

임계수준 방법을 이용한 하천수 가뭄지수의 적용

Application of Streamflow Drought Index using Threshold Level Method

성 장 현* / 정 은 성**

Jang Hyun Sung / Eun-Sung Chung

Abstract

To estimate the severity of streamflow drought, this study introduced the concept of streamflow drought index based on threshold level method and Seomjingang Dam inflow was applied. Threshold levels used in this study are fixed, monthly and daily threshold, The 1st~3rd analysis results of annual drought, the severe hydrological droughts were occurred in 1984, 1988 and 1995 and the drought lasted for a long time. Annual compared to extreme values of total water deficit and duration, the drought occurred in 1984, 1988, 1995 and 2001 was serious level. In the results of study, because a fixed threshold level is not reflect seasonal variability, at least the threshold under seasonal level was required. Threshold levels determined by the monthly and daily were appropriate. The proposed methodology in this study can be used to forecast low-flow and determine reservoirs capacity.

Keywords : threshold level method, streamflow drought index, water deficit, duration

요 지

하천수 가뭄을 평가하기 위하여 임계수준 방법을 이용한 하천수 가뭄지수 (streamflow drought index)를 소개하고 섬진강댐의 유입량을 대상으로 적용하였다. 사용한 임계수준은 고정, 월별 및 일별로써 연도별 가뭄의 1~3순위 분석결과, 1984년, 1988년과 1995년이 수문학적 가뭄의 크기도 컸고 오랫동안 지속되었다. 총 물 부족량과 지속기간의 극한값을 연도별로 비교해 본 바, 1984년, 1988년, 1995년과 2001년에 발생하였던 사상이 심각한 수준이었다. 또한 고정 임계수준은 계절 변동성을 반영하지 못하는 단점이 있어서 최소한 계절 이하의 임계수준 사용이 요구되었지만 월별과 일별로 정해진 임계수준은 적절한 것으로 판단되었다. 본 연구에서 제안한 방법론은 갈수예보 및 저수지 용량결정에 활용될 수 있겠다.

핵심용어 : 임계수준 방법, 하천수 가뭄지수, 물 부족량, 지속기간

1. 서 론

일반적으로 가뭄(drought)은 기상학적, 농업적, 수문학적 및 사회·경제학적 가뭄으로 구분된다(Dracup et al., 1980). 기상학적 가뭄은 강수량의 부족, 농업적 가뭄은 농

작물, 산림과 초지 등의 생장에 필요한 토양수분량의 부족을 의미한다. 수문학적 가뭄(hydrological drought)은 하천수, 지하수, 저수지와 호소를 포함하는 수문 순환에서 가용한 물 부족으로 정의되는데(Lorenzo-Lacruz et al., 2013), 이 중에서도 하천수 가뭄(streamflow drought)과 같은 갈

* 국토교통부 영산강홍수통제소 예보통제과 시설연구사 (e-mail: jhsung1@korea.kr)

Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Yeongsan River Flood Control Office, Gwangju, Korea

** 교신저자, 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 조교수 (e-mail: eschung@seoultech.ac.kr, Tel: 82-2-970-9017)

Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Seoul 139-743, Korea

수(low flow)는 수문학적 가뭄 중에서도 중요한 목적 변수로써 관개(irrigation), 수변 생태계(riparian ecosystems)와 공공급수(public water supply) 등에 절대적으로 영향을 미쳐서 선행 연구에서는 상대적으로 적은 유량, 즉 갈수 일 때 발생하는 하천수 가뭄에 주목하고 있다(Tallaksen et al., 2009). 이미 갈수의 중요성을 인지하여 선행 연구들에서도 다양한 갈수 지표(low flow index)들을 이용하여 갈수의 시작과 종료시점을 구분하고, 그 크기를 계산하여 갈수를 평가하고 대응하고 있다(Dracup et al., 1980; Tate and Gustard, 2000; Smakhtin, 2001; Heim2002; Tallaksen and van Lanen, 2004).

대표적으로 Yevjevich (1967)는 연속이론을 이용하여 가뭄을 정의하고 가뭄의 특성(가뭄의 지속기간, 심도와 간격)을 구분하는 방법을 제안하였다. Stahl (2001)에 의해 제안된 Regional Deficiency Index (RDI)는 일 유량자료와 가뭄에 대한 유량자료의 계절성(seasonality)을 제거하여 계산한다. 하지만 RDI는 가뭄의 심도(severity)와 지속기간을 구체적으로 규정할 수 없다는 단점이 있다. Keyantash and Dracup (2002)은 다양한 기후에 적용이 가능한 Aggregate Drought Index (ADI)를 제안하였는데, ADI는 사회·경제적 가뭄을 제외한 각각의 가뭄 유형에 관련된 변수를 종합적으로 이용하여 기상, 농업 및 수문학적 가뭄을 복합적으로 고려할 수 있다는 장점이 있지만 높은 데이터 요구 사항 등으로 인하여 다소 비효율적인 면이 있다.

가뭄은 물수지의 정상상태보다 물이 상당히 낮게 지속되는 경우를 의미한다. 평균보다 상당히 낮다는 개념을 임계수준의 관점에서 본다면 가뭄의 구분과 해석이 매우 간단해진다. 임계수준을 이용하여 가뭄을 구분하는 연구로 국내에서는 Yoo et al. (2013)이 강수 시계열에 대한 각 연도의 월별 가뭄 절단수준을 결정하여 기상학적 가뭄을 분석하였다. Kim et al. (2012)은 물수지 측면에서 강수(공급)와 증발산(수요)을 고려하였는데 여기서는 증발산량이 임계수준으로 사용되어 기상학적 가뭄을 분석하였다. Yevjevich (1967)가 제안한 이후로 임계수준을 이용하여 가뭄을 분석하는 연구가 진행되어져 왔지만 주로 기상학적 가뭄지수를 대상으로 이루어져 왔다.

갈수는 일시적인 부족과 더불어 지속기간에 대한 총 부족량도 매우 중요하다는 점에 근거하여 Pandey et al. (2008)은 임계수준(threshold level)을 기준으로 수문학적 가뭄을 평가하는 방법을 제안하였는데 수문학적 가뭄을 나타내는 특성으로 부족에 대한 지속기간, 총 부족량, 하천수 가뭄심도(streamflow drought severity)로 구분하였다. 이 방법은 관측유량만을 이용하여도 하천수 부족 지

속기간, 하천수 부족량이 직관적으로 쉽게 계산할 수 있다는 장점이 있어서 본 연구에서는 이러한 개념을 바탕으로 수문학적 가뭄을 분석하였다. 이 연구에서 이용된 수문학적 가뭄 특성인자는 총 물 부족량, 지속기간과 규모이다. 2장에서는 연구에 사용한 자료와 방법론을 소개하였고, 3장에서는 물 부족량과 지속기간에 관한 연구 결과를, 4장에서는 요약 및 결론을 제시하였다.

2. 이론적 배경

2.1 임계수준 방법

임계수준 방법(threshold level method)은 수문학적 가뭄의 시작과 끝을 명확하게 구분할 수 있어 가뭄을 정의하는데 유용하다. 우선 임계수준(threshold level, Q_0)을 결정하고 임계수준 이하의 유량을 가뭄으로 정의하기 위해, Fig. 1과 같은 방법을 이용한다. 유량 시계열에서 임계수준 아래로 떨어질 때 가뭄이 시작되며 유량이 다시 임계수준 이상으로 회복하게 되면 가뭄이 종료된다. 위와 같이 가뭄을 구분하면 각 가뭄사상에 대한 지속기간(run-length, d), 총 물 부족량(run-sum, v)과 각 가뭄사상에 대한 규모(magnitude, 총 물 부족량/지속기간)를 구할 수 있다.

2.2 임계수준 구분

임계수준을 정하는 대표적인 방법으로는 유황곡선(flow duration curve)을 이용하는 것인데, 유황곡선으로부터 분위수(percentile)에 따른 초과(exceedance)유량을 계산하여 임계수준을 결정한다. 연단위로 일정한 임계수준이 사용될 수 있으며 Fig. 2(a)는 홍수기와 이수기를 구분하여 고정 임계값을 사용한 경우이며, 이때에는 각각의 계절 유량자료를 이용하여 임계수준을 결정하게 된다.

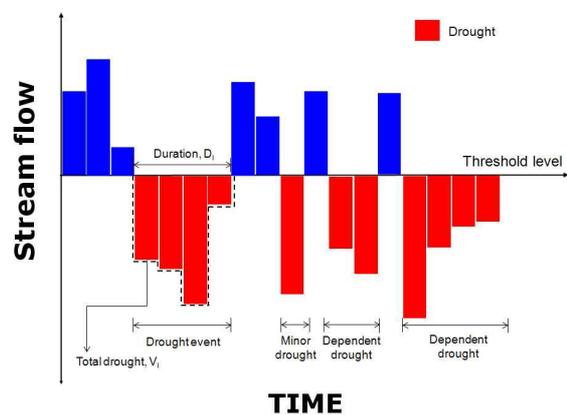


Fig. 1. Definition of Water Deficit Characteristics

반면 월별(monthly) 또는 일별(daily) 임계수준은 Fig. 2(b), (c)와 같이 월별 또는 일별 단위로 변화하는 홍수기 및 이수기 동안의 하천 유량 편차(deviation)를 찾아내는데 유용하다. 예를 들어, 홍수기 동안의 평균(normal) 보다 적은 유량은 홍수기 이후 발생하는 가뭄에 중요한 영향을 미친다. 그러나 홍수기 동안의 상대적인 갈수 및 홍수기시 유량은 적었으나 용설(snow melting)로 인하여 뒤 늦게 홍수가 발생하였다 하더라도 해당 홍수기는 가뭄이라 볼 수 없다. 그러므로 월별 또는 일별 임계수준으로 구분된 사상(event)들은 하천 가뭄 보다는 하천 유량의 부족량 또는 아노말리(anomalies)라는 표현이 더 적합하다 (Tallaksen and van Lanen, 2004). 따라서 월별 또는 일별 임계수준은 '정상적인(normal)' 기간 또는 하천유량 부족량의 기간을 구분하는데 유용하다. 일별 임계수준은 365일 유행곡선의 초과확률(exceedance probability)로써 계산되고, 일자료를 이용하여 초과확률을 계산할 때, 관측자료의 길이가 짧다면 가용할 수 있는 정보의 한계로 오류의 위험이 있기 때문에 표본 자료의 범위를 넓히고 임계수준을 유

연하게 할 필요가 있다. 일 초과확률은 n-day window 동안에 발생 한 모든 유량으로부터 계산되고 31-day를 적용하였을 때 6월 1일의 초과 유량은 매년 5월 17일부터 6월 16일 사이의 유출량으로부터 계산된다.

N년 동안의 일 유량자료를 이용하여 정해진 연도의 해당 일에 대한 초과 유량값은 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$QE_d = \frac{((nN+1)-i_d) \cdot 100\%}{nN} \quad (1)$$

여기서, QE_d 는 해당 날에 대한 초과유량이며, n 은 일(day) 수이며, N 은 기록년수, i_d 는 해당 일에 측정된 유량의 오름차순 순위이다. 각각의 방법을 이용한 임계값 산출 방법은 Fig. 3과 같다. 일별 임계수준은 해당 연도의 각 일에 대한 유량자료를 이용하여 구한다.

2.3 시간 해상도

수문학적 가뭄을 분석할 때에 연별, 월별 또는 일별로 유량자료를 이용하는 기준은 수문학적 유량패턴에 따라

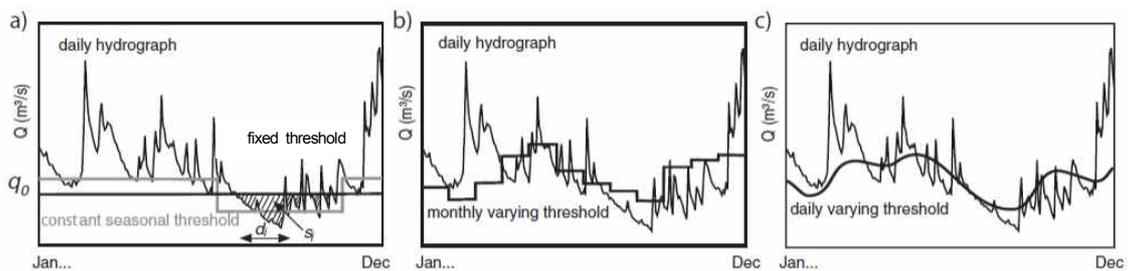


Fig. 2. Illustration of Threshold Levels; Fixed Threshold (a), Monthly Varying Threshold (b), Daily Varying Threshold (c) (modified from Stahl, 2001)

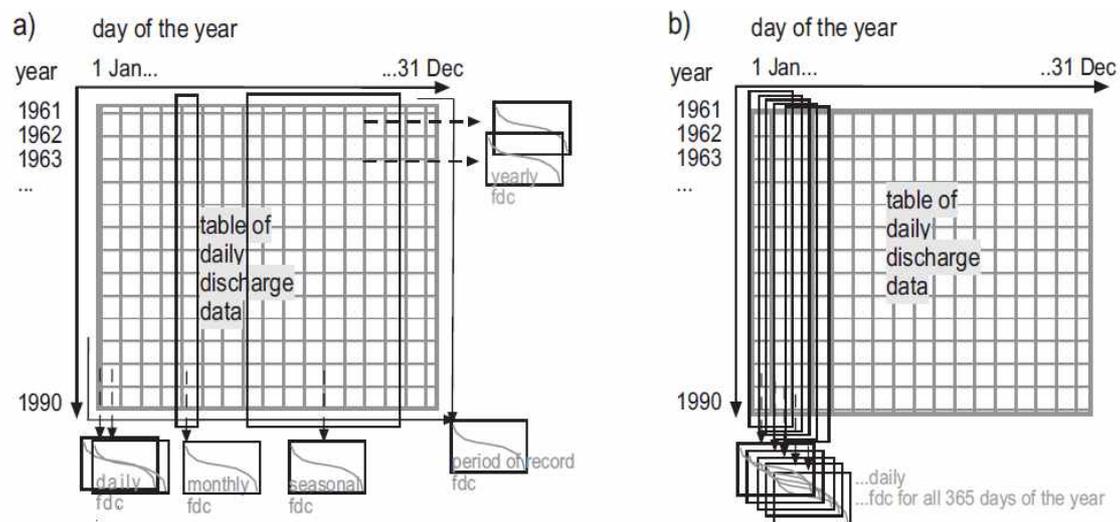


Fig. 3. Scheme for Determination of Different Flow Duration Curves for the Threshold Level Definitions; Calendar Units (day, month, season) (a), Moving Window (daily) (b) (modified from Stahl, 2001)

달라진다. 계절 가뭄(seasonal drought)과 월별로 풍부한 유량을 포함할 수 있는 온대(temperate zone)지역에서 연별 자료를 이용하여 가뭄을 분석한다면 심각한 가뭄은 확인되지 않는다. 반대로 건조한 지역에서는 다년간 지속될 수 있는 가뭄을 겪을 가능성이 더 커서, 월별 또는 연별 등의 자료를 써도 무방하다. 따라서 각기 다른 시간 분해능에 따라 가뭄사상의 구분이 달라져 상이한 결과를 보일 수 있으므로 해당지역의 수문학적 특성을 고려하여 이에 맞는 적정 해상도의 자료가 요구된다.

Yevjevich (1976)가 소개한 임계수준 방법은 1개월 또는 그 이상의 기간을 기준으로 한다. 또한 일 자료로 임계수준 방법을 적용한 사례도 많고(Hisdal et al., 2001; Kjeldsen et al., 2000; Tallakesn et al., 1997; Woo and Tarhule, 1994; Zelenhasic and Salvai, 1987), 이러한 선행연구에서는 일 자료를 사용하여 연단위 이하 가뭄의 추계학적 해석이 가능함을 밝혔다. 선행사례로부터 일자료의 사용은 우기와 건기가 반복되는 우리나라에 적합하다고 판단되나 일자료 사용은 가뭄들 간의 종속성(dependency)과 작은(minor) 가뭄에 대한 문제점을 갖고 있다(Fig. 1). 예를 들어, 건기(dry period)동안 큰 가뭄 사이에 일시적으로 임계수준을 초과하는 값이 있어 가뭄이 구분되어도 각각의 가뭄들은 상호독립이 아니다. 이러한 문제는 빈도해석시 독립성의 가정을 훼손할 수 있기 때문에 적절한 풀링(pooling)이 필요하게 된다. 즉 풀링을 이용하여 가뭄사상을 구분할 수 있는 일관성 있는 정의가 요구된다. Tallaksen et al. (1997)은 이를 위하여 3개의 풀링 방법을 비교 및 설명하였다(Moving Average: MA, Sequent Peak Algorithm: SPA, Inter-event time and volume Criterion: IC). 본 연구에서는 MA를 이동평균 필터로 적용하였고 10일 이동평균을 사용하였다.

2.4 대상유역

섬진강 유역은 우리나라 남서쪽에 위치하고 있으며, 요천과 보성강 유역을 포함하고 있다. 유역면적은 약 4,911.9km², 총 연장은 약 212.3km, 고도 분포는 0~1,646m이다(Fig. 4).

우리나라 기후는 계절 변동성이 커서 겨울철(12~2월)에는 시베리아 기단(siberian airmass)의 영향을 받아 춥고 건조한 반면 여름철(6~8월)에는 동아시아 몬순(monsoon)의 영향으로 덥고 습하여 집중호우의 발생빈도도 잦은 편이다. 1975년부터 2012년까지의 강수를 분석한 결과, 유역 내 북쪽의 연평균 강수량은 1,350mm⁻¹, 남동쪽은 1,600mm⁻¹로 적은 편은 아니나 연강수의 57%가 여름철에 집중되는 등 계절 변동성이 크다(Fig. 5). 따라서 섬진강

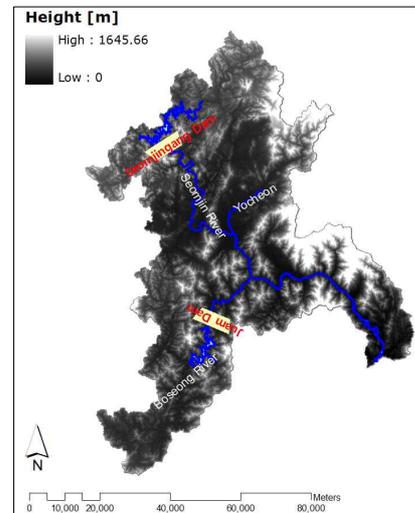


Fig. 4. Location of the Selected River Basin, Including Elevation And River

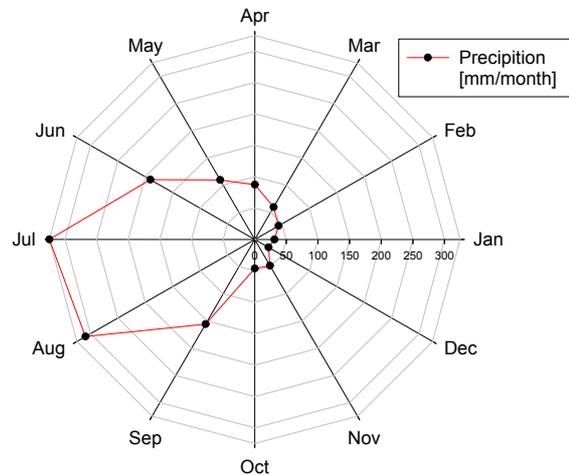


Fig. 5. Monthly Variation of Precipitation

유역은 우기에는 홍수발생의 위험에, 건기에는 하천유량의 정상적인 기간에 대비한 아노말리 중, 과소 아노말리를 보이고 있어서 수문학적 가뭄 분석을 위한 적지이다. 사용된 자료는 1975년부터 2012년까지의 섬진강댐 유입량이다.

3. 적용결과

3.1 임계수준

임계수준은 물 부족의 유형에 따라 여러 가지로 정해지는데 하천 유지유량, 평균유량 또는 특정 유황 등 정확하게 정의된 유량으로 나타낼 수 있다. 특정 유황은 대상유역의 실제 유황에 따라 달라질 수 있다. 항상 물이 흐르는 강의

경우, Woo and Tarhule (1994)은 $Q_{70} \sim Q_{90}$ 을 적정 임계수준으로 제안하였는데 간헐하천(intermittent stream)의 경우 Q_{70} 도 0이 될 수 있어서 Q_{70} 보다 작은 값들이 사용되고 있음을 밝혔다. 특히, 유럽 전역을 대상으로 한 가뭄의 심각성과 빈도 연구에서는 가뭄이 발생하는 않는 해의 문제를 최소화하기 위하여 Q_{70} 이 임계수준으로 선택되었다 (Woo and Tarhule, 1994; Hisdal, H., and Tallaksen, 2000; Querner, E., and van Lanen, H., 2010). 따라서 본 연구에서도 Q_{70} 을 기준으로 하였으며 Fig. 3과 같은 방법으로 임계수준을 정하였고(Fig. 6), 월별로 환산한 값은 Table 1과 같다. 각각의 방법으로 산정한 임계수준을 보면 고정 임계수준은 1년 내내 변동(variation)이 없었고 다른 수준들에 비하여 작은 수준이었다. 따라서 고정 임계수준을 사용할 때에 가장 적은 물 부족량이 예상되었다. 월별, 일별 임계수준에서는 관측자료의 변동성이 잘 나타나고 있

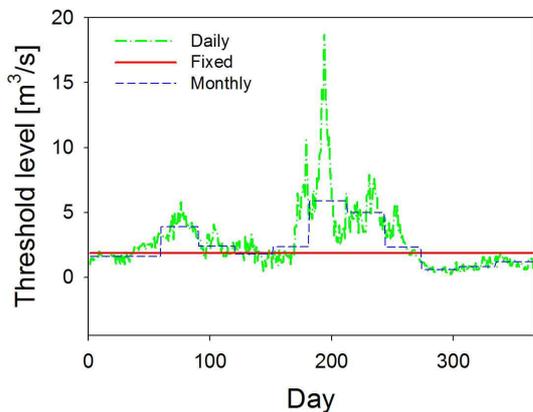


Fig. 6. Threshold Levels Calculated by 3 Methods

Table 1. Monthly Averaged of Four Threshold Levels

| Month | Threshold level [m^3/s] | | |
|-------|-----------------------------|---------|---------|
| | Fixed | Monthly | Daily |
| 1 | 26.000 | 22.100 | 22.874 |
| 2 | 26.000 | 33.900 | 133.259 |
| 3 | 26.000 | 328.100 | 303.861 |
| 4 | 26.000 | 121.700 | 143.313 |
| 5 | 26.000 | 25.000 | 80.565 |
| 6 | 26.000 | 27.000 | 82.090 |
| 7 | 26.000 | 253.200 | 256.342 |
| 8 | 26.000 | 207.300 | 224.723 |
| 9 | 26.000 | 203.500 | 218.790 |
| 10 | 26.000 | 8.000 | 10.539 |
| 11 | 26.000 | 9.000 | 11.080 |
| 12 | 26.000 | 18.000 | 17.094 |

었다. 즉 월별, 일별로 계산된 임계수준은 가을철부터 겨울철까지는 작았고 봄철의 시작인 3월에는 커지고, 이후로 작아지다가 여름이 시작되는 6월부터 증가되어 7월에 가장 큰 수준이었다.

3.2 연 단위 분석

이 연구에서는 사용된 가뭄지표는 총 물 부족량, 지속기간, 규모(물 부족량/지속기간)로, Fig. 7은 계산된 연도별(yearly) 총 물 부족량(Fig. 7(a)), 연도별 총 부족기간(Fig. 7(b)), 그리고 연도별 평균규모(Fig. 7(c))를 보여주고 있다. 총 물 부족량은 고정 임계수준에서는 1988년, 1995년과 1984년 순서로 많았으며, 월별 임계수준에서는 2001년, 1984년과 1982년 순이었고, 일별 임계수준에서는 1984년, 2001년과 1982년 순이었다(Fig. 7(a)). 물 부족 지속기간은 고정 임계수준의 사용시 1988년이 가장 길었으며, 2순위는 2008년, 3순위 1995년 순이었고, 월별과 일별 임계수준은 1984년, 1995년, 1988년 순이었다(Fig. 7(b)). 연도별 평균규모를 비교해보면 고정 임계수준에서는 1990년, 1987년과 1989년 순이었고, 월별 임계수준에서는 2011년, 1998년과 2006년 순, 일별 임계수준에서 1975년, 1996년과 1986년 순으로 규모가 강하게 확인되었다(Fig. 7(c)).

3.3 극한사상 분석

앞에서는 연 단위로 각각 지표들의 변화를 알아보았고, 이어서 극한값들의 변화를 알아보았다(Fig. 8). Fig. 8(a)은 연 최대 총 물 부족량, Fig. 8(b)는 연 최대 부족기간, 그리고 Fig. 8(c)는 연 최대 평균규모이다.

연 최대 총 물 부족량은 고정 임계수준에서 1988년(시작: 1988-9-29), 1995년(1995-11-5)과 1984년(1984-1-14) 사상 순서로 많았으며, 월별 임계수준에서는 2001년(2001-8-19), 1984년(1984-1-14)과 1995년(1995-7-1) 순이었고, 일별 임계수준에서는 1984년(1984-1-14), 2001년(2001-8-18)과 1995년(1995-6-26) 순이었다(Fig. 8(a)). 물 부족 지속기간은 고정 임계수준의 사용시 1988년(1988-9-29)이 가장 길었으며, 2순위는 1995년(1995-11-5), 3순위 1984년(1984-1-14) 순이었고, 월별 임계수준에서는 1984년(1984-1-14), 1995년(1995-11-5), 2001년(2001-8-19) 순이었고, 일별 임계수준에서는 1984년(1984-1-14), 1995년(1995-11-22)과 1987년(1987-9-27) 순이었다(Fig. 8(b)). 연 최대 평균규모를 비교해보면 고정 임계수준에서는 1990년(시작: 1990-10-11), 1989년(1989-10-11)과 1981년(1981-5-29) 순이었고, 월별 임계수준에서는 1982년(1982-3-1), 1994년(1994-7-17)과 1995년(1995-7-1) 순,

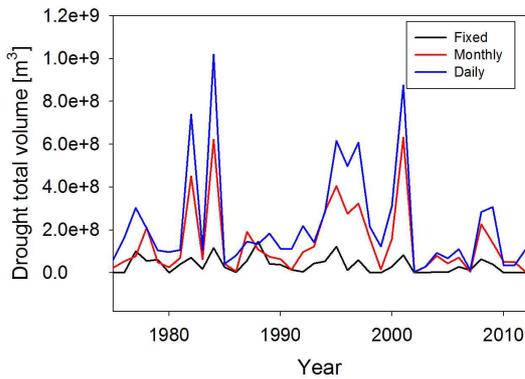
일별 임계수준에서 1977년(1977-2-9), 1982년(1982-2-11)과 1999년(1999-5-18) 순으로 규모가 강하게 확인되었다(Fig. 8(c)).

3.4 결과정리

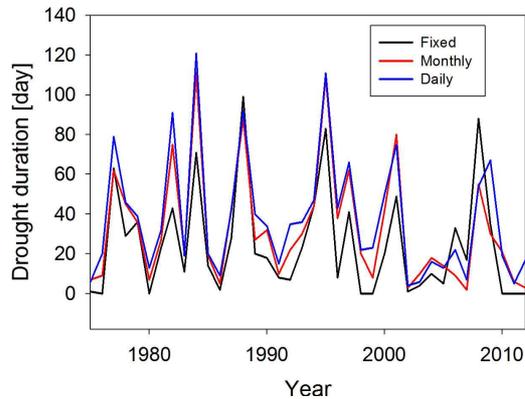
가뭄이 심각하였던 연도를 임계수준을 기준으로 Table 2와 같이 정리하였다. 연도별 총 물 부족량이 가장 많았던 시기는 1988년(고정 임계수준), 2001년(월별)과 1984(일

별)이었고 총 부족기간이 길었던 시기는 1988년(고정 임계수준), 1984(월별 및 일별)이었다. 연도별 평균규모는 1990년(고정 임계수준), 2011년(월별)과 1975년(일별)이 컸었다. 평균규모는 수문학적 가뭄의 강도로 각각의 임계수준 결과를 보면 비교적 지속기간이 짧았던 시기에 큰 규모가 감지되었고, 이는 이 시기에 발생하였던 물 부족이 일시적이지만 비교적 심했음을 의미한다.

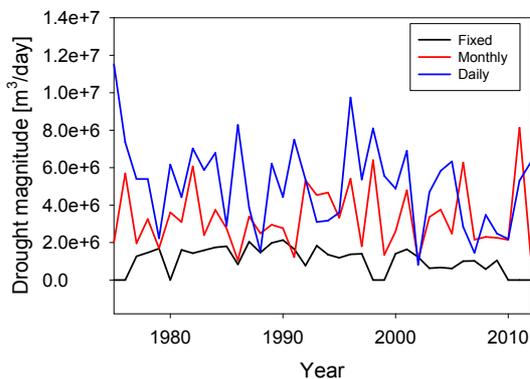
물 부족 지표 중 최상위 사상들을 임계수준에 따라



(a) Annual total water deficits

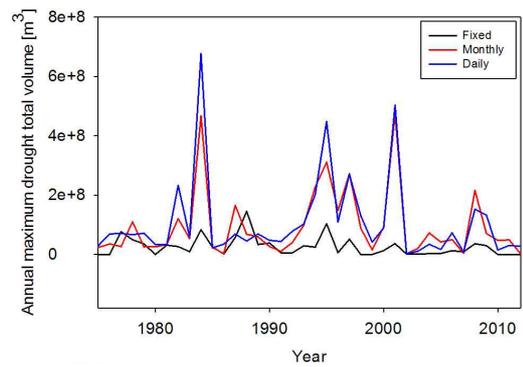


(b) Annual durations

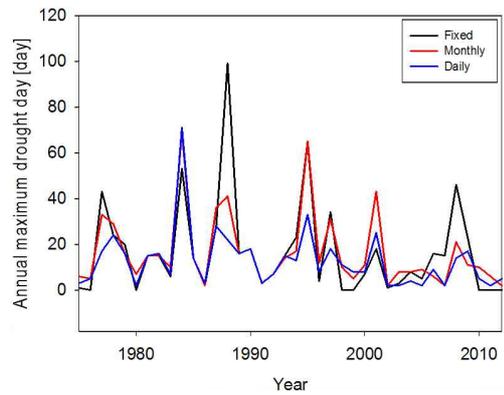


(c) Annual water deficit magnitude

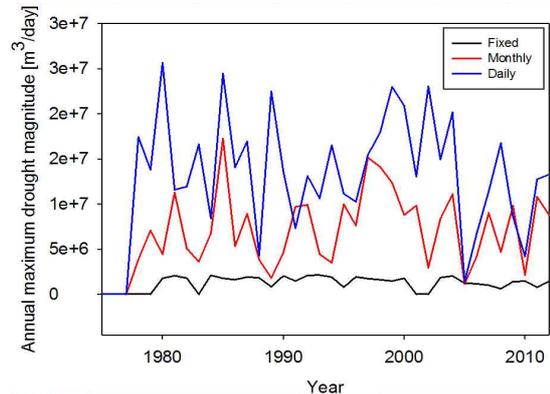
Fig. 7. Results Analyzed by Year



(a) Annual maximum total water deficits



(b) Annual maximum durations



(c) Annual maximum water deficit magnitude

Fig. 8. Results Analyzed by Extreme Event

정리하였다(Table 3). 최상위 총 물 부족량의 발생년도는 1988년(고정 임계수준), 2001년(월별)과 1984년(일별)에, 최상위 물 부족 지속기간의 발생년도는 1988년(고정 임계수준), 1984년(월별)과 1984년(일별)에 확인되었다. 최상위 평균규모의 발생년도는 1990년(고정 임계수준), 1982년(월별)과 1977년(일별)에 확인되었다. Table 3과 같이 고정 임계수준은 다른 임계수준에 비하여 작은 수준으로 전반적인 물 부족량은 적은 편이나 10월부터는 1월까지 다른 임계수준 보다 커서 비홍수기시 1개 사상의 부족기간이 긴 편이다. Tables 2 and 3의 결과를 보면 최상위 사상이 발생하였던 해가 연도별 총 부족량이 많았고, 부족량에 대한 지속기간도 길었다. 이는 극한사상이 그 해의 수문학적 가뭄의 크기와 지속기간에 절대적으로 영향을 미쳤으며, 이 때에 발생한 가뭄사상이 심각한 수준이었음

을 의미한다.

수문학적 가뭄은 기상학적 가뭄과 다르게 즉각적인 인식이 어렵고, 평균규모는 지속기간이 짧아 가뭄의 심각성에 대한 체감정도가 적으므로 가뭄지표 중 평균규모를 제외한 총량과 지속기간 측면에서 가뭄을 좀 더 자세히 정리하였다(Table 4). 연 단위의 분석결과, 고정 임계수준에서 총 물 부족량이 많았던 해는 1988년, 1995년과 1984년이었고 월별 및 일별 임계수준에서는 2001년, 1984년과 1982년의 물 부족량이 다른 해에 비하여 많은 편이었다. 크기와 함께 가장 중요한 변수 중의 하나인 지속기간은 고정 임계수준의 사용시 1988년, 2008년, 1995년의 순서로 긴 편이었고, 월별과 일별 임계수준은 1984년, 1995년, 1988년 순이었다. 이로부터 1984년, 1988년과 1995년이 수문학적 가뭄의 크기도 컸었고, 오랫동안 지속되었던 물

Table 2. Annual Drought to Total Volume, Duration, and Magnitude from Threshold Approach

| Index | Method | Total volume [m ³] | Duration [day] | Drought magnitude [m ³ /day] | Year |
|----------------------|---------|--------------------------------|----------------|---|------|
| Drought total volume | Fixed | 145,186,560 | 99 | 1,466,531 | 1988 |
| | Monthly | 631,048,320 | 80 | 4,790,556 | 2001 |
| | Daily | 1,019,934,720 | 121 | 6,790,797 | 1984 |
| Duration | Fixed | 145,186,560 | 99 | 1,466,531 | 1988 |
| | Monthly | 622,537,920 | 111 | 3,743,195 | 1984 |
| | Daily | 1,019,934,720 | 121 | 6,790,797 | 1984 |
| Drought magnitude | Fixed | 38,335,680 | 18 | 2,129,760 | 1990 |
| | Monthly | 48,824,640 | 6 | 8,137,440 | 2011 |
| | Daily | 61,534,080 | 6 | 11,521,440 | 1975 |

Table 3. Top Largest Drought Events to Total Volume, Duration, and Magnitude from Threshold Approach

| Index | Method | Total volume [m ³] | Duration [day] | Drought magnitude [m ³ /day] | Start |
|----------------------|---------|--------------------------------|----------------|---|------------|
| Drought total volume | Fixed | 145,186,560 | 99 | 1,466,531 | 1988-9-29 |
| | Monthly | 476,357,760 | 43 | 11,078,087 | 2001-8-19 |
| | Daily | 676,883,520 | 71 | 9,533,571 | 1984-1-14 |
| Duration | Fixed | 145,186,560 | 99 | 1,466,531 | 1988-9-29 |
| | Monthly | 467,112,960 | 69 | 6,769,753 | 1984-1-14 |
| | Daily | 676,883,520 | 71 | 9,533,571 | 1984-1-14 |
| Drought magnitude | Fixed | 38,335,680 | 18 | 2,129,760 | 1990-10-11 |
| | Monthly | 120,787,200 | 7 | 17,255,314 | 1982-3-1 |
| | Daily | 25,634,880 | 1 | 25,634,880 | 1977-2-9 |

Table 4. Summary of Drought Order in Terms of the Total Volume and Duration

| Category | Index | Rank | Method | | |
|----------------|----------------------|-----------------|--------|---------|-------|
| | | | Fixed | Monthly | Daily |
| Annual result | Drought total volume | 1 st | 1988 | 2001 | 2001 |
| | | 2 nd | 1995 | 1984 | 1984 |
| | | 3 th | 1984 | 1982 | 1982 |
| | Duration | 1 st | 1988 | 1984 | 1984 |
| | | 2 nd | 2008 | 1995 | 1995 |
| | | 3 th | 1995 | 1988 | 1988 |
| Extreme result | Drought total volume | 1 st | 1988 | 2001 | 1984 |
| | | 2 nd | 1995 | 1984 | 2001 |
| | | 3 th | 1984 | 1995 | 1995 |
| | Duration | 1 st | 1988 | 1988 | 1984 |
| | | 2 nd | 1995 | 1995 | 1995 |
| | | 3 th | 1984 | 2001 | 1987 |

부족기간이었음을 확인하였다. 극한사상은 한 번의 발생으로도 인명 피해나 재산 손실에 막대한 영향을 미칠 수 있어 물 부족을 극한의 개념에서도 보았다. 연 최대 물 부족량은 고정 임계수준에서 1988년, 1995년과 1984년 사상, 월별 임계수준에서는 2001년, 1984년과 1995년 사상, 일별 임계수준에서는 1984년, 2001년과 1995년 발생하였던 사상들이 대표적이었다. 연 최대 물 부족 지속기간은 고정 임계수준의 사용시 1988년, 1995년과 1984년 사상, 월별 임계수준에서는 1988년, 1995년과 2001년 사상, 일별 임계수준에서는 1984년, 1995년과 1987년 사상이 길었다. 이로 부터 1984년, 1988년, 1995년과 2001년에 발생하였던 가뭄이 심각한 수준의 극한사상이었음을 확인하였다. 섬진강 유역의 강수가 적었던 시기는 1977년, 1988년, 1994~1995년으로 앞서 분석한 결과와 비교적 일치하였으나 조금은 다른 결과를 나타냈다.

4. 결론 및 향후연구

이 연구에서는 수문학적 가뭄을 평가하기 위하여 임계수준 방법을 소개하고 섬진강댐 유입량을 대상으로 적용하였다. 임계수준은 유허곡선을 이용하여 고정, 월별 및 일별 임계수준으로 결정하였고, 결정된 임계수준으로부터 물 부족 특성인자(총 물 부족량, 지속기간, 평균규모)를 분석하였다.

가뭄이 심각하였던 연도와 최상위 사상을 분석한 결과,

평균규모 외 물 부족량과 지속기간에 대하여 극한사상이 발생하였던 해에 다른 연도보다 심각한 수준의 가뭄이 오랜기간 지속되었음을 확인하였다. 이는 극한사상이 그 해의 수문학적 가뭄의 크기와 지속기간에 절대적으로 영향을 미치고 있음을 의미한다. 연도별 가뭄의 1~3순위 분석결과, 1984년, 1988년과 1995년이 수문학적 가뭄의 크기도 컸고 오랫동안 지속되었다. 총 물 부족량과 지속기간의 극한값을 연도별로 비교해 본 바, 1984년, 1988년, 1995년과 2001년에 발생하였던 사상이 심각한 수준이었다.

Lee (2014)는 증발산량을 고려한 가뭄지수인 SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index; 표준강수 증발산지수)를 이용하여 섬진강 유역의 역대 가뭄사상을 재현하였다. SPEI는 수문학적 가뭄을 추정하는 직접적인 방법은 아니지만 가뭄을 구분하는데 있어 증발산량이 포함되어 있어서 수문학적인 가뭄에 대한 모사정도를 간접적으로 확인할 수 있다. 지속기간 6개월의 SPEI 적용 결과 기상학적 가뭄이 극심하였던 때는 1994년, 1995년, 1988년, 2009년, 1977년이였다. 본 연구의 수문학적 가뭄이 발생하였던 시기를 비교해보면 비교적 일치하였으나 조금은 다른 결과를 나타냈다. 수문학적 가뭄은 일반적으로 기상학적 가뭄에 비하여 시간적 지체를 가지고 있어 정확한 비교는 어렵지만 발생시기가 일부만 일치한 점으로 볼 때, 수문학적 가뭄해석에 있어서 기상학적 가뭄지수를 이용하기에는 다소의 한계가 있으며, 가뭄을 표현하는 여러 변수 중 유량관련 변수가 반드시 요구되겠다.

월별, 일별 임계수준을 이용한 연 단위 분석과 극한사상 분석 결과는 고정 임계수준을 사용한 결과와 유사하였다. 이는 월별 및 일별로 결정된 임계수준의 계절 경향성이 유사하기 때문이다. 즉 두 개의 임계수준은 계절 변동성의 모사 정도가 비슷한 수준이다. 반면 고정 임계수준은 연 중 동일한 값으로 관측값의 변동성을 반영할 수 없다는 단점을 가지고 있어서, 우리나라와 같이 유량의 계절 변동성이 큰 지역에 사용하기에는 무리가 있다. 또한 다른 임계수준에 비하여 비교적 임계수준이 낮아서 물 부족량이 과소 산정될 수 있으며, 이수기와 홍수기 자료를 모두 이용하기 때문에 겨울철에는 임계수준이 다소 높아질 수밖에 없다. 따라서 이후의 물 부족 지속기간은 길게 산정될 수 있어 하나의 사상이 길게 지속될 수 있다. 이러한 이유로 고정 임계수준의 결과에서 최상위 사상의 총 부족량과 지속기간이 연도의 총 합과 일치하고 있는 것이다. 따라서 최소한 계절별 임계수준 설정이 필요하겠다.

감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- Dracup, J.A., Lee, K.S., and Paulson, E.G.Jr. (1980). "On the definition of droughts." *Wat. Resour. Res.* Vol. 16, No. 2, pp. 297-302.
- Heim, Jr., R. (2002). "A review of twentieth-century drought indices used in the United States." *B. Am. Meteorol. Soc.*, Vol. 83, pp. 1149-1165.
- Hisdal, H., and Tallaksen, L.M. (2000). ARIDE Technical Report No. 6, ARIDE
- 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, pp. 317-333.
- Keyantash, J., and Dracup, J.A. (2002). "The quantification of drought: An analysis of drought indices." *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, Vol. 83, No. 8, pp. 1167-1180.
- Kim, B.S., Sung, J.H., Kang, H.-S., and Cho, C.H. (2012). "Assessment of drought severity over South Korea using Standardized Precipitation Evapo-transpiration Index (SPEI)." *J. Korea Water Resources Associations*, Vol. 45, No. 9, pp. 887-900. (in korean)
- Kjeldsen, T.R., Lundorf, A., and Dan, R. (2000). "Use of two component exponential distribution in partial duration modeling of hydrological droughts in Zimbabwean rivers." *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 45, No. 2, pp. 285-298.
- Lee, B.R. (2014). *Drought evaluation of dam basin using desired yield*, M.Sc. Thesis, Seoul National University of Technology. (in korean)
- Lorenzo-Lacruz, J., Morán-Tejeda, E., Vicente-Serrano, S.M., and López-Moreno. (2013). "Streamflow droughts in the Iberian Peninsula between 1945 and 2005: spatial and temporal patterns." *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 17, pp. 119-134.
- Pandey, R.P., Sharma, K.D., Mishra, S.K., Singh, R., and Galkate, R.V. (2008). "Assessing streamflow drought severity using ephemeral streamflow data." *Int. J. Ecol. Econ. Stat.*, Vol. 11, No. S08, pp. 77-89.
- 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, October 2010, 111-118.
- Smakhtin, V.U. (2001). "Low flow hydrology: a review." *J. Hydrol.*, Vol. 240, pp. 147-186.
- Stahl, K. (2001). *Hydrological drought a study across Europe.*, Doctoral dissertation, Geowissenschaftlichen Fakultät, Albert-Ludwigs Universität Freiburg, Freiburg, Germany
- Tallaksen, L.M., and Van Lanen, H.A.J. (2004). Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater., *Developments in Water Science 48*, Elsevier Science B.V., The Netherlands.
- Tallaksen, L.M., Hisdal, H., and van Lanen, H.A.J. (2009). "Space-time modelling of catchment scale drought characteristics." *J. Hydrol.*, Vol. 375, No. 363-372.
- Tallaksen, L.M., Madsen, H., and Clausen, B. (1997). "On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume." *Hydrolog. Sci. J.*, Vol. 42, pp. 15-33.
- Tate, E.L., and Gustard, A. (2000). Drought definition: a hydrological perspective, In: *Drought and Drought Mitigation in Europe* (ed. by J.V.Vogt and F.Somma), Kluwer Academic Publishers, the Netherlands, 23-48.

Woo, M-K., and Tariule, A. (1994). "Streamflow droughts of Northern Nigerian rivers." *Hydrolog. Sci. J.*, Vol. 39, pp. 19-34.

Yevjevich, V. (1967). *An objective approach to definition and investigation of continental hydrological droughts*. Hydrology Paper No. 23, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA.

Yoo, J.Y., Shin, J.Y., Kim, D.K., and Kim, T.-W. (2013). "Drought risk analysis using stochastic rainfall

generation model and Copula functions." *J. Korea Water Resources Associations*, Vol. 46, No. 4, pp. 425-437 (in Korean)

Zelenhasic, E., and Salvai, A. (1987). "A method of streamflow drought analysis." *Wat. Resour. Res.* Vol. 23, No. 1, pp. 156-168.

| | |
|------------------------|------------------|
| 논문번호: 13-094 | 접수: 2013.11.27 |
| 수정일자: 2014.04.01/04.28 | 심사완료: 2014.04.28 |