



## Determining proper threshold levels for hydrological drought analysis based on independent tests

Kim, Tae-Woong<sup>a\*</sup> · Park, Ji Yeon<sup>b</sup> · Shin, Ji Yae<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Ansan, Korea

<sup>b</sup>Graduate student, Department of Civil and Environmental System Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

<sup>c</sup>Postdoctoral fellow, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Ansan, Korea

Paper number: 20-013

Received: 12 February 2020; Revised: 7 March 2020; Accepted: 7 March 2020

### Abstract

Hydrological drought is directly associated with lack of available water in rivers, reservoirs, and groundwater. It is important to analyze hydrological drought for efficient water resource management because most of rainfall is concentrated in wet seasons and water supply is highly dependent on dams and reservoirs in South Korea. Generally, a threshold level method is useful for defining hydrological droughts. However, this method causes interdependent problems between drought events which result in skewed results in further statistical analysis. Therefore, it is necessary to determine a proper threshold level to represent regional drought characteristics. In this study, applying 50~99 percentiles of daily flow-duration curve, hydrological drought events were extracted, and independence tests were conducted for 12 watersheds. The Poisson independence test showed that 87~99 percentiles were available for most stations except for Yeosu and Pyeongtaek. The generalized Pareto independence test showed that 80~90 percentiles were the most common. Mean excess plot showed that 80~90 percentiles were the most common. Therefore, the common ranges of the three independent tests were determined for each station and proper threshold levels were recommended for large river basins; 70~76 percentiles for the Han River basin, 87~91 percentiles for the Nakdong River basin, 86~98 percentiles for the Geum River basin, and 85~87 percentiles for the Youngsan and Seomjin River basin.

**Keywords:** Flow-duration curve, Hydrological drought, Independent test, Threshold level

## 수문학적 가뭄 특성 분석을 위한 독립성 검정 기반의 적정 임계수준 결정

김태웅<sup>a\*</sup> · 박지연<sup>b</sup> · 신지예<sup>c</sup>

<sup>a</sup>한양대학교(ERICA) 건설환경공학과 교수, <sup>b</sup>한양대학교 대학원 건설환경시스템공학과 석사과정, <sup>c</sup>한양대학교(EIRCA) 건설환경공학과 박사후연구원

### 요지

수문학적 가뭄은 하천, 저수지, 지하수 등과 같은 가용 수자원의 부족과 직접적으로 연관되어 있어 가뭄에 대한 체감이 기상학적 가뭄에 비하여 크다. 특히, 우리나라의 경우 홍수기에 집중되는 강우 특성으로, 비홍수기에는 댐과 저수지의 저류량에 크게 의존하여 수자원 관리가 이루어지므로 효율적인 수자원 관리를 위해서는 수문학적 가뭄을 분석하는 것이 중요하다. 일반적으로 수문학적 가뭄은 정상보다 낮은 유량이 발생하는 것으로 정의된다. 대부분 수문학적 가뭄을 정량적으로 표현하기 위해 주로 임계수준방법(threshold level method)을 많이 사용한다. 그러나 임계수준방법은 작은 미소가뭄으로 인한 독립성 문제를 야기시킬 수 있다. 본 연구에서는 홍수통제소에서 제공하는 12개 지점의 유량자료를 활용하여 독립성 검정을 실시한 후, 우리나라의 수문학적 가뭄 특성 분석을 위한 적정 임계수준을 제시하였다. 일별 유향곡선을 작성하고 50~99 백분위수를 적용하여 가뭄사상을 추출하였다. 적정 임계수준 범위를 결정하기 위해 독립성 검정을 실시하였다. 포아송 분포의 독립성 검정결과, 여주시 지점과 평택시 지점을 제외하고 대부분 지점들은 87~99 백분위수 구간이 적절한 것을 나타냈으며, 일반 파레토 분포의 독립성 검정결과, 80~90 백분위수 사이가 가장 적절하였으며, 평균 초과도표에서는 80~90 백분위수 구간이 가장 많이 나타났다. 본 연구에서는 각 권역별로 적정 임계수준을 제시하기 위하여 권역에 해당하는 지역들의 공통범위를 검토하였다. 그 결과, 한강권역에서는 70~76 백분위수, 낙동강권역은 87~91 백분위수, 금강권역에서는 86~98 백분위수, 영산 및 섬진강권역에서 85~87 백분위수 구간이 적절한 임계수준인 것으로 나타났다.

**핵심용어:** 유향곡선, 수문학적 가뭄, 독립성 검정, 임계수준

\*Corresponding Author. Tel: +82-31-400-5184  
E-mail: twkim72@hanyang.ac.kr (T.-W. Kim)

## 1. 서론

가뭄은 다른 자연재해와 달리 시·공간적으로 시작과 끝을 정확히 판단하기 어렵고 발생시점이 불명확하기 때문에 초기 대응이 어렵다. 이러한 가뭄으로 인한 피해는 장기적이며 파급효과는 사회, 경제, 환경 등에서 복잡한 양상으로 나타나기 때문에 피해규모를 파악하는 것은 어렵지만, 경제적인 손실은 홍수에 비해 2~3배로 큰 것으로 알려져 있다(Smith and Katz, 2013).

우리나라의 경우, 불규칙한 강우 분포 등으로 인해 물 관리가 불리한 여건에서 주기적으로 가뭄이 반복되고 있다. 대표적으로 1994년에 우리나라 영호남 지방에 극심한 가뭄이 발생하였다. 이때 용수전용댐 저수율은 25% 수준이었으며 전국 농업용 저수지의 평균 저수율은 56%로 예년 평균의 67% 수준이었다. 가뭄으로 인한 농업피해면적이 158천 ha이었고, 어류 159톤 폐사하였으며 강수량이 평년의 27% 수준이었다(MLIT, 2011). 지역적으로 피해의 규모가 다를 뿐 매년 가뭄으로 인한 피해를 겪고 있으며, 가뭄에 대한 피해를 예방하고 저감하기 위한 대책을 마련하기 위하여 많은 가뭄 연구가 수행되고 있다.

우리나라는 연강수량의 60~70%가 여름철에 집중되어 있으며, 여름철 강수량 중 50~70% 정도는 장마기간(6월 하순~8월 초순)에 집중된다. 따라서, 우리나라는 홍수시에 댐과 저수지에 유입되는 물을 최대한 저류하여 비홍수기에 활용하기 때문에, 효율적인 수자원 관리를 위해서는 수문학적 가뭄을 분석하는 것이 중요하다. 수문학적 가뭄을 분석하기 위해서는 일반적으로 임계수준(threshold level)을 설정하여 가뭄사상을 정의하고 가뭄사상의 특성을 분석한다. 임계수준 방법은 이미 결정된 임계수준을 이용하여 가뭄사상의 시작과 끝을 명확하게 구분할 수 있고 가뭄사상의 특성을 즉각적으로 도출할 수 있고(Van Huijgevoort *et al.*, 2012), 가뭄지수와는 다르게 수문학적 변수에 대한 가뭄 특성(강우량 및 유출량의 부족량)을 직접적으로 해석할 수 있다. 그러나 여러 개의 미소 가뭄으로 인해서 가뭄사상의 독립성에 대한 문제를 야기할 수 있다(Tallaksen *et al.*, 1997). 즉, 부적절한 임계수준은 독립적인 여러 가뭄사상을 하나로 묶거나, 지속기간이 짧은 여러 개의 가뭄사상은 상호 의존적인 관계를 가진다. 따라서 개별 가뭄사상이 서로 독립이라는 통계학적 분석의 기본 가정을 위배하지 않는 적절한 임계수준을 선정해야 한다.

임계수준의 설정은 가뭄 분석의 초기 단계에서 매우 중요하며, 가뭄의 유형에 따라 다양한 방법으로 임계수준을 설정할 수 있다. 유량이 많은 하천의 경우 70 백분위수 또는 90 백분위

수(이하 00 백분위수는 Q00로 표현함)가 합리적이라고 간주된다(Hisdal *et al.*, 2001; Pandey *et al.*, 2008). Woo and Tarhule (1994)는 나이지리아 북부의 가뭄을 분석하여 Q70~Q90을 적정 임계수준으로 제시하였다. 유럽의 경우, Q70 임계수준으로 가뭄 심도에 대한 빈도분석을 하였을 때 가장 문제가 적게 발생한다는 선행연구가 있었으며(Hisdal *et al.*, 2001; Querner and Van Lanen, 2010), 이를 바탕으로 가뭄 분석을 실시할 경우 대부분 Q70을 많이 사용한다. 또한, Sung and Chung (2014)과 Razmkhah (2016)은 가뭄심도를 평가하기 위하여 수문변량의 70%를 임계수준으로 설정하였으며, Kjeldsen *et al.* (2000)은 짐바브웨 하천의 월별 유향곡선의 Q75가 가뭄을 가장 잘 반영한다는 결과를 제시하였다. Kim *et al.* (2018)에서는 서울 지역 위험도 분석을 위하여 평균강우량의 70~95%에 대하여 가뭄사상의 수를 표준강수지수(SPI)에 의한 가뭄사상 개수와 비교한 결과 70%를 임계수준으로 설정하였다. 그러나 Yu *et al.* (2016)은 월평균 강수량의 80%를 사용하여 가뭄사상을 추출하였을 때 강수 과부족량이 SPI와 유사하게 나타난다는 것을 보여주었다.

이와 같이, 국내외 선행연구에서는 가뭄연구를 위하여 Q70~Q90을 사용하지만, 수문학적 가뭄을 위한 임계수준의 설정에 대한 근거가 명확하지 않다. 따라서 본 연구에서는 우리나라의 하천유량 자료에 대하여 Q50~Q99을 다양하게 적용시켜 독립성 가정에 위배하지 않고 우리나라의 수문학적 가뭄 분석을 위한 적정 임계수준을 제시하고자 한다.

## 2. 대상지역 및 연구방법

### 2.1 대상지역 선정

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 환경부 홍수통제소에서 제시한 25개 갈수예보 관리지점 중 유량자료를 충분히 확보할 수 있는 12개 지점(여주, 평택, 진동, 안강, 조동, 공주, 수춘, 대천, 신태인, 나주, 구례, 연산)을 선정하였다. 본 연구에서 활용한 유량자료의 기간은 Table 1과 같다. 대부분 여름철인 7월, 8월에 유출량이 많으며, 12개 지점 중에서 진동 지점이 전반적으로 유출량(2013년 여름철에 약 200,000 m<sup>3</sup>/s로 최대)이 많이 나타난 반면, 신태인 지점이 다른 지점보다 유출량이 적게 나타났다(2011년 여름철에 약 4,500 m<sup>3</sup>/s로 최소).

### 2.2 임계수준 결정 방법

임계수준 방법은 수문시계열의 특성 분석을 위하여 연속 이론(run theory)과 교차 이론(crossing theory)을 접목시킨

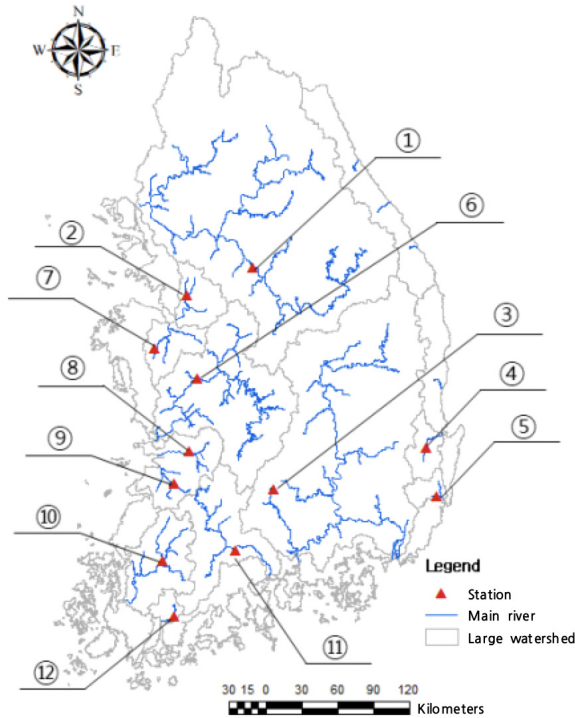


Fig. 1. Streamflow observation stations used in this study

Table 1. Streamflow observation stations and data period used in this study

St. #	Basin	Station	Date Period
①	Han River	Yeoju	1997.01.01. ~ 2015.12.31
②		Pyeongtaek	1997.01.01 ~ 2015.12.31
③	Nakdong River	Jindong	2001.01.01 ~ 2015.12.31
④		Angang	2003.01.01 ~ 2015.12.31
⑤		Jodong	2003.01.01 ~ 2015.12.31
⑥	Geum River	Gongju	1998.01.01 ~ 2015.12.31
⑦		Suchon	1999.01.01 ~ 2015.12.31
⑧		Daecheon	1999.01.01 ~ 2015.12.31
⑨		Sintaein	1998.01.01 ~ 2015.12.31
⑩	Yeongsan-Seomjin River	Naju	1998.01.01 ~ 2015.12.31
⑪		Gurye	1998.01.01 ~ 2015.12.31
⑫		Yeonsan	1998.01.01 ~ 2015.12.31

것으로, 기상 및 수문학적 가뭄사상을 정의하고 특성(지속기간, 심도, 재현기간 등)을 분석하는데 자주 사용되어 왔다. 이러한 임계수준은 고정 임계수준과 변동 임계수준으로 분류할 수 있다. 고정 임계수준방법은 전체기간 동안 하나의 임계값으로 결정하며, 변동 임계수준은 일별, 월별, 계절별로 다르게 임계값을 결정한다. 변동 임계수준은 시기별로 강수량 및 유량이 많을 때와 적을 때의 편차를 고려하기 위한 것으로, 강우

량 및 과부족량에 대한 정확도가 높으므로 고정 임계수준보다 적절하다(Karimi and Shahedi, 2013; Sung and Chung, 2014; Kim *et al.*, 2018).

수문학적 가뭄의 임계수준은 대부분 유황곡선(flow duration curve)을 활용하여 결정한다. 즉, 유량이 임계수준 이하로 되었을 때 가뭄사상이 시작되며 유량이 다시 임계수준 이상으로 올라가게 되면 가뭄사상이 종료된다. 가뭄사상의 시작과 종료 시점의 시간적 간격을 지속기간이라 하며, 지속기간 동안 발생한 임계수준보다 부족한 유량의 합을 심도라 정의한다(Sung and Chung, 2014; Yu, 2019).

임계수준에 따라 가뭄사상의 개수는 달라지고 이에 따라 가뭄사상의 지속기간 및 심도가 달라져, 가뭄사상에 대한 과대평가 및 과소평가를 야기할 수 있다. 따라서 적절한 임계수준을 결정하는 것은 매우 중요하다.

### 2.3 극치이론 기반 독립성 검정

극치 이론(extreme value theory)에 따르면, 임계값이 독립적이고 적절하다면, 초과발생횟수는 포아송(Poisson) 분포에 수렴하고, 초과량의 분포는 일반 파레토(Generalized Pareto) 분포에 수렴한다(Davison and Smith, 1990; Begueria, 2005). 포아송 분포에 대한 적합성은 Eq. (1)과 같이 일정한 시간 간격으로 계산된 사상 갯수의 평균과 분산에 대한 비율(R)로 판단할 수 있다(Cunnane, 1979). 만약 임계수준이 적절하다면, 가뭄사상의 발생 횟수는 포아송 분포를 따르고,  $R = 1$  이 된다.

$$R = \frac{\mu}{\sigma^2} \quad (1)$$

여기서, R은 비율을 의미하며,  $\mu$ 는 가뭄사상의 발생 횟수의 평균이고  $\sigma^2$ 은 분산이다.

또한, Aburrea and Cebrián (2002)는 최대우도법을 활용하여 가뭄심도를 주변확률분포(exponential, Weibull, Gamma, log-normal, log-logistic and Generalize Pareto)에 적합시킨 결과, 적절한 임계값일 때 가뭄심도는 일반 파레토 분포로 수렴하는 경향이 있으며, Eq. (2)와 같이 산정되는 일반 파레토 분포의 규모 매개변수(scale parameter,  $\sigma$ )와 형상 매개변수(shape parameter,  $\xi$ )는 임계수준이 변화하더라도 일정하게 유지된다.

$$(Y \leq y/\sigma, \xi) = \begin{cases} 1 - (1 + \xi \frac{y}{\sigma})^{-1/\xi}, \xi \neq 0 \\ 1 - \exp(-\frac{y}{\sigma}), \xi = 0 \end{cases} \quad (2)$$

여기서, Y는 가뭄사상의 심도이며,  $\sigma$ 는 규모 매개변수이고  $\xi$ 는 형상 매개변수이다.

2.4 평균 초과도표

Ghosh and Resnick (2011)에 의하면, 높은 임계값은 일반 파레토 분포의 매개변수의 분산을 증가시키는 반면, 낮은 임계값은 분산을 감소시킨다. 따라서, 이 둘의 균형을 맞추는 적절한 임계값을 선택하는 것이 중요하다. 평균 초과도표(mean excess plot)는 Davison and Smith (1990)가 제안한 것으로, 가뭄 심도가 일반 파레토 분포를 따른다면 평균 초과도표가 대략 선형으로 나타난다(Yu, 2019).

3. 적용 및 결과

3.1 극치이론 기반 독립성 검정 결과

본 연구에서는 Abaurrea and Cebrián (2002)과 Beguería (2005)의 포아송 과정에 대한 이론을 바탕으로 독립성 검증을 수행하였다. 많은 연구에서 포아송 분포에 대한 확률변수는 매년 발생하는 사상의 갯수로 정의하였다. 가뭄 분석의 관점에서 가뭄사상을 수문학적으로 구분하기 좋은 기간을 선택해서 1년의 주기를 정할 수 있는데, 이를 수문년(water year)이라고 한다. 즉, 수문학적 가뭄 분석을 위한 수문년은 하천의 유량이 최고점에서 감소할 때를 경계로 결정할 수 있다. 우리나라의 경우, 주로 10월 1일을 수문년의 시작으로 그리고 9월 30일은 수문년의 마지막으로 설정한다.

따라서, 본 연구에서는 일별 유황곡선을 작성하고 Q50~Q99에 대한 가뭄사상을 추출하였으며, 우리나라 수문년을 기준으로 가뭄사상의 개수를 세어서 평균값과 분산을 산정하고, 확률분포의 매개변수를 산정하였다.

Abaurrea and Cebrián (2002)에 따르면, 임계수준 변화에 따른 평균과 분산의 비율이 1에 가까울수록 포아송 과정에 수렴하여 독립이라고 할 수 있다. Fig. 2는 Eq. (1)의 R값에 대한 결과를 구레 지점에 대해서 제시한 것이다.

Fig. 2와 같이 각 지점에 대한 R값을 도시하고, 그 값이 '1'에 가장 가까운 구간을 살펴보기 위해 Q50 - Q59, Q51 - Q60, ..., Q90 - Q99와 같은 이동구간(moving window)에 대하여 1과의 편차를 구하고, Eq. (3)과 같이 이러한 편차의 절대값에 대한 평균(Mean Absolute Error, MAE)을 산정하였다.

$$MAE = \frac{\sum |1 - R|}{n} \tag{3}$$

여기서 R는 가뭄사상의 개수에 대한 평균과 분산의 비율이고(Eq. (1)), n은 이동구간의 자료갯수이다.

MAE가 0에 가까울수록 R은 1에 가깝기 때문에, 본 연구에서는 MAE 값의 하위 10%인 구간을 찾아, Table 2에 제시하였다. 각 지점별로 MAE값이 하위 10%인 구간은 대부분 Q80구간과 Q90구간이었다. 특히, 여주시 지점과 평택시 지점을 제외하고 나머지 지점들은 Q87~Q99 구간이 산정되었다.

또한, 가뭄 심도에 대하여 일반 파레토 분포의 형상 매개변수는 Fig. 3과 같이 각 지점별로 산정하였다. 독립적인 적절한 임계수준이면 형상 매개변수가 안정적이어야 하므로 변동계수(coefficient of variation, COV)를 활용하여 그에 대한 최적의 구간을 산정하였다. 이때, 이동구간에 대한 변동계수가 최소값을 나타내는 하위 10% 구간을 살펴보았다. 하위 10% 구간 변동계수의 값은 Table 3과 같다. 앞에서 분석한 포아송 독

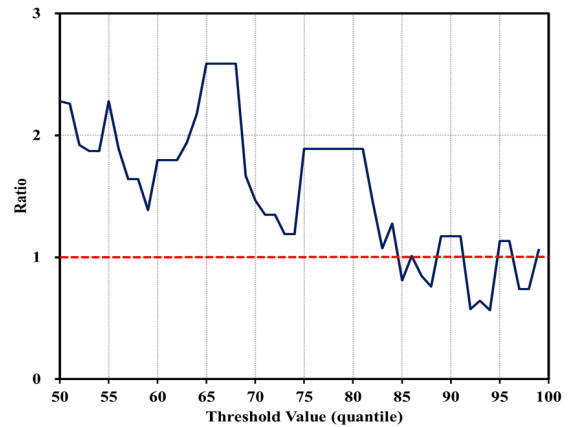


Fig. 2. Results of poisson independent test for Gurye station

Table 2. Low 10% intervals for the poisson independent test

Station	Interval	MAE
Yeosu	Q69 ~ Q84	1.1067
Pyeongtaek	Q66 ~ Q76	0.6036
Jindong	Q87 ~ Q99	0.5124
Angang	Q85 ~ Q99	0.6111
Jodong	Q87 ~ Q99	0.8453
Gongju	Q86 ~ Q99	0.6214
Suchon	Q76 ~ Q87	0.5720
	Q90 ~ Q99	0.5828
Naju	Q87 ~ Q99	0.4982
Gurye	Q85 ~ Q99	0.7940
Daecheon	Q87 ~ Q99	0.8089
Sintaein	Q85 ~ Q98	0.8864
Yeonsan	Q87 ~ Q99	0.9036

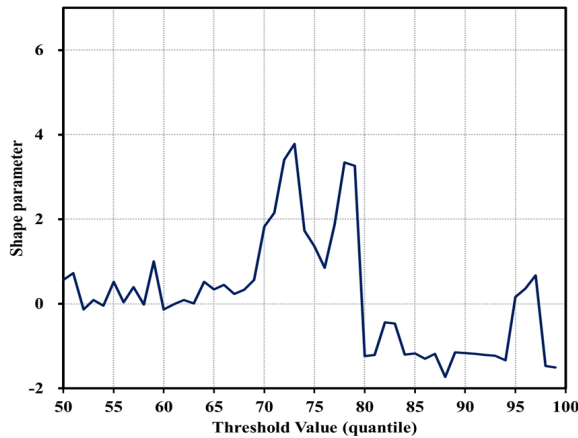


Fig. 3. Shape parameter of generalized pareto for Jodong station

Table 3. Low 10% intervals for the generalized pareto independent test

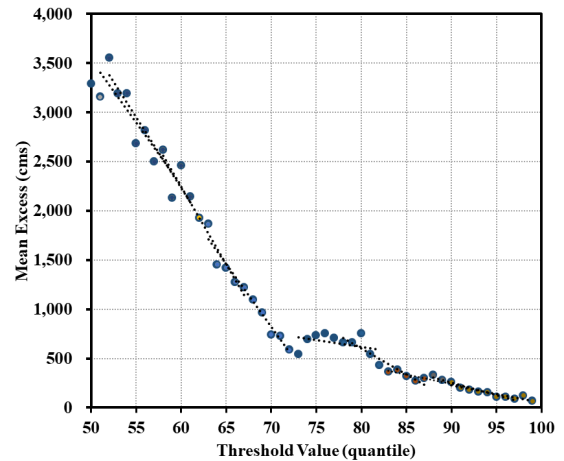
Station	Interval	COV
Yeoju	Q56 ~ Q66	0.3118
	Q76 ~ Q91	0.3283
Pyeongtaek	Q66 ~ Q78	0.2718
Jindong	Q80 ~ Q93	0.2144
Angang	Q85 ~ Q99	0.3477
Jodong	Q87 ~ Q99	0.3467
Gongju	Q50 ~ Q59	0.2252
	Q67 ~ Q77	0.2797
	Q86 ~ Q95	0.3486
Suchon	Q50 ~ Q62	0.1352
Naju	Q50 ~ Q62	0.2500
Gurye	Q50 ~ Q62	0.1935
	Q71 ~ Q80	0.1953
	Q84 ~ Q93	0.2149
Daecheon	Q69 ~ Q90	0.2735
Sintaein	Q86 ~ Q98	0.3675
Yeonsan	Q84 ~ Q95	0.4130

립성 검정 결과와 유사하게 대부분 Q80~Q90 사이가 가장 많이 나타났으며, Q50과 Q60구간 역시 많이 나타났다.

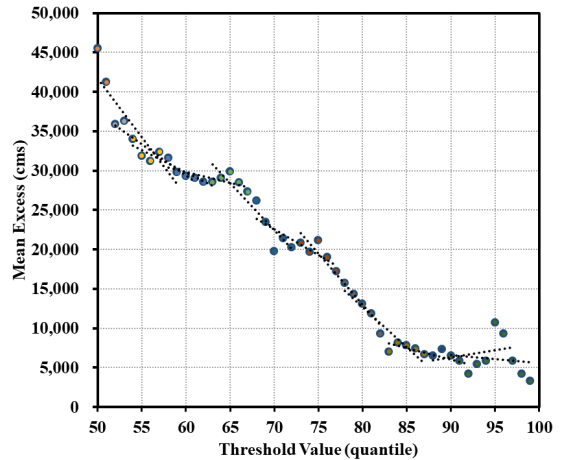
### 3.2 평균 초과도표를 이용한 독립성 검정 결과

평균 초과도표는 가뭄심도가 선형을 나타낸다면 독립이라고 판단할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 평균 초과도표를 작성하였다. X축은 임계수준을 의미하며 Y축은 가뭄 심도를 의미한다.

각 자료에 대하여 여러 개의 선형직선이 존재할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 고려하여 모든 자료에 대해 하나의



(a) Jodong



(b) Gurye

Fig. 4. Mean excess plots for Jodong and Gurye stations

직선으로 회귀분석을 하지 않고 이동구간에 대하여 회귀분석을 하였다(Fig. 4에서 점선으로 표현). 각각의 직선 구간에 대하여 회귀직선을 구하고 R<sup>2</sup>값이 1에 가까운 구간을 독립이라고 판단하였다. R<sup>2</sup> 값이 상위 15%인 구간을 Table 4에 제시하였다.

위와 같은 3가지 독립성 검증 방법에서 모두 공통된 범위로 나타난 임계수준의 구간은 다음과 같다. 여주 Q76~Q84, 평택 Q66~Q70, 진동 Q87~Q91, 안강 Q85~Q99, 조동 Q87~Q99, 구례 Q85~Q87, 신태인 지점이 Q86~Q98로 나타났다. 진동, 안강, 조동, 구례, 신태인 지점에서 공통으로 Q87이 포함되었으며, Q88~Q91 구간 역시 진동, 안강, 조동, 신태인 지점에서 공통된 구간으로 나타났다.

본 연구에서는 각 권역별로 적절한 임계수준을 제시하기 위하여 권역에 해당하는 지역들의 공통범위를 권역별 적정 임계수준 범위로 판단하였으며, 그 결과는 다음과 같다. 한강

권역에서는 여주 Q76~Q84, 평택 Q66~Q70이므로 이 두 지점의 공통범위는 Q70~Q76이다. 낙동강 권역은 진동 Q87~Q91, 안강 Q85~Q99, 조동 Q87~Q99이므로 이들의 공통범위는 Q87~Q91이다. 금강 권역에서는 신태인 지점밖에 없으므로 대표적으로 Q86~Q98 구간을 적절한 임계수준 범위로 판단하였다. 마찬가지로 영산 및 섬진강 권역에서 구례 지점을 대표적으로 Q85~Q87 구간을 적절한 임계수준 범위로 산정하였다.

**Table 4.** Upper 15% intervals for the mean excess plot

Station	Interval	R <sup>2</sup>
Yeosu	Q56 ~ Q70	0.9159
	Q74 ~ Q88	0.8645
Pyeongtaek	Q50 ~ Q70	0.9599
	Q78 ~ Q99	0.9434
Jindong	Q56 ~ Q69	0.9392
Angang	Q54 ~ Q64	0.8825
	Q76 ~ Q99	0.9432
Jodong	Q52 ~ Q74	0.9167
	Q76 ~ Q99	0.8560
Gongju	Q60 ~ Q69	0.8793
Suchon	Q50 ~ Q59	0.8749
Naju	Q87 ~ Q98	0.8580
Gurye	Q52 ~ Q87	0.9221
Daecheon	Q57 ~ Q85	0.9359
Sintaen	Q50 ~ Q60	0.8691
	Q72 ~ Q81	0.8843
	Q83 ~ Q99	0.8771
Yeonsan	Q50 ~ Q64	0.9299

### 3.4 임계수준의 적절성 검토

본 연구에서 결정된 각 권역별 적정 임계수준 범위에서 최솟값과 최대값의 임계수준으로 12개 지점들에서 가뭄사상을 추출하였다. 각 지점에 대하여 가뭄사상의 특성인 최대 지속기간 및 최대 심도를 Tables 5 and 6과 같이 살펴보았다.

각 권역별 최적 임계수준 범위에서 최소 임계수준에 대한 가뭄사상을 추출했을 때, 한강권역과 영산 및 섬진강 권역은 최대 지속기간의 해당년도와 최대 심도의 해당년도는 서로 같게 나타났다. 대표적으로 한강 권역에서 여주 지점의 최대 지속기간은 347일이고 평택 지점의 최대 지속기간은 308일로 나타났지만 이들의 해당년도는 2001년으로 같게 나타났다. 또한 여주 지점의 최대 심도는 955,317 m<sup>3</sup>/s, 평택 지점은 743,276 m<sup>3</sup>/s이고, 이들의 해당년도는 2015년으로 같다. 그러나 낙동강 권역과 금강 권역에서는 서로 상이한 결과가 나타났다. 대표적으로 낙동강 권역의 진동 지점이 최대 지속기간이 343일이며 해당년도는 2001년이고 안강 지점은 최대지속기간 84일, 해당년도는 2008년이다. 조동 지점 역시 최대 지속기간은 59일이고 이에 해당년도는 2005년으로 각각 해당년도가 다르게 나타났다. 진동 지점의 최대심도는 26,1671 m<sup>3</sup>/s로 해당년도 2001년이며, 안강 지점은 4,803 m<sup>3</sup>/s, 2008년으로 해당년도가 다르게 나타났다. 그러나 조동 지점은 최대 심도가 481 m<sup>3</sup>/s이며 해당년도가 2008년으로 안강 지점과 같다.

각 권역별 최대 임계수준에 대한 가뭄사상 추출 결과는 최대 지속기간 중 가장 큰 지점은 영산 및 섬진강 권역의 나주 지점이고 440일이며 최대 심도가 가장 큰 지점은 금강 권역의 공주 지점이며, 904,415 m<sup>3</sup>/s로 나타났다. 이는 최소 임계수준에서의 최대 지속기간 중 가장 큰 지점과 결과와 같으며 최

**Table 5.** Drought events using the minimum thresholds

Basin	Station	Threshold	Max. Duration		Max. Severity	
			Duration (Day)	Year	Severity (m <sup>3</sup> /s)	Year
Han River	Yeosu	Q76	347	2001	955,317	2015
	Pyeongtaek		308	2001	743,276	2015
Nakdong River	Jindong	Q91	343	2001	261,671	2001
	Angang		84	2008	4,803	2008
	Jodong		59	2005	481	2008
Geum River	Gongju	Q98	440	2011	167,275	2011
	Suchon		184	2003	15,237	2003
	Daecheon		126	2006	47,258	2006
	Sintaen		708	2000	42,387	2000
Yeongsan-Seomjin River	Naju	Q87	833	2000	610,490	2000
	Gurye		85	2000	35,486	2000
	Yeonsan		367	2000	58,811	2000

Table 6. Drought events using the maximum thresholds

Basin	Station	Threshold	Max. Duration		Max. Severity	
			Duration (Day)	Year	Severity (m <sup>3</sup> /s)	Year
Han River	Yeosu	Q76	197	2015	757,613	2015
	Pyeongtaek		300	2015	612,191	2015
Nakdong River	Jindong	Q91	336	2001	228,696	2001
	Angang		71	2009	2,191	2008
	Jodong		59	2005	474	2008
Geum River	Gongju	Q98	396	2011	904,415	2011
	Suchon		111	2004	889	2004
	Daecheon		41	2006	7,060	2006
	Sintaein		648	2000	3,349	2000
Yeongsan-Seomjin River	Naju	Q87	440	2011	162,034	2011
	Gurye		184	2003	13,862	2003
	Yeonsan		360	2000	53,950	2000

대심도 중 가장 큰 지점은 한강 권역 여주 지점으로 상이한 결과가 나타났다.

본 연구에서 결정된 최적 임계구간을 기준으로 추출된 가뭄 사상과 실제 과거 가뭄 발생 년과의 비교를 통해 본 연구에서 제시한 연구 결과에 대한 적절성 검토가 가능하다고 판단된다. 따라서 권역별로 지점을 나누어 해당년도와 국가가뭄정보분석센터(<http://www.drought.go.kr/>)에서 제시하는 과거 가뭄사례 등과 비교하여 정확도 분석을 실시하였다.

예측 정확도(Forecast accuracy, FC)는 가뭄발생을 유무로 했을 경우, 실제값이 적중한 경우와 그렇지 못한 경우에 대한 적중의 비율을 의미하며, Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다. FC의 범위는 0과 1 사이이다.

$$FC = \frac{H + Z}{N} \quad (4)$$

여기서,  $N$ 은 전체 개수를 의미하며,  $H$ 는 가뭄 발생에 대한 예측이 적중했을 경우의 적중률을 의미한다.  $Z$ 는 가뭄 미발생의 예측이 적중했을 경우의 적중률을 의미한다.

한강 권역에서 임계수준 Q70일 때 정확도 검토한 결과, 예측과 실제가 모두 가뭄인 사상이 8개가 나왔으며, 가뭄이 아닌 경우가 2개가 나왔다. 따라서 FC = 0.63으로 산정되었다. 낙동강 권역에서는 임계수준 Q87일 때 예측과 실제가 모두 가뭄인 경우가 6개가 나왔으며, 가뭄이 아닌 경우가 2개가 나타났다. 따라서 FC = 0.50로 산정되었다. 금강 권역에서 임계수준 Q86일 때 가뭄일 경우가 9개, 가뭄이 아닌 경우가 2개가 나타났으므로 FC = 0.69로 산정되었다. 마지막으로 영산 및 섬진

강 권역에서 임계수준 Q85일 때 가뭄일 경우가 9개이고 가뭄이 아닌 경우가 3개로 나타났으며, FC = 0.75로 산정되었다. 영산 및 섬진강 권역에서 정확도는 4개의 권역 중 가장 높게 산정된 것이다.

한강권역에서 임계수준 Q76일 때 정확도 검토한 결과, 실제와 예측이 모두 가뭄인 사상이 7개가 나왔으며, 가뭄이 아닌 경우 3개가 나왔다. 따라서 FC = 0.63으로 산정되었다. 낙동강 권역에서는 임계수준 Q91일 때 실제와 예측이 모두 가뭄인 사상이 5개가 나왔으며, 가뭄이 아닌 경우가 3개가 나타났다. 따라서 FC = 0.50로 산정되었다. 금강 권역에서 임계수준 Q98일 때 가뭄일 경우가 7개, 가뭄이 아닌 경우가 3개가 나타났으므로 FC = 0.63으로 산정되었다. 마지막으로 영산 및 섬진강 권역에서 임계수준 Q87일 때 가뭄일 경우가 9개이고 가뭄이 아닌 경우가 2개로 나타났다. 이때의 FC는 0.69로 나타났다. 한강 권역과 낙동강 권역은 최소와 최대 임계수준에 대한 정확도가 모두 0.63과 0.50로 같게 나타났다. 또한 영산 및 섬진강 권역에서 정확도가 0.75와 0.69로 4개의 권역 중 가장 높게 산정되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 우리나라에서 적용가능한 적정 임계수준을 선정하기 위해 일별 유허곡선을 작성하고 Q50~Q99에 대한 가뭄사상을 추출한 후 독립성 검정을 실시하였다. 각 해마다 가뭄사상 개수에 대한 평균값과 분산을 구하고 그에 대한 비율이 '1'에 가까워질수록 독립이라고 하며, 이동구간에 대한



독립성 검증을 수행하였다. 또한, 가뭄 심도에 대하여 일반 파레토 분포로 수렴하는 매개변수가 안정적인 때 독립이라고 판단하며, 이를 위하여 이동구간별 변동계수를 통해 독립성 검증을 실시하였다. 평균 초과도표에서는 선형으로 나타날 때 독립이라고 판단하므로 이동구간별로  $R^2$ 를 활용하여 독립성 검증을 실시하였다.

위와 같은 방법으로 산정된 구간 중 공통되는 구간을 최적의 임계수준이라고 결정하였다. 또한 각 권역별로 적절한 임계수준을 제시하기 위하여 권역에 해당하는 지역들의 공통범위를 권역별 적절한 임계수준 범위로 판단하였다. 그 결과 한강 권역은 Q70~Q76, 낙동강 권역은 Q87~Q91, 금강 권역은 Q86~Q98, 그리고 영산 및 섬진강 권역은 Q85~Q87 구간이 적정 임계수준 범위로 선정되었다.

선행연구들은 대부분 임계수준 Q70~Q90을 많이 사용하지만 본 연구에서 제시한 방법으로 분석을 실시한다면 유역의 특성을 반영하고 객관적으로 선정된 임계수준으로 일관성이 있는 수문학적 가뭄 분석을 할 수 있다고 판단된다. 또한 본 연구의 결과는 향후 갈수관리 시 필요한 기준유량을 설정하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부의 물관리연구사업(79616)과 한국연구재단(NRF-2019R111A1A01059865)의 지원받았습니다.

## References

- Abaurrea, J., and Cebrián, A.C. (2002). "Drought analysis based on a cluster Poisson model: distribution of the most severe drought." *Climate Research*, Vol. 22, No. 3, pp. 227-235.
- Beguería, S. (2005). "Uncertainties in partial duration series modelling of extremes related to the choice of the threshold value." *Journal of Hydrology*, Vol. 303, No. 1-4, pp. 215-230.
- Cunnane, C. (1979). "A note on the Poisson assumption in partial duration series models." *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 2, pp. 489-494.
- Davison, A.C., and Smith, R.L. (1990). "Models for exceedances over high thresholds." *Journal of the Royal Statistical Society, Series B, Statistical Methodology*, Vol. 52, pp. 393-442.
- Ghosh, S., and Resnick, S.I. (2011). "When does the mean excess plot look linear?" *Stochastic Models*, Vol. 27, No. 4, pp. 705-722.
- Hisdal, H., Stahl, K., Tallaksen, L.M., and Demuth, S. (2001). "Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent?" *International Journal of Climatology*, Vol. 21, No. 3, pp. 317-333.
- Karimi, M., and Shahedi, K. (2013). "Hydrological drought analysis of Karkheh river basin in Iran using variable threshold level method." *Current World Environment*, Vol. 8, No. 3, pp. 419-428.
- Kjeldsen, T.R., Lundorf, A., and Rosbjerg, D. (2000). "Use of two component exponential distribution in partial duration modeling of hydrological droughts in Zimbabwean rivers." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 45, No. 2, pp. 285-298.
- Kim, J.E., Yu, J.S., Lee, J.-H., and Kim, T.-W. (2018). "Drought risk analysis in Seoul using Cheugugi and climate change scenario based rainfall data." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 38, No. 3, pp. 387-393.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MLIT) (2011). *Drought record and survey report*.
- Pandey, R.P., Mishra, S.K., Singh, R., and Ramasastri, K.S. (2008). "Streamflow drought severity analysis of Betwa river system (India)." *Water Resources Management*, Vol. 22, No. 8, pp. 1127-1141.
- Querner, E., and Van Lanen, H.A.J. (2010). "Using SIMGRO for drought analysis-as demonstrated for the Taquari Basin, Brazil." *IAHS-AISH Conference, Fez, Morocco*, pp. 111-118.
- Razmkhah, H. (2016). "Preparing stream flow drought severity-duration-frequency curves using threshold level method." *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 9, No. 7, p. 513.
- Smith, A.D., and Katz, R.W. (2013). "US billion-dollar weather and climate disasters: data sources, trends, accuracy and biases." *Natural Hazards*, Vol. 67, pp. 387-410.
- Sung, J.H., and Chung, E.-S. (2014). "Application of streamflow drought index using threshold level method." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 47, No. 5, pp. 491-500.
- Tallaksen, L.M., Madsen, H., and Clausen, B. (1997). "On the definition and modeling of streamflow drought duration and deficit volume." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 42, No. 1, pp. 15-33.
- Van Huijgevoort, M.H.J., Hazenberg, P., Van Lanen, H.A.J., and Uijlenhoet, R. (2012). "A generic method for hydrological drought identification across different climate regions." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 16, No. 8, pp. 2437-2451.
- Woo, M.-K., and Tarhule, A. (1994). "Streamflow droughts of Northern Nigerian rivers." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 39, No. 1, pp. 19-34.
- Yu, J.S. (2019). *Development of the drought risk assessment framework for nonstationary modeling under changing climate*. Ph. D. dissertation, Hanyang University, pp. 11-108.
- Yu, J.S., Shin, J.Y., Kown, M.S., and Kim, T.-W. (2017). "Bivariate drought frequency analysis to evaluate water supply capacity of multi-purpose dams." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 37, No. 1, pp. 231-238.
- Yu, J.S., Yoo, J.Y., Lee, J.-H., and Kim, T.-W. (2016). "Estimation of drought risk through the bivariate drought frequency analysis using copula functions." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 49, No. 3, pp. 217-225.