



Characteristics of drought-flood abrupt alternation events using SWAP index in the Han River basin

Son, Ho Jun^a · Lee, Jin-Young^b · Yoo, Jiyoung^c · Kim, Tae-Woong^{d*}

^aMaster's Student, Department of Smart City Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

^bAssociate Researcher, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Sejong, Korea

^cResearch Professor, Research Institute of Engineering and Technology, Hanyang University, Ansan, Korea

^dProfessor, Department of Civil and Environmental Engineering/Smart City Engineering, Hanyang University, Ansan, Korea

Paper number: 21-062

Received: 23 July 2021; Revised: 2 October 2021; Accepted: 2 October 2021

Abstract

A drought-flood abrupt alternation event is an overlapping extreme event that is harder to cope with than a single event of drought and flood. It is also expected to have a significant adverse impact on ecosystems as well as industries and agriculture. However, there has not yet been a comprehensive study that characterizes the drought-flood abrupt alternation events in Korea. Therefore, this study employed a standard weighted average precipitation (SWAP) index, which is efficient to analyze not only individual events of drought and flood but also the drought-flood abrupt alternation events considering various time scales. The SWAP standardized the weighted average precipitation (WAP) by adding temporal weights to the precipitation. The SWAP indices were calculated for middle-sized watersheds of the Han River basin using the area average precipitation during 1966 and 2018. The severity K was calculated to represent the relative regional severity considering normal rainfalls, and used to characterize the drought-flood abrupt alternation in the study areas. The results indicated that 20 of the 30 middle-sized watersheds in the Han River basin were confirmed to increase the severity of drought-flood abrupt alternation over time. Considering the frequency and severity of drought-flood abrupt alternation events in each watershed, vulnerable areas and dangerous areas due to drought-flood abrupt alternation were identified, for example, the Upstream Namhan River (#1001).

Keywords: Drought-flood abrupt alternation events, Precipitation, Severity, Standard weighted average precipitation index

SWAP 지수를 활용한 한강유역의 가뭄-홍수 급변사상 특성 분석

손호준^a · 이진영^b · 유지영^c · 김태웅^{d*}

^a한양대학교 대학원 스마트시티공학과 석사과정, ^b한국농어촌공사 농어촌연구원 주임전임연구원,

^c한양대학교(ERICA) 공학기술연구소 연구교수, ^d한양대학교(ERICA) 건설환경공학과/스마트시티공학과 교수

요지

가뭄-홍수 급변사상은 가뭄과 홍수가 중첩된 사상으로, 생태계뿐만 아니라 산업과 농업 그리고 사회경제까지 큰 영향을 미치기 때문에 가뭄이나 홍수의 개별 사상보다 대처하기 어렵다. 하지만 국내의 가뭄-홍수 급변사상에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 표준가중평균강수(SWAP) 지수를 사용하여 가뭄-홍수 급변사상의 특성들을 분석하였다. SWAP 지수는 일강수량에 시간 가중치를 적용한 가중평균강수(WAP) 지수를 표준화 것으로, 한강유역의 중권역별 면적평균강수량(1966-2018년)을 사용해 산정하였다. SWAP 지수는 가뭄-홍수의 단일사상 분석 뿐 아니라 가뭄-홍수 급변사상을 분석하는데 용이하고, 시간의 척도 측면에서도 유연하게 사용할 수 있다. 또한, 심각도 K를 사용해 가뭄-홍수 급변사상의 상대적인 심각도를 지역별로 분석할 수 있다. 연구 결과, 한강유역 30개의 중권역 중 20개의 중권역이 시간이 지남에 따라 가뭄-홍수 급변사상의 심각도가 상승하는 추세가 확인되었고, 중권역별 가뭄-홍수 급변사상의 발생 빈도와 심각도 등을 고려하여 위험지역을 확인할 수 있었다. 예를 들어, 한강유역 내 가뭄-홍수 급변사상으로 인한 위험지역은 남한강상류(#1001) 유역으로 나타났다.

핵심용어: 가뭄-홍수 급변사상, 강수량, 심각도, 표준가중평균강수

*Corresponding Author. Tel: +82-31-400-5184

E-mail: twkim72@hanyang.ac.kr (T.-W. Kim)

1. 서론

최근 전 세계적인 기후변화로 인하여 극심한 가뭄과 홍수, 태풍 등의 자연재해의 빈도가 증가하는 추세이다. 특히, 강수량의 변동성 증가로 인해 가뭄과 홍수가 번갈아가며 발생하는 사례가 많아지고 있다. 이렇게 가뭄과 홍수가 단기간에 교대로 발생하는 현상을 가뭄-홍수 급변사상이라 정의하며(Xiong *et al.*, 2018), 여름철 가뭄과 홍수의 새로운 이상 현상으로 대두되고 있다. 이러한 가뭄-홍수 급변사상은 가뭄과 홍수의 영향이 중첩되어 가뭄과 홍수 각각의 개별 사상보다 대처하기 어려우며 생태계 및 산업과 농업에 막대한 피해를 주고 있다. 실제로 2011년 중국에서 가뭄-홍수 급변사상으로 인해 약 90,400 km²의 농작물 피해가 발생하여 58억 위안(한화 약 1조 600억) 가량의 피해가 발생했다(Xiong *et al.*, 2018). 강우량의 변동성이 큰 우리나라도 가뭄-홍수 급변사상이 발생할 가능성이 크며, 이에 대한 연구가 매우 시급하다.

비정상적인 가뭄과 홍수로 인한 심각성을 고려하여 외국에서는 여러 가지 기후 데이터를 바탕으로 가뭄과 홍수의 연관성을 연구하고 있다(Dai *et al.*, 1998; Wu *et al.*, 2006; Shan *et al.*, 2018). Dai *et al.* (1998)은 파머 가뭄지수(Palmer Drought Severity Index, PDSI)를 이용한 분석을 바탕으로, 미국, 유럽, 아프리카에서 1970년대 이후로 건조 및 습윤지역이 명확히 증가한다는 것을 보여주었다. Wu *et al.* (2006)은 정상적인 계절 평균 강수량 내에서도 가뭄과 홍수가 공존할 수 있으며, 이를 가뭄-홍수 공존지수(Droughts-Floods Coexistence Index, DFCI)를 이용하여 예측하였다. 또한, Shan *et al.* (2018)은 건조에서 습윤 혹은 습윤에서 건조로 급변하는 사상의 시·공간적 분포 특성을 포괄적으로 분석하기 위해 건조-습윤 교차 지수(Dry-Wet Abrupt Alternation Index, DWAAI)를 개발하였다.

Lu (2009)에 의해 제안된 가중평균강수(Weighted Average Precipitation, WAP) 지수는 일별, 월별 등 다양한 시간 척도에 적용하는 것이 가능하다. 또한 Lu *et al.* (2014)은 표준가중평균강수(Standard Weighted Average Precipitation, SWAP) 지수를 개발하여 일일 가뭄 상황을 모니터링하였으며, 가뭄의 시작-종료 시점, 지속기간 및 강도 등을 파악해 가뭄 상황을 분석하였다. Zhao *et al.* (2020)은 중국 한장강 유역에서의 기후변화로 인한 가뭄, 홍수 및 가뭄-홍수 급변사상에 대한 특성을 분석하기 위하여 SWAP 지수를 사용하였으며, 일, 주, 월 단위로 가뭄-홍수 급변사상의 빈도 및 심각도의 시·공간적 분포에 대해 분석했다. 그 결과, 기후변화로 인해 가뭄이 증가할 것이고, 21세기에는 한장강 유역의 가뭄-홍수 급변사상의 빈도 및 강도가 크게 높아져, 향후 수자원 안보에 큰 위협이 될

것으로 보인다고 판단했다.

이와 같이 선행연구를 통해 가뭄-홍수 급변사상에 대한 특성 분석 연구는 수자원 관리나 재난관리 측면에서 시급하다. 따라서 본 연구는 SWAP 지수를 사용하여 우리나라 한강유역 가뭄-홍수 급변사상의 발생 빈도 및 심각도의 시·공간적 분포에 대해 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 연구대상 및 자료

본 연구는 국가수자원관리종합정보시스템에서 제공하는 한강 유역 30개 중권역의 면적평균강수량(1966 - 2018년)을 사용하여 WAP 지수와 SWAP 지수를 산정하였다.

WAP 지수는 특정한 날의 가뭄과 홍수 상태가 이전부터 당일까지의 강수량에 영향을 받았다고 가정하고, 현재의 기상학적 홍수·가뭄 상태를 파악하기 위해 제안된 방법이다(Lu, 2009). WAP의 계산 방법은 Eq. (1)과 같다.

$$WAP(t) = \sum_{n=0}^N w_n P(t-n) \tag{1a}$$

$$w_n = (1-\alpha)\alpha^n \tag{1b}$$

여기서, P 는 강수량이고, w_n 은 P 에 대한 가중치를 나타낸다. α 는 시간 경과에 따른 가중치에 대한 매개변수이고, N 은 이전 기간의 영향을 받은 일수이다. Lu (2009)는 α 는 0.9, N 은 44로 제시하였다.

SWAP 지수는 WAP 지수를 Gamma 분포에 적합시키고, 표준정규분포로 변환시킨 것이다. WAP 지수에서 SWAP 지수로의 수학적 변환과정은 Eq. (2)와 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{SWAP} e^{-z^2/2} dz = \frac{1}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} \int_0^{WAP} x^\gamma e^{-x/\beta} dx \tag{2}$$

여기서, $\beta (> 0)$ 와 $\gamma (> 0)$ 는 각각 감마분포의 척도와 형상모수이다. 그리고 감마분포에 적합시키기 위해서는 WAP의 0 값들에 대한 처리가 필수적이기 때문에, Eq. (3)과 같은 방법을 사용했다(Soláková *et al.*, 2014).

$$F(x) = P_0 + (1 - P_0)F(x|x > 0) \tag{3}$$

$$P_0 = \frac{k_{x=0}}{k+1}$$

Table 1. Drought and flood categories based on SWAP value

| Categories | SWAP |
|----------------|--------------------------------|
| Extremely wet | $2.0 \leq \text{SWAP}$ |
| Severely wet | $1.5 \leq \text{SWAP} < 2.0$ |
| Moderately wet | $1.0 \leq \text{SWAP} < 1.5$ |
| Slightly wet | $0.5 \leq \text{SWAP} < 1.0$ |
| Normal | $-0.5 < \text{SWAP} < 0.5$ |
| Slightly dry | $-1.0 < \text{SWAP} \leq -0.5$ |
| Moderate dry | $-1.5 < \text{SWAP} \leq -1.0$ |
| Severely dry | $-2.0 < \text{SWAP} \leq -1.5$ |
| Extremely dry | $\text{SWAP} \leq -2.0$ |

여기서, k 는 전체 자료의 갯수이고, $k_{x=0}$ 은 WAP가 0인 날의 갯수이다. SWAP 지수는 특정 지역의 일별 건조 및 습윤 상태를 분석할 수 있고, 가뭄과 홍수 사상을 판단할 수 있는 지수이다. SWAP 지수에 따라 판단되는 건조 및 습윤 정도는 Table 1과 같이 9단계로 구분된다(Pan, 2021).

SWAP 지수가 10일 연속 -1 미만일 때를 가뭄이라 정의하고, 이후 SWAP 지수가 7일 연속 0.5 이상이면 가뭄이 종료된다고 판정하며, 가뭄 발생 시점부터 종료시점까지의 기간을 가뭄 지속기간이라 한다. 또한 SWAP 지수가 10일 연속 +1 초과일 때를 홍수라 정의하고, 이후 SWAP 지수가 7일 연속 -0.5 이하가 되면 홍수가 종료된다고 판정하며, 홍수 시작시점부터 가뭄 종료시점까지의 기간을 홍수 지속기간이라 한다. 이때, 가뭄 종료시점과 홍수 시작시점의 차이가 5일 이내일 경우를 가뭄-홍수 급변사상이라 판단한다(Zhao *et al.*, 2020).

SWAP 지수는 가뭄 및 홍수, 가뭄-홍수 급변사상 등을 판별하는데 효과적인 지수로, 사상의 시작시점, 지속기간, 종료시점 등을 판단하는데 유용하다. 또한, SWAP 지수는 일별 지수이지만, 주·월별 등으로 확대시켜 연구 지역의 계절적 변화도 나타낼 수 있는 다양한 시간 척도가 가능한 효율적인 지수이다(Lu *et al.*, 2014).

2.2 홍수-가뭄 급변사상의 심각도 산정

가뭄-홍수 급변사상의 특성은 Eq. (4)와 같이 산정되는 심각도를 바탕으로 분석할 수 있다(Yang *et al.*, 2019). 또한, 심각도의 시·공간적 분포를 통해 특정 지역의 가뭄-홍수 급변사상의 시·공간적 특성을 분석할 수 있다.

$$K = \frac{\left| \sum^D SWAP_A - \sum^D SWAP_B \right|}{D} \tag{4}$$

Table 2. Severity of drought-flood abrupt alternation event based on the severity

| Severity | K |
|----------|--------------------|
| Slight | $0.5 \leq K < 1.0$ |
| Moderate | $1.0 \leq K < 1.5$ |
| Severe | $1.5 \leq K < 2.0$ |
| Extreme | $2.0 \leq K$ |

여기서, $\sum^D SWAP_A$ 와 $\sum^D SWAP_B$ 는 급변사상의 급변시점 이전 D일과 이후 D일의 SWAP 지수의 합을 나타낸다. 본 연구에서 D는 가뭄-홍수 급변사상 내의 가뭄 종료시점과 홍수 시작시점의 최대 간격인 5일로 설정했다(Zhao *et al.*, 2020). Table 2는 급변사상 심각도 K의 범위를 나타낸 표로 Pan (2021)의 선행 연구를 참고하여, 국내 심각도 특성에 맞게 심각도 K가 2 이상인 범위를 추가했다.

3. 연구결과

3.1 SWAP 지수 검증

SWAP 지수의 적용성을 검증하기 위해, SWAP 지수를 일·주·월별 등 서로 다른 시간 척도에서 평가하여 과거(1966-2018)에 발생했던 가뭄 및 홍수의 단일사상을 포착할 수 있는 지 살펴보았다. 이때, SWAP 지수는 일 단위를 산정하고, 주·월별 SWAP 변동은 일 단위의 지수를 평균해서 분석하였다.

Fig. 1은 1966-2018년 한강유역의 관측된 월 강수량과 월 SWAP 지수의 변화를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이, 2014년 7월의 월 SWAP 지수는 0.517(Slightly wet)로 7월의 평균 월 SWAP 지수인 1.302(Moderately wet)에 비해 상당히 건조한 편이다. 또한 이 그래프에서의 2015년 월 SWAP 지수는 1966-2018년의 평균 월 SWAP 지수보다 현저히 낮은 지수를 가지고 있으며, 2015년 9월의 SWAP 지수는 -0.081(Normal)로 9월의 평균 월 SWAP 지수인 0.864(Slightly wet)와 상당한 차이를 보인다. 2014, 2015년의 평균 월 SWAP 지수는 1966-2018년의 평균 월 SWAP 지수와 0.93, 0.74의 피어슨 상관계수를 가지고 있으므로 강한 상관관계임이 분명하나, 이렇게 전체적인 SWAP 지수가 낮은 걸 보아 해당 년도들은 다른 년도에 비해 상대적으로 건조했다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 2는 한강유역의 1995년 6월 중순부터 8월 중순까지의 주별 SWAP 지수 변화를 통해 해당 시기 건조·습윤 정도의 변화를 보여준다. 6월 17일 - 6월 23일의 한강유역의 평균 SWAP 지수는 1.175로 ‘Moderately wet’ 상태이었지만, 7월

8월 - 7월 14일의 SWAP는 평균 1.758로 ‘Severly wet’ 상태가 되며, 한강유역 전체적으로 지속적으로 습윤한 상태가 계속 되었다. 유역의 SWAP 지수가 가장 높았던 시기는 8월 19일

- 8월 25일로, 경안천 유역의 경우 SWAP가 1.852로 가장 높았 으며, 대부분의 중권역이 1.8 이상이였다.

Fig. 3은 한강유역의 2013년 12월부터 2014년 11월까지의

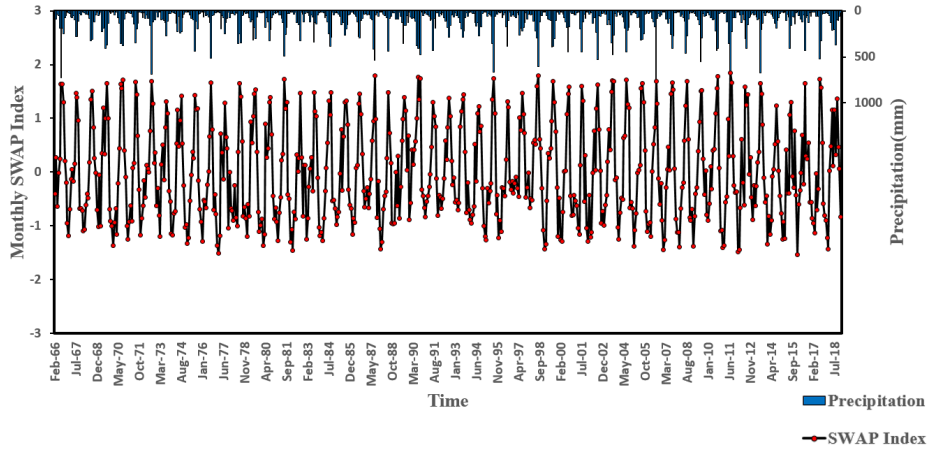


Fig. 1. Variation of the observed monthly precipitation and monthly SWAP index in the Han River basin during 1966-2018

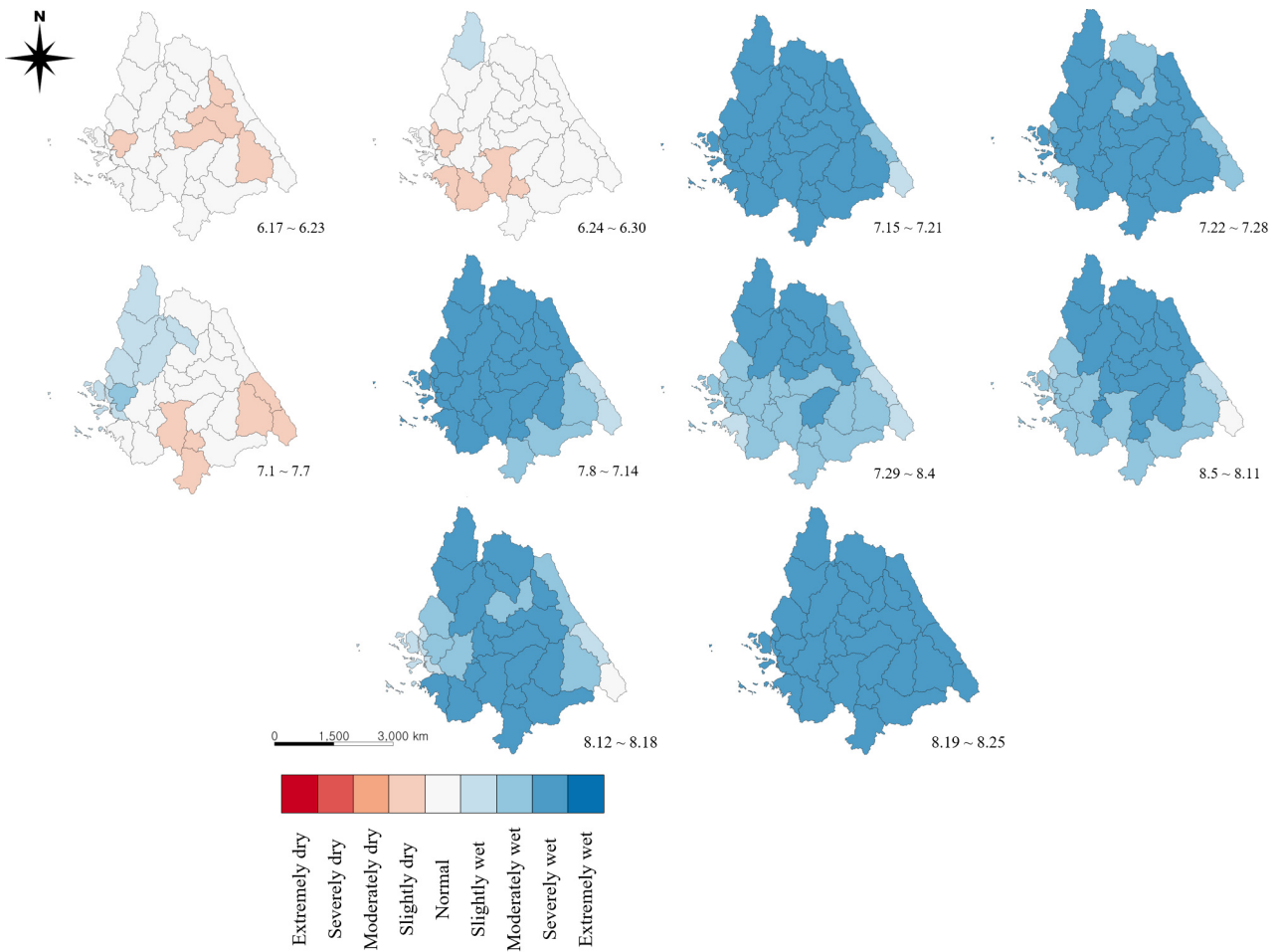


Fig. 2. Weekly SWAP index in the Han River basin during June 1995 - August 1995

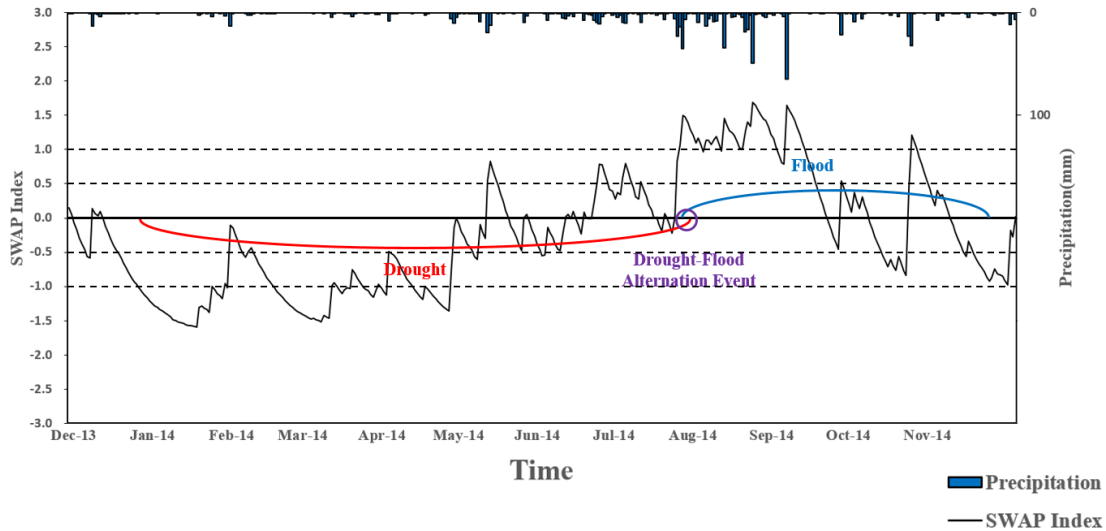


Fig. 3. Daily SWAP index in the Han River basin during December 2013 - November 2014

일 강수량과 일 SWAP 지수의 시간적 변화를 보여주며, 2.1 절에 제시한 SWAP 기반 판단기준을 바탕으로 가뭄사상과 홍수사상 그리고 가뭄-홍수 급변사상을 표시한 것이다. 해당 기간 동안 가장 낮은 SWAP 지수는 -1.592로 심한 건조(Severly dry) 상태를 나타내며, 홍수기(6월 21일 - 9월 20일)에 초차 평균 SWAP 지수는 0.776(Slightly wet)으로 해당 시기는 건조한 시기였다는 것을 알 수 있다.

Figs. 1 and 3에서 보이는 결과들은 우리나라 대표적인 가뭄 사례인 2014 - 2015년의 가뭄과 일치하며(Kim et al., 2016), Fig. 2로부터 도출된 결과들과 일치한다. 특히 가장 SWAP 지수가 높은 시기로 분석된 8월 19일 - 8월 25일은 태풍 재니스와 집중호우가 발생한 시기이다. 이는 건조, 습윤 상태의 판별에 있어 SWAP 지수의 새로운 지수로서의 신뢰성과 적용성을 보여주며, SWAP 지수는 가뭄-홍수 단일사상 뿐 아니라 가뭄-홍수 급변사상까지의 시작시점, 종료시점, 지속기간 등을 정확하게 판단할 수 있다는 것을 알 수 있다.

3.2 급변사상의 심각도 K에 대한 추세 평가

1966-2018년의 한강 유역의 가뭄-홍수 급변사상 심각도 K에 대한 평가는 30개의 중권역 별로 분리하여 진행하였고, Table 3은 각 중권역의 기본정보이며, 각 중권역별 심각도 상승률과 최대 심각도, 급변사상의 발생 빈도는 Table 4와 같다.

한강유역 내 30개의 중권역 중 20개의 중권역이 2000년 이후로 평균적인 심각도가 증가하였다. 본 연구에서 심각도 상승률은 중권역별 2000년을 기준으로 전·후 평균 심각도의 변화율로 정의하였다. 가장 높은 심각도 상승률을 가진 중권역은 한강고양(#1019)으로 심각도 상승률은 80.9%이다. 다음

으로는 홍천강(#1014)의 67.38% 증가, 강릉남대천(#1302)의 61.7%, 남한강상류(#1001)의 51.29% 순으로 심각도 상승률이 나타난다.

Fig. 4는 2017년의 한강유역 내 중권역별 심각도를 나타내며, 2017년 7월 3일을 기점으로 급변사상이 발생한 고미탄천(#1020)과 임진강상류(#1021)의 급변시점 전·후 10일간의 누적 강수량은 253 mm와 225 mm로 큰 차이가 없으나, 심각도(K)는 각각 2.12(#1020)과 1.32(#1021)로 큰 차이가 나타난다. 반면, 충주댐 하류(#1005)와 임진강상류(#1021)의 급변시점 전·후 10일간의 누적 강수량은 135 mm와 225 mm로 큰 차이가 있음에도 불구하고 심각도(K)는 1.47(#1005)과 1.32(#1021)로 상대적으로 적은 차이를 나타낸다. 이러한 결과는 한강유역 내 전체 유역의 일괄적 강수발생 분포특성이 아닌, 각 유역별 상이한 강수발생 분포특성의 차이가 이미 반영되어 SWAP 지수가 산정되었으며, 이를 기반으로 하여 유역별 급변사상의 심각도(K)는 상대적으로 해석되는 것으로 확인된다.

Figs. 5 and 6은 각각 1966-2018년의 중권역별 가뭄-홍수 급변사상의 발생 빈도와 최대심각도의 공간적 분포를 나타낸 그림이다. 두 그림에서부터 직관적으로 볼 수 있듯이, 남한강상류(#1001), 평창강(#1002), 남한강하류(1007), 고미탄천(#1020)은 가뭄-홍수 급변사상의 발생빈도와 최대 심각도 모두 상대적으로 높으며, 의암댐(#1013), 팔당댐(#1017), 한강고양(#1019)은 가뭄-홍수 급변사상의 발생빈도와 최대 심각도 모두 상대적으로 낮다. 한강유역 내 가뭄-홍수 급변사상으로 인한 취약지역 및 위험지역은 발생빈도가 평균 이상이고, 최대 심각도 또한 상대적으로 높으며 심각도 상승률도 높은

Table 3. Basic information about middle-sized watershed of the Han River basin

| Watershed name | Code | Area (km ²) | Perimeter (km) | Elevation (m) | Slope (%) |
|----------------------------|------|-------------------------|----------------|---------------|-----------|
| Upstream of Namhan River | 1001 | 2,447.85 | 291.1 | 748.29 | 51.09 |
| Pyeongchang River | 1002 | 1,773.39 | 244.64 | 592.02 | 46.28 |
| Chungju Dam | 1003 | 2,483.82 | 348.71 | 475.33 | 48.43 |
| Dalcheon | 1004 | 1,614.36 | 263.18 | 299.11 | 38.13 |
| Downstream of Chungju Dam | 1005 | 524.42 | 131.27 | 203.09 | 33.11 |
| Seom River | 1006 | 1,491.01 | 221.64 | 309.42 | 41.35 |
| Downstream of Namhan River | 1007 | 2,072.72 | 300.47 | 148.59 | 23.54 |
| Geumgangsan Dam | 1008 | 2,384.68 | 283.7 | 630.68 | 38.82 |
| Peace Dam | 1009 | 940.45 | 193.04 | 492.23 | 45.41 |
| Chuncheon Dam | 1010 | 1,587.45 | 273.38 | 467.41 | 47.94 |
| Inbukcheon | 1011 | 931.22 | 174.78 | 690.76 | 51.41 |
| Soyang River | 1012 | 1,852.04 | 297.07 | 607.58 | 55.06 |
| Uiam Dam | 1013 | 721.7 | 165.55 | 332.2 | 44.65 |
| Hongcheon River | 1014 | 1,566.05 | 248.52 | 366.67 | 48.68 |
| Cheongpyeong Dam | 1015 | 760.61 | 167 | 277.35 | 41.97 |
| Gyeongancheon | 1016 | 561.12 | 136.78 | 181.82 | 30.76 |
| Paldang Dam | 1017 | 43.87 | 39.41 | 142.07 | 32.29 |
| Han River Seoul | 1018 | 1,537.22 | 258.5 | 110.22 | 20.89 |
| Han River Goyang | 1019 | 848.42 | 181.33 | 52.1 | 12.41 |
| Gomitancheon | 1020 | 2,195.20 | 258.57 | 608.12 | 45.4 |
| Upstream of Imjin River | 1021 | 2,072.71 | 303.8 | 267.78 | 28.97 |
| Hantan River | 1022 | 2,452.18 | 318.01 | 294.32 | 30.21 |
| Downstream of Imjin River | 1023 | 1,419.21 | 205.31 | 103.97 | 20.48 |
| Downstream of Han River | 1024 | 146.4 | 64.14 | 32.78 | 11.77 |
| Anseongcheon | 1101 | 1,658.66 | 239.76 | 69.54 | 14.92 |
| Han River Western Sea | 1201 | 1,009.55 | 832.29 | 36.24 | 14.06 |
| Shihwaho | 1202 | 961.26 | 291.82 | 24.33 | 10.47 |
| Yangyang namdaechon | 1301 | 1,852.93 | 353.67 | 394.04 | 44.4 |
| Gangneung namdaechon | 1302 | 1,050.11 | 237.85 | 299.81 | 42.9 |
| Samcheokosipcheon | 1303 | 986.64 | 185.02 | 405.05 | 57.35 |

남한강상류(#1001)로 나타났다.

2017년의 전국 강수량은 홍수기(6월 20일) 전까지 예년에 비해 약 49% 수준으로 매우 낮았다. 특히, 중부지역은 타 지역

Table 4. Drought-flood abrupt alternation events severity increase rate, maximum severity, frequency, severity of 2017 in the Han River basin

| Watershed ID | Severity Increase Rate (%) | Max. Severity | Frequency (# of events) | Severity (2017) |
|--------------|----------------------------|---------------|-------------------------|-----------------|
| 1001 | 51.29 | 2.14 | 11 | - |
| 1002 | 2.82 | 2.05 | 14 | 1.15 |
| 1003 | 33.63 | 1.67 | 8 | 1.09 |
| 1004 | -6.53 | 1.98 | 11 | 1.27 |
| 1005 | 20.26 | 1.71 | 15 | 1.49 |
| 1006 | -10.29 | 1.99 | 17 | 1.19 |
| 1007 | 23.37 | 2.01 | 11 | 1.10 |
| 1008 | 30.39 | 1.83 | 11 | 1.69 |
| 1009 | 48.1 | 1.78 | 12 | 1.78 |
| 1010 | 15.61 | 1.91 | 6 | - |
| 1011 | -35.87 | 1.46 | 9 | - |
| 1012 | 14.46 | 1.48 | 6 | - |
| 1013 | 40.36 | 1.21 | 4 | - |
| 1014 | 67.38 | 1.4 | 7 | - |
| 1015 | 7.4 | 1.35 | 7 | - |
| 1016 | -18.21 | 2.13 | 10 | 1.39 |
| 1017 | - | 0.9 | 3 | - |
| 1018 | 0.2 | 2.17 | 8 | - |
| 1019 | 80.9 | 1.29 | 5 | - |
| 1020 | -18.83 | 2.12 | 13 | 2.12 |
| 1021 | 11.27 | 1.73 | 12 | 1.32 |
| 1022 | 26.47 | 1.32 | 13 | - |
| 1023 | 41.54 | 1.56 | 9 | - |
| 1024 | 35.8 | 1.89 | 9 | 1.58 |
| 1101 | -12.19 | 1.48 | 12 | 1.35 |
| 1201 | - | 2.45 | 8 | - |
| 1202 | -20.37 | 2.39 | 10 | - |
| 1301 | -36.55 | 1.44 | 11 | - |
| 1302 | 61.7 | 0.31 | 10 | - |
| 1303 | 39.59 | 0.53 | 9 | - |

보다 홍수기 전까지의 강수량이 예년에 비해 훨씬 부족했다. 하지만 장마기간 중 장마전선이 활성화되어 일부지역은 8월 말 기준 예년 이상의 강수량과 강한 집중호우가 발생해 홍수 피해를 야기하였다. 결국, 한강수계의 다목적댐 저수량은 5월 말 기준 예년의 90%에 불과했지만, 8월 말에는 124%에 육박하여 가뭄우려 상황에서 홍수대응 상황으로 급변할 정도였다 (Kim and Im, 2017). Table 4의 5번째 열은 산정한 심각도 K의 결과와 실제 가뭄과 홍수의 심도나 피해의 크기 등과의 연관성을 보기 위한 2017년 홍수기에 발생한 가뭄-홍수 급변사상

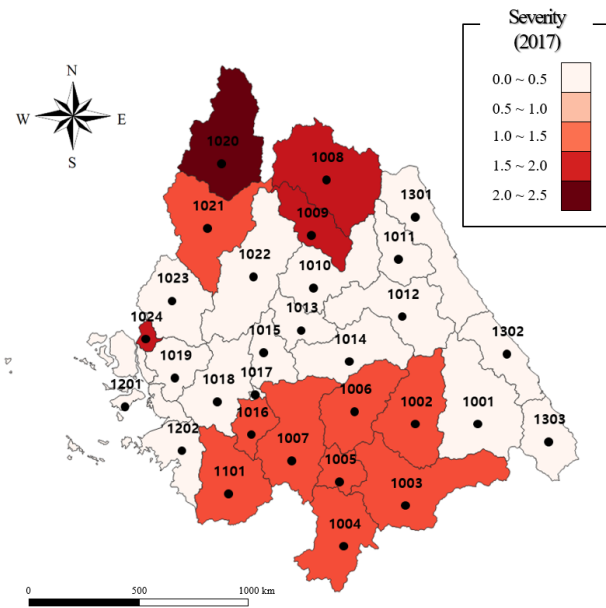


Fig. 4. Severity distribution of drought-flood abrupt alternation in the Han River basin in 2017

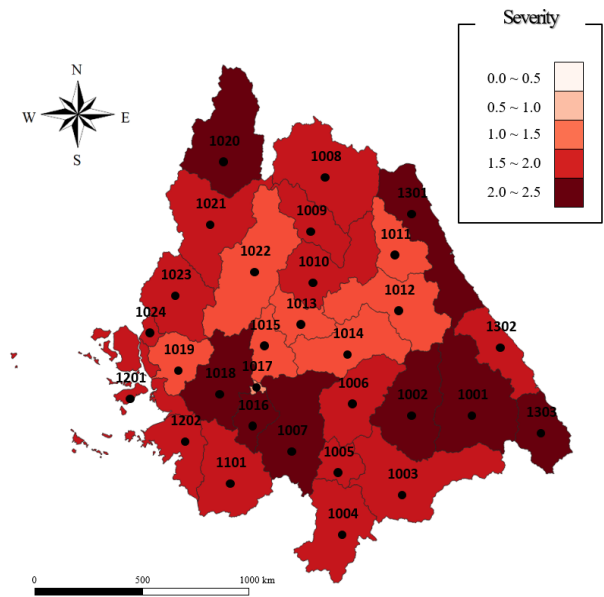


Fig. 6. Maximum Severity distribution of drought-flood abrupt alternation events in the Han River basin during 1966-2018

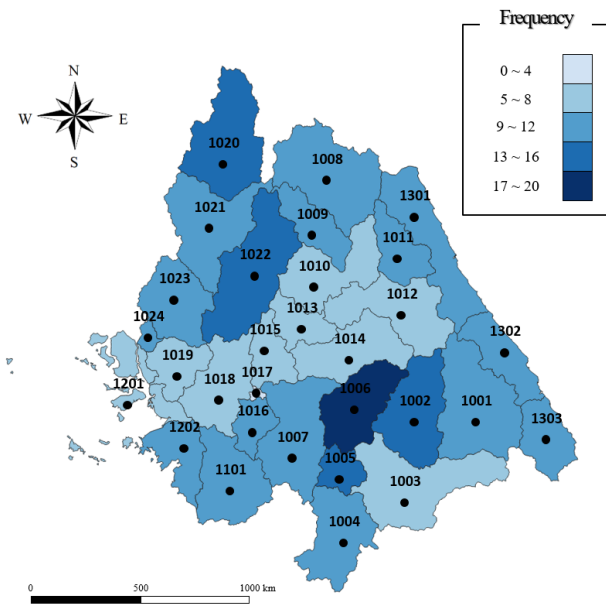


Fig. 5. Frequency of drought-flood abrupt alternation events in the Han River basin during 1966-2018

의 심각도 K이다. 가장 심각한 유역은 고미탄천(#1020)으로 2.12(Extreme)의 심각도로 아주 심각한 수준이고 중권역의 평균 심각도는 1.42(Moderate)로 약하지 않은 수준의 심각도를 가지고 있다.

4. 결론

가뭄-홍수 급변사상은 가뭄과 홍수의 영향이 중첩되어 개별 사상보다 대응하기가 어려운 극한사상이지만, 국내에는 이러한 가뭄-홍수 급변사상에 대한 연구가 부족하다. 따라서 본 연구에서는 한강유역의 면적평균강수량을 통해 산정한 SWAP 지수를 통해 가뭄-홍수 급변사상을 중권역별로 판단하고, 시·공간적 특성을 분석했다. 분석 특성 중 심각도K는 한강유역 내 30개의 중권역 중 20개의 중권역이 2000년 이후로 증가하는 추세로 확인되었으며, 심각도 상승률이 가장 높은 중권역은 80.9%의 심각도 상승률을 보였다. 또한, 향후 한강유역 내 가뭄-홍수 급변사상으로 인한 취약지역 및 위험지역은 심각도K가 증가하는 추세이고 발생빈도, 최대심각도 모두 상대적으로 높은 중권역으로 판단했다.

본 연구에서 사용한 SWAP 지수는 다양한 시간 척도나 공간에 구애받지 않아 가뭄-홍수 급변사상의 시·공간적 분포에 대해 효과적으로 분석할 수 있는 장점이 있으며, 향후 댐 저수율 관리 등과 관련한 물관리 정책이나 이수 및 치수관리를 위한 급변사상에 대한 연구에 활용도가 높을 것으로 기대된다. 심각도K는 유역의 정량적 재해의 위험성이 아닌 전체 유역의 전반적인 강수 상태 대비 지역별 수재해의 심각성을 의미하는 지수로, 동일한 강도의 극한강수 발생시에도 지역마다 다르게 나타나는 재해의 상대적 심각도를 판단하는데 효율적이라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 한국연구재단 기초연구사업(NRF-2020R1C1C1014636)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Dai, A., Trenberth, K.E., and Karl, T.R. (1998). "Global variations in droughts and wet spells: 1900-1995." *Geophysical Research Letters*, Vol. 25, No. 17, pp. 3367-3370.
- Kim, H.S., and Im, D.J. (2017) "Implications of water management through dam operation in 2017." *Water of Future*, Vol. 50, No. 9, pp. 16-23. (in Korean)
- Kim, H.S., Kim, H.S., Chun G.I., and Kang, S.U. (2016). "Evaluation of drought in 2014-2015." *Water of Future*, Vol. 49, No. 7, pp. 61-75. (in Korean)
- Lu, E. (2009). "Determining the start, duration, and strength of flood and drought with daily precipitation: Rationale." *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, No. 12, L12707.
- Lu, E., Cai, W., Jiang, Z., Zhang, Q., Zhang, C., Higgins, R.W., and Halpert, M.S. (2014). "The day-to-day monitoring of the 2011 severe drought in China." *Climate Dynamics*. Vol. 43, No. 1-2, pp. 1-9.
- Pan, S.H. (2021). *Investigating the characteristics of drought-flood abrupt alternation events based on SWAP index in South Korea*. M.S. dissertation, University of Hanyang, pp. 1-61.
- Shan, L., Zhang, L., Xiong, Z., Chen, X., Chen, S., and Yang, W. (2018). "Spatio-temporal evolution characteristics and prediction of dry-wet abrupt alternation during the summer monsoon in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin." *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 130, No. 4, pp. 427-440.
- Soláková, T., De Michele, C., and Vezzoli, R. (2014). "Comparison between parametric and nonparametric approaches for the calculation of two drought indices: SPI and SSI." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 19, No. 9, 04014010.
- Wu, Z., Li, J., He, J., and Jiang, Z. (2006). "Occurrence of droughts and floods during the normal summer monsoons in the mid- and lower reaches of the Yangtze River." *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, No. 5, L05813.
- Xiong, Q., Deng, Y., Zhong, L., Haohua H., and Chen, X. (2018). "Effects of drought-flood abrupt alternation on yield and physiological characteristics of rice" *International Journal of Agriculture and Biology*, Vol. 20, No. 5, pp. 1107-1116.
- Yang, J., Chen, H., Hou, Y., Zhao, Y., Chen, Q., Xu, C., and Chen, J. (2019) "A method to identify the drought-flood transition based on the meteorological drought index." *Acta Geographica Sinica*, Vol. 74, No. 11, pp. 2358-2370.
- Zhao, Y., Weng, Z., Chen, H., and Yang, J. (2020) "Analysis of the evolution of drought, flood, and drought-flood abrupt alternation events under climate change using the daily SWAP index." *Water*, Vol. 12, No. 7, pp. 1969-1991.