 홍수에 대응하기 위한 저수지 운영상황에 따라 수문학적 가뭄이 발생할 수 있음을 확인하였다.

마지막으로 SPI(12)와 수문학적 가뭄(SRSI)의 발생 시점은 평균적으로 SPI(12)가 약 2일 선행되어 나타났고, 가뭄 지속기간도 SPI(12)가 평균 약 3일 더 지속되는 결과를 보임에 따라 SPI(12)를 수문학적 가뭄판단을 위한 보조지표로서 활용할 수 있음을 확인하였다.

본 연구를 통하여 장기적인 가뭄(건조) 상태가 지속될수록

수문학적 가뭄 발생위험이 높다는 것을 확인하였으며, 동시에 기후변화 시대가 지속되면서 장기적인 수문학적 가뭄 발생 조건에 맞춰 가뭄 발생 환경이 변화하고 있음을 확인하였다. 따라서 가뭄 환경 특성 변화의 관찰을 통해 장래에는 보다 실질적이고 효율적인 가뭄 대응 방안의 마련 및 대처가 이루어져야 할 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 행정안전부 재난안전 공동연구 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2022-MOIS63-001(RS-2022-ND641011)).

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

## References

- Gusyev, M.A., Hasegawa, A., Magome, J., Kuribayashi, D., Sawano, H., and Lee, S. (2015). "Drought assessment in the Pampanga River Basin, the Philippines. part 1: A role of dam infrastructure in historical droughts." *Proceedings of the 21st International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM 2015)*, Broadbeach, Queensland, Australia. doi: 10.13140/RG.2.1.4931.4321
- Kwak, J.W., Kim, D.G., Lee, J.S., and Kim, H.S. (2012). "Hydrological drought analysis using copula theory." *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 32, No. 3B, pp. 161-168.
- Lee, J.H., Park, S.Y., Kim, M.G., and Chung, I.M. (2021). "Hydrological drought analysis and monitoring using multiple drought indices: The case of Mulrocheon watershed." *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 41, No. 6, pp. 477-484.
- Lee, K.D., Son, K.H., and Lee, B.J. (2020). "A study on determining threshold level of precipitation for drought management in the dam basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 53, No. 4, pp. 293-301.
- Maliva, R., and Missimer, T. (2012). *Arid lands water evaluation and management*. Environmental Science and Engineering, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 21-39.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration of time scales." *8th Con-*

- ference on Applied Climatology*, Anaheim, CA, U.S., pp. 179-183.
- Nalbantis, I. (2008). "Evaluation of a hydrological drought index." *European Water*, Vol. 23, No. 24, pp. 67-77.
- Peters, E. (2003). *Propagation of drought through groundwater systems: Illustrated in the Pang (UK) and Upper-Guadiana (ES) catchments*. Ph.D. Dissertation, Wageningen University, the Netherlands.
- Savenije, H.H.G., Hoekstra, A.Y., and Van der Zaag, P. (2014). "Evolving water science in the Anthropocene." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 18, No. 1, pp. 319-332.
- Shin, J.Y., Kwon, H.H., Lee, J.H., and Kim, T.W. (2020). "Probabilistic long-term hydrological drought forecast using Bayesian networks and drought propagation." *Meteorological Applications*, Vol. 27, No. 1, e1827.
- Sur, C.Y., Park, S.Y., Kim, T.W., and Lee, J.H. (2019). "Remote sensing-based agricultural drought monitoring using hydro-meteorological variables." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 23, No. 12, pp. 5244-5256.
- Van Loon, A.F. (2015). "Hydrological drought explained. wiley interdisciplinary reviews:." *Water*, Vol. 2, No. 4, pp. 359-392.
- Wang, J., Wang, W., Cheng, H., Wang, H., and Zhu, Y. (2021). "Propagation from meteorological to hydrological drought and its influencing factors in the Huaihe River Basin." *Water*, Vol. 13, No. 14, 1985. doi: 10.3390/w13141985
- Wang, W., Ertsen, M.-W., Svoboda, M.-D., and Hafeez, M. (2016). "Propagation of drought: From meteorological drought to agricultural and hydrological drought." *Advances in Meteorology*, Vol. 2016, 6547209. doi: 10.1155/2016/6547209
- Won, K.J., and Chung, E.S. (2016). "Drought analysis of Cheongmicheon watershed using meteorological, agricultural and hydrological drought indices." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 49, No. 6, pp. 509-518.
- Yevjevich, V. (1967). *An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts*. Hydrology Paper, No. 23, Colorado State University, Fort Collins, CO, U.S., pp. 4-18.
- Yoo, J.Y., Yu, J.S., Kwon, H.H., and Kim, T.W. (2016). "Determination of drought events considering the possibility of relieving drought and estimation of design drought severity" *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 4, pp. 275-282.
- Yu, M., Cho, Y., Kim, T.W., and Chae, H.S. (2018). "Analysis of drought propagation using hydrometeorological data: From meteorological drought to agricultural drought." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 3, pp. 195-205.