



The method of period division and range setting for annual river discharge management

Park, Tae Sun^{a*}

^aSenior Researcher, Department of National Territorial Environment & Resources Research, Korea Research Institute for Human Settlement, Sejong, Korea

Paper number: 22-049

Received: 1 August 2022; Revised: 25 October 2022; Accepted: 25 October 2022

Abstract

Until now, the periods of river discharge management throughout a year are divided into flood and non-flood periods, and the ranges of discharges to be managed are broadly defined from drought discharge to flood discharge. In this study, using the long-term daily discharge data from 8 points of four major rivers, we propose a method of dividing the year into several periods with the homogeneous mean and dispersion of discharges. As a result of the study, the period of through a year was different depending on the point, but it could be divided into pre-flood period, flood period, and post-flood period. And the more subdivided the period, the more decreased the ratio of the maximum discharge to the minimum discharge. In addition, in order to ensure that the discharge for a year is more than the drought discharge and less than the flood discharge, to set the range of discharge management per period as the average flow \pm standard deviation for each period is proposed.

Keywords: River discharge management, Period division, Range of discharges to be managed, CUSUM

연중 하천유량 관리를 위한 기간 구분 및 관리범위 설정 방안

박태선^{a*}

^a국토연구원 국토환경·자원연구본부 선임연구위원

요 지

현재까지는 연중 하천유량의 관리기간은 홍수기와 비홍수기로 구분하고, 관리해야 할 유량의 범위는 갈수량에서 홍수량까지로 폭넓게 규정하고 있다. 본 연구에서는 4대강 8개 지점의 장기간 일평균유량 자료를 이용하여 1년을 유량의 분산과 평균이 동질한 기간들로 구분하고, 기간별 유량의 평균과 표준편차를 이용하여 유량의 관리범위를 설정하는 방안을 제시한다. 연구결과, 연중 관리기간은 지점에 따라 차이는 있으나 홍수기 이전, 홍수기, 홍수기 이후로 구분할 수 있었으며, 기간을 세분화하면 최소유량에 대한 최대유량의 비도 낮아지는 것을 알 수 있었다. 또한, 연중 일평균유량이 갈수량 이상 홍수량 이하가 되도록 기간별 일평균유량의 관리범위를 기간별 일평균유량의 평균 \pm 표준편차로 설정하는 방안도 제시하였다.

핵심용어: 하천유량 관리, 관리기간의 구분, 유량의 관리범위, 누적합법

1. 서 론

하천에서는 홍수조절, 갈수관리, 이수적 이용, 수질 및 생태 보전 등 관리목적에 따라 기간마다 유량을 적절하게 관리해야

한다. 현재 하천의 유량관리를 위한 기간을 명확하게 규정한 규정은 댐과 보 등의 연계운영규정 제2조(정의) 제3호 및 제4호와 하천의 유지보수 및 안전점검에 관한 규칙 제5조(안전점검) 제1항 및 제6조(보수) 제2항으로서 6월 21일부터 9월 20일까지를 홍수기로, 그 외의 기간을 갈수기로 규정하고 있다. 하천법 시행령 제17조의2(하상변동 조사의 방법, 실시 주기 및 시기) 제4항, 댐 건설·관리 및 주변지역지원 등에 관한

*Corresponding Author. Tel: +82-44-960-0395
E-mail: tspark@krihs.re.kr (Park, Tae Sun)

법률 시행령 제6조(댐관리규정) 제2항, 수도법 시행령 제29조(시설기준) 제1항 제2호, 내수면 어업법 시행규칙 제20조(어도의 설치기준 및 방법) 제2항 제3호 및 제21조(어도의 설치를 위한 협의 등) 제2항 2호 등에서는 홍수기, 관개기(灌溉期), 갈수기, 평수기 등의 용어를 사용하고 있으나 각각의 기간을 명확하게 규정하고 있지는 않다. 또한, 연중 일평균유량의 변화 정도를 가늠할 수 있는 지표인 하상계수는 한국과 같이 일평균유량의 계절적 변화가 큰 경우에는 하천관리자가 관리해야 할 유량의 관리범위를 파악하는데 큰 도움이 되지 못하고 있다. 즉, 하천관리자에게는 연중 일평균유량의 관리를 위한 세분화된 관리기간이나 관리범위에 대한 정보가 필요하다.

연중 일평균유량의 변화특성을 기준으로 1년을 몇 개의 관리기간으로 구분하고, 기간별로 유량의 관리범위를 정하여 관리하면 다음과 같은 몇 가지 관점에서 유용하다. 첫째, 기간별로 어느 정도의 일평균유량이 발생할지를 판단할 수 있기 때문에 일평균유량의 변화에 대한 예측 가능성을 높일 수 있다. 둘째, 기간별로 유량의 관리범위를 가늠할 수 있기 때문에 갈수시의 유량 확보, 평상시의 유량 관리, 홍수시의 유량 조절 등 관리목적을 달성하기 위한 대응시간을 확보할 수 있다. 셋째, 하천유량 관리업무를 기간별로 세분화·구체화함으로써 유량관리업무의 효율성과 집중도를 높일 수 있다.

이처럼 연중 일평균유량의 변화를 통계적으로 동질한 몇 개의 기간으로 구분하기 위해서는 통계적 가설검정을 이용하여 특정 시점 전후로 시계열 자료의 평균과 분산이 급격히 변화되었는지의 여부를 판단하는 변동점(change point) 탐색기법을 이용할 수 있다. 변동점 탐색은 정성적 기법과 정량적 기법으로 구분할 수 있으며, 정성적 기법에는 자료를 도시(plotting) 하는 이중누가곡선법과 이동평균법이 있고, 정량적 기법에는 통계적 가설을 검정하는 Pettitt 검정, Bayesian 변동점 분석 등이 있다(Kim and Lee, 2018). 또한, 시계열 자료의 전반적 증감 경향성 여부를 판단하는 방법으로는 Mann-Kendall 검정, Spearman's Rho 검정, 선형 회귀분석(Linear Regression), 자료의 변화 시점을 계산하여 평균이동을 검정하는 누적합(CUSUM) 검정, Cumulative Deviation 검정, Worsley Likelihood 검정, 특정 시점 전후의 중앙값과 평균의 통계적 유의성 여부를 검정하는 Rank Sum 검정, t-검정 등이 있다(Oh *et al.*, 2006).

Oh *et al.* (2006)은 여덟 가지 검정기법들을 이용하여 소양강댐의 30년간 유입량 자료의 경향성을 분석하였는데, CUSUM 검정 등을 이용하여 변화점을 찾아낸 후, t-검정 등을 이용하여 인접한 기간 간의 평균이 일정한가의 여부를 판단해야 한다고 주장하였다. Lee *et al.* (2014)은 5개 강우관측소의 10년

동안의 연평균 강우량을 이용하여 1,000개의 합성 모의강우 자료를 생성한 후, CUSUM, Bayesian Change Point, Dynamic Programming이라는 세 가지 기법들을 적용하여 강우자료의 변동점을 비교·분석하였는데 평균과 분산을 함께 고려할 필요가 있다고 주장하였다. Kim and Lee (2018)는 유의수준 5%에서 Mann-Kendall 검정을 이용하여 화천댐의 장기간(1967~2017) 연평균 강우량 및 유입고의 경향성을 검토한 후, t-검정을 이용하여 임남댐 건설 전후의 연평균 강우량과 유입고의 평균 차이를 판단하였다. Jung *et al.* (2019)은 소양강댐, 충주댐, 안동댐을 대상으로 유의수준 5%에서 Mann-Kendall 검정을 이용하여 경향성을 분석한 후, t-검정을 반복적으로 수행하여 홍수기(6.21~9.20)를 제외한 기간에 대하여 가뭄 위험의 변화를 평가하였다.

연중 일평균유량이나 일강우량의 변화기간을 이용하여 홍수기와 비홍수기를 구분한 주요 연구는 다음과 같다. Gu *et al.* (2014)은 일반 통계기법(Common Statistics Method), Fuzzy Set Theory method, Fisher Optimal Division Method라는 세 가지 방법을 이용하여 중국 남서부에 위치한 Lixianjiang 저수지의 홍수위 조절을 위한 기간을 분석하여 홍수기 이전, 홍수기, 간기(interim), 홍수기 이후라는 네 개 기간으로 구분하였다. Wang *et al.* (2016)은 중국 Fenhe강 유역의 장기간(1957~2014) 일강우량 자료를 이용하여 Mann-Kendall, t-검정, Fisher optimal partition method라는 세 가지 방법으로 기후 변화에 따른 홍수기의 지속기간과 시·종점의 변화를 분석하여 홍수기 이전, 홍수기, 홍수기 이후라는 세 개 기간으로 구분하였다. Wu *et al.* (2016)은 장기간(1957~2008)의 일강우량 자료를 이용하여 Set Pair Analysis와 Fuzzy Set Analysis 방법으로 중국 Chenjiawan 저수지의 홍수위 조절을 위한 기간을 분석하여 홍수기 이전, 홍수기, 홍수기 이후로 구분하였다. Li and Yongbo (2018)은 장기간(1969~2015)의 일 강우량 자료를 이용하여 Mann-Kendall 검정, CUSUM 검정, Fisher Optimal method로 중국 Zhangjia Zhuang 저수지의 홍수위 조절을 위한 기간을 분석하여 홍수기 이전, 홍수기, 홍수기 이후로 구분하였다.

이처럼, 장기간의 연중 일평균유량 자료를 이용하여 다양한 방법으로 변화점을 찾아내어 홍수기와 비홍수기를 구분하고, 비홍수기를 홍수기 이전과 이후로 세분화하기 위한 연구들이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 분석절차가 간단하고, 시각적 판단이 용이한 방법으로 일평균유량의 변화점을 도출한 후, 통계적 이론에 근거하여 관련 개념이 명확한 방법으로 검정하여 연중 일평균유량의 관리기간을 구분하고, 구분된 기간별로 일평균유량의 관리범위를 설정하는 방안을 제시한다.

2. 분석절차 및 관련 이론 고찰

2.1 분석절차

본 연구의 분석절차는 일평균유량의 변화 특성이 동일한 관리기간으로 구분하는 단계와 구분된 기간별로 일평균유량의 관리범위를 설정하는 단계로 구분할 수 있다. 첫 번째 단계는 유황분석 및 누가곡선 작성, 관리기간 구분의 순으로 수행되고, 두 번째 단계는 기간별 기본통계량 산정, 관리해야 할 일평균유량의 범위 설정 및 결과 도시 순으로 수행된다. 자세한 분석절차는 Table 1에 나타내었으며, 관련 이론과 구체적인 분석방법들은 순차적으로 서술한다.

2.2 일최빈 유량을 이용한 유황분석 및 누가곡선 작성

Park (2021a)은 일최빈 유량은 상·하위의 극단적인 유량값

들을 제외할 수 있고, 일최대 유량 및 일평균 유량과의 상관성도 높아 해당 일자의 장기간 일평균유량을 대표하는데 무리가 없다고 주장하였다. 또한, 일 최빈유량을 이용하여 유황곡선을 작성하고, 유황분석 기준유량(갈수량, 저수량, 평수량, 풍수량, 홍수량)들을 산정하였으며, 연간 일평균유량의 불균형 정도를 분석하였다(Park, 2021b).

따라서, 본 연구에서는 일최빈 유량이 해당 일자의 일평균 유량을 대표할 수 있다고 판단하여 일최빈 유량을 이용하여 분석한다. 장기간의 일평균유량 자료로부터 일최빈유량을 산정하는 구체적인 방법은 Table 2에 제시하였다. 이때, 계급 구간의 수는 step 3에 제시한 바와 같이 자료년수를 이용하여 Brooks and Carruthers (1953) 공식이나 Huntsberger (1961) 공식을 참고하여 결정한다.

장기간의 일평균유량 자료를 동일한 날짜순으로 정렬한

Table 1. Process for period division and management range setting for river discharge

Step	Process
I. Process for the period division	
1. Flow regime analysis & draw the accumulated curve	
1) Calculate the daily mode discharge by date	Calculated using long-term daily discharge data
2) Calculate the reference discharges	Drought (Q_{355}), Low (Q_{275}), Normal (Q_{185}), Plentiful (Q_{95}), Flood(Q_{10}) discharge
3) Calculate 5-days averaged discharges	Divide 365 days into 73 small groups in 5-day increments
4) Draw the accumulated discharges curve	Created by accumulating the 5-days averaged daily mode discharges by date
2. Period division process	
1) Create CUSUM Chart and detect change point	Determine target discharges (period average discharge) and calculate above target SH, below target SL (using $k=0.5\sigma$), UCL and LCL (using $h=1.5\sigma$) etc.
2) Homogeneity test between adjacent periods	
(1) Calculate the basic statistics by period	n, μ, σ
(2) Variance test (F-test) by period	F value < F reject value : Equal dispersion F value > F reject value : Hetero dispersion
(3) Mean test (t-test) by period	$p < 0.05$: mean is different, $p > 0.05$: mean is same
(4) Iterative calculation	Repeat the process of (1) to (3) until the statistical characteristics of adjacent periods become independent of each other
3) Revise the division period	
(1) Confirmation of period to be separated	$p < 0.05$: separate into two periods
(2) Confirmation of period to be combined	$p > 0.05$: combine into one period
4) Draw the confirmed period	x-axis as the date and y-axis as the daily mode discharge
II. Set the range of discharge to be managed by period	
1. Calculate the basic statistics by period	$n, \mu, \sigma, Q_{min}, Q_{max}$
2. Set & draw the range of discharge by period	
1) Set the upper limit discharge (Q_{upper})	$\mu + \sigma \leq Q_{10}$ (flood discharge)
2) Set the mean discharge (Q_{mean})	μ
3) Set the lower limit discharge (Q_{lower})	$\mu - \sigma \geq Q_{355}$ (drought discharge)
4) Draw the range of discharge to be managed	x-axis as the date and y-axis as the daily mode discharge and range of management

Table 2. Daily mode discharge calculation procedure

Item	Procedure
Step 1	◦ Align the annual daily discharge data by same date (exclude February 29)
Step 2	◦ Select the maximum and minimum discharge for each date
Step 3	◦ Divide into appropriate grades by using the maximum and minimum discharge for each date ◦ $k=1+3.3 \log N$ (Huntsberger) or $k=5 \times \log N$ (Brooks and Carruthers) where, k : number of grades, N : number of discharge data for each date
Step 4	◦ Calculate the frequency of discharge in each grade for each date
Step 5	◦ Set the maximum value of the most frequent grade to the mode discharge for each date

후, 날짜별로 몇 개의 계급구간으로 구분하여 365개의 일최빈 유량을 산정하고, 이를 크기순으로 정렬하여 유황분석 기준 유량과 최소유량에 대한 최대유량의 비를 산정한다.

또한, 365개의 일최빈유량을 누가하여 가로축을 발생일자, 세로축을 일최빈유량의 누가량으로 하여 누가곡선을 작성한다.

2.3 CUSUM 및 t-검정을 이용한 기간 구분

그러나 누가곡선만으로는 기간을 명확하게 구분하기 어려우므로 CUSUM 방법으로 변동점을 도출한다. CUSUM 방법은 Eqs. (1)~(3)의 관계를 이용하여 목표표 하는 평균에서 $0.5 \sim 1.5\sigma$ 이하의 평균 이동을 시각적으로 식별하기 용이한 방법이다.

$$\text{Upper CUSUM} : C_i^+ = \text{Max} [0, C_{i-1}^+ + x_i - T - k] \quad (1)$$

$$\text{Lower CUSUM} : C_i^- = \text{Min} [0, C_{i-1}^- + x_i - T + k] \quad (2)$$

$$C_0^+ = C_0^- = 0 \quad (3)$$

여기서, C_i^+ 는 Upper CUSUM, C_i^- 는 Lower CUSUM, 첨자 0는 초기값, T는 목표값, k는 허용 여유(allowable slack)로서 0.5σ 이다. C_i^+ 는 양의 평균변화를 찾을 때, C_i^- 는 음의 평균변화를 찾을 때 적용한다.

먼저, 전 기간의 목표유량을 일유량의 연평균으로 하고, 상한목표(SH)와 하한목표(SL), 상한 관리한계(UCL)과 하한 관리한계(LCL)을 산정하여 SH가 UCL을 초과하거나 SL이 LCL을 초과하는 지점을 기준으로 기간을 구분한다. 이때, 유

량관리에 필요한 시간적 여유를 확보하고, 모집단의 분포와 상관없이 표본의 분포가 정규분포에 근사해지는 중심극한정리가 성립되도록 최소한의 기간을 30일 이상으로 설정한다 (Lee and Noh, 2012). 또한, CUSUM 적용을 위해 5일 단위의 유량을 이용하였는데, 매일의 일평균유량은 변동이 심하여 어느 정도의 평균적 개념이 필요하고, 유황분석 기준유량들이 5일 단위로 구분되며, 1년이 5일씩 73개 구간으로 구분되는 등 분석을 위한 적정단위로 사료되기 때문이다.

전 기간의 도출결과를 토대로 홍수기와 비홍수기를 구분하고, 비홍수기에 대해서는 홍수기 이전과 홍수기 이후로 구분한 후, 각 기간별 일평균 유량을 목표유량으로 하여 전술한 방법으로 기간을 세분화 할 수 있다. CUSUM에 대한 보다 자세한 내용은 인터넷 등을 참고할 수 있다.

이러한 방법으로 기간이 구분되면, 인접한 두 기간 간에 유량자료의 통계적 동질성이 있는지의 여부를 검토하여 동질성이 있다고 판단되면 하나의 기간으로 통합하고, 없다고 판단되면 독립된 기간으로 분리한다. 인접한 두 기간 간의 동질성 여부는 두 기간에 대하여 F-검정을 이용한 분산분석을 실시하여 산정된 F값이 기각치보다 작으면 등분산, 크면 이분산으로 판단한다. 검정결과에 따라 분산의 유형이 결정되면 해당 분산의 유형에 적합한 t-검정을 이용한 평균검정을 실시하여 유의수준 5%에 따른 p값의 크기에 따라 평균이 같다고 판단되면 독립된 기간으로 구분하고, 다르다고 판단되면 하나의 기간으로 통합한다. 통합한 기간에 대해서는 그와 인접한 기간과의 통합여부를 다시 검토하여 최종적인 기간을 확정한다.

본 연구에서는 F-검정 및 t-검정 시 95% 신뢰수준을 적용한다. 두 집단 간 동질성 여부의 판단방법에 대한 보다 자세한 내용은 Lee and Noh (2012) 등의 통계학 서적들에 제시되어 있다.

2.4 기간별 유량의 관리범위 설정

이러한 과정을 거쳐 최종적으로 기간이 확정되면 기간별로 유량의 관리범위를 설정한다. 그러나 일정 기간 동안의 일평균유량을 적절히 관리하기 위한 범위를 설정하는 기준이나 방법은 아직까지 마련되어 있지 않다. 일반적으로 품질관리 분야에서는 표준편차의 3배($\pm 3\sigma$)를 기준으로 관리의 상한선과 하한선을 정하여 관리한다(NIST, 2022). 그러나 하천의 일평균유량을 연중 안정적으로 관리하기 위해서는 갈수량 이상을 유지하고, 홍수량 이하가 되도록 관리해야 하지만 품질관리와 동일하게 3σ 기준을 적용하면 하한선이 음수로 설정되어 물리적 의미를 갖지 못하거나 상한선이 일최대유량을 초과하여 관리상의 의미를 갖지 못하게 된다.

따라서 본 연구에서는 이러한 현실적 여건을 고려하여 유

량의 관리범위를 Eqs. (4)~(6)과 같이 일평균 유량의 관리상 한과 하한을 $\pm 1\sigma$ 로 설정하는 방안을 제시한다. 정규분포의 특성상 해당 기간 내에서 발생하는 일평균유량의 68% 정도가 관리범위에 포함된다(Lee and Noh, 2012).

$$Q_{upper} = \mu + \sigma \quad (4)$$

$$Q_{mean} = \mu \quad (5)$$

$$Q_{lower} = \mu - \sigma \quad (6)$$

여기서, μ 와 Q_{mean} 은 해당 기간의 일평균유량, σ 는 표준편차, Q_{upper} 는 상한유량, Q_{lower} 은 하한유량이다. 최종적으로는 전 기간에 대하여 기간별 일평균유량 및 상·하한유량과 유황분석 기준유량을 함께 도시한다.

3. 분석지점 및 이용자료

3.1 분석지점

분석지점은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 한강은 소양강댐과 한강대교, 낙동강은 안동댐과 계내리, 금강은 용담댐과 금강교, 섬진강은 섬진강댐과 송정리 지점 등 4대강 본류 상하류 8개 지점이다. 상류지점들은 유역 개발이 적어 비교적 자연상태에 가까운 지점들이고, 하류지점들은 유량이 풍부하고, 하천관리상 중요한 지점들이다.

3.2 이용자료

본 연구에서는 국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS)의 일평균유량 자료를 이용하였다. 상류 4개 지점의 일평균유량은 댐수위와 방류량을 이용하여 역산한 일평균 유입량이다. 하류 4개 지점 중, 송정리 지점의 일평균유량은 수위-유량 관계식을 이용하여 산정한 것이고, 한강대교, 계내리, 금강교 지점의 일평균유량은 도플러 방식의 초음파 유속계로 측정된 유량이다. 또한, 자료의 신뢰성을 확보하기 위해 Table 3에 나타낸 바와 같이 영(0)유량이나 결측일이 단 하루라도 포함된 년도는 분석자료에서 제외하였다.

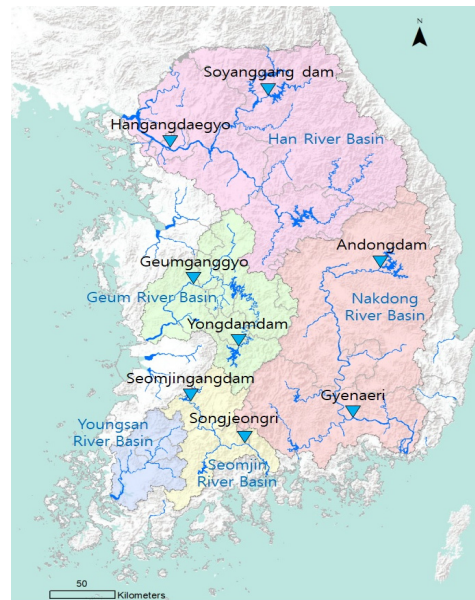


Fig. 1. Location map for each analysis point

Table 3. Overview and statistical characteristics of analysis points

Name of Point	Period of Data	Total Year of Data	Zero discharge days	Missing days	Years of Analysis	Number of Data	Excluded Year
Soyonggangdam	1988~2017	30	117		30yr	10,950	-
Andongdam	1988~2017	30	148		30yr	10,950	-
Yongdamdam	2001~2017	17	157		17yr	6,205	-
Seomjingangdam	1988~2017	30	537		30yr	10,950	-
Hangangdaegyo	1996~2019	24	6	240	15yr	5,475	° 1999(65), 2004(42), 2005(53), 2006(29), 2007(34), 2010(10), 2011(3), 2013(7), 2015(3)
Gyenaeri	2002~2019	18	-	0	18yr	6,570	-
Geumganggyo	1997~2019	23	731 (indistinguishable)		13yr	4,745	° 1998(1), 1999(6), 2000(14), 2001(114), 2002(107), 2011(99), 2012(365), 2013(1), 2015(1), 2019(23)
Songjeongri	1997~2019	23	5	15	21yr	7,665	° 2005(5), 2018(15)

Note 1. Years of analysis are the period excluding the year including zero discharges and missing data

2. () is excluded days

4. 분석결과

4.1 기간 구분 결과

전술한 방법으로 8개 지점에 대하여 1년을 몇 개의 기간으로 구분한 결과는 다음과 같다. 첫째, Table 4에서 보는 바와 같이 대부분의 지점은 홍수기와 비홍수기가 뚜렷하게 구분되었으며, 홍수기 이전, 홍수기, 홍수기 이후라는 세 개의 기간으로 구분되었다. 그러나 금강교 지점은 홍수기와 비홍수기로 구분되었고, 소양강댐 지점이나 송정리 지점은 홍수기 이후부터 홍수기 이전 사이의 기간이 갈수기로 구분되기도 하였다. 둘째, Table 5에서 보는 바와 같이 구분된 기간별 결정계수는 최소 0.9169에서 최대 0.9992로서 모두 0.9 이상의 높은 상관성을 나타내었다. 셋째, 홍수기는 대부분 하지(6.21)에서 시작되어 추분(9.23)에 종료되었으나 지점에 따라서는 소한(7.7)에서 시작되거나 한로(10.8)에서 종료되는 경우도 있었다. 넷째, 홍수기 이전은 청명(4.5)이나 곡우(4.20)에서 시작되어 하지(6.21)까지로 구분되었고, 홍수기 이후는 추분(9.23)이나 한로(10.8)에서 소설(11.23)까지로 구분되었다. 다섯째,

기간별 장경은 홍수기는 최소 80일(한강대교)에서 최대 110일(계내리)였으며, 비홍수기는 홍수기 이후가 최소 55일(소양강댐)에서 최대 270일(금강교)이었다.

이처럼 연중의 기간 구분이 짧게는 홍수기와 비홍수기로 구분되는 경우도 있으나 홍수기 이전, 홍수기, 홍수기 이후, 갈수기라는 네 개의 기간으로 구분되는 경우도 있는 것은 지점별 유량의 유출·입 특성 차이에 따른 것으로 판단된다. 따라서, 보다 많은 지점에 대한 분석이 이루어지면 이러한 기간구분에 영향을 미치는 요인들을 보다 명확하게 규명할 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 2에는 소양강댐 지점의 기간 구분결과를 일최빈 유량, 기간별 일최빈 유량의 평균, 일최빈 유량의 누가곡선 등과 함께 사례로 제시하였다.

4.2 기간별 유량의 변동폭 및 유량의 관리범위

Table 5에는 전 기간에 대한 하상계수와 동일한 개념인 최소유량에 대한 최대유량의 비를 기간별로 제시하였으며, 그 주요 결과는 다음과 같다. 첫째, 전 기간에 대한 하상계수는

Table 4. Comparison of period division results and 24 seasonal days

Item	Spring						Summer					
	Advent of spring	Rain water	Stirring of insects	Vernal equinox	Clear and bright	Grain rains	Advent of summer	Growing grain	Maturing grain	Summer solstice	Minor heat	Major heat
	2.4	2.19	3.5	3.21	4.5	4.20	5.5	5.21	6.6	6.21	7.7	7.23
Soyanggang Dam					4.6					6.25		
Andong Dam					4.11					6.20		
Yongdam Dam		2.25								6.20		
Seomjingang Dam						4.16				6.20		
Hangangdaegyoo					4.11						7.5	
Gyenaeri						4.21				6.20		
Geumganggyoo										6.20		
Songjeongri					4.11					6.25		

Item	Autumn						Winter					
	Advent of autumn	Lapse of heat	White dew	Autumnal equinox	Cold dew	Decent of frost	Advent of winter	Minor snow	Major snow	Winter solstice	Lesser cold	Great cold
	8.7	8.23	9.8	9.23	10.8	10.23	11.7	11.22	12.7	12.22	1.5	1.20
Soyanggang Dam				9.23				11.17				
Andong Dam				9.23								
Yongdam Dam				9.18								
Seomjingang Dam					10.3						1.1	
Hangangdaegyoo				9.23								
Gyenaeri					10.8							
Geumganggyoo				9.23								
Songjeongri					10.8			11.27				

Table 5. Result of period division

(Unit : m³/sec)

Item	Pre-Flood	Flood	Post-Flood	Drought	Full Period	Item	Pre-Flood	Flood	Post-Flood	Drought	Full Period
Soyanggang Dam	4.6~6.24	6.25~9.22	9.23~11.16	11.17~4.5	1.1~12.31	Hangangdaegyo	4.11~7.4	7.5~9.22	9.23~4.10		1.1~12.31
Dudation	80	90	55	140	365	Dudation	85	80	200		365
R ²	0.9879	0.9907	0.9971	0.9169		R ²	0.9983	0.9870	0.9987		
Q _{max}	264.0	1,175.3	121.3	69.7	1,175.3	Q _{max}	974.8	2,675.3	583.9		2,675.3
Q _{upper}	94.2	477.1	57.2	27.5		Q _{upper}	491.3	1,491.1*	340.7		
Q _{mean}	54.5	276.8	33.6	15.0		Q _{mean}	355.5	1,006.4	248.7		
Q _{lower}	14.9	76.5	9.9	3.5*		Q _{lower}	219.7	480.2	156.6		
Q _{min}	10.5	44.6	10.3	2.3	2.3	Q _{min}	176.6	333.0	115.6		115.6
Q _{max} / Q _{min}	25.2	26.3	11.8	30.1	507.2	Q _{max} / Q _{min}	5.5	8.0	5.1		23.1
Andong Dam	4.11~6.19	6.20~9.22	9.23~4.10		1.1~12.31	Gyenaeri	4.21~6.19	6.20~10.7	10.8~4.20		1.1~12.31
Dudation	70	100	195		365	Dudation	60	110	195		365
R ²	0.9614	0.9946	0.9637			R ²	0.9960	0.9961	0.9979		
Q _{max}	136.4	582.7	286.2		582.7	Q _{max}	797.8	1,983.1	456.1		1,983.1
Q _{upper}	51.0	203.1	38.5			Q _{upper}	426.9	1,164.6	201.7		
Q _{mean}	27.1	116.8	14.5			Q _{mean}	298.6	740.1	151.7		
Q _{lower}	3.3	30.5	3.0*			Q _{lower}	170.3	315.7	101.6		
Q _{min}	5.9	21.7	2.2		2.2	Q _{min}	165.4	161.4	76.4		76.4
Q _{max} / Q _{min}	23.1	26.9	132.5		269.6	Q _{max} / Q _{min}	4.8	12.3	6.0		25.9
Yongdam Dam	2.25~6.19	6.20~9.17	9.18~2.24		1.1~12.31	Geumganggyo		6.20~9.22	9.23~6.19		1.1~12.31
Dudation	115	90	160		365	Dudation		95	270		365
R ²	0.9849	0.9955	0.9872			R ²		0.9899	0.9982		
Q _{max}	65.8	329.7	43.3		329.7	Q _{max}		681.8	178.1		681.8
Q _{upper}	23.7	121.4	12.7			Q _{upper}		336.3	109.8		
Q _{mean}	13.5	68.3	6.9			Q _{mean}		224.8	85.2		
Q _{lower}	3.3	15.2	2.6*			Q _{lower}		113.2	60.5		
Q _{min}	2.7	8.2	2.1		2.1	Q _{min}		71.6	38.0		38.0
Q _{max} / Q _{min}	24.4	40.2	20.5		155.8	Q _{max} / Q _{min}		9.5	4.7		17.9
Seomjingang Dam	4.16~6.19	6.20~10.2	10.3~12.31	1.1~4.15	1.1~12.31	Songjeongri	4.11~6.24	6.25~10.7	10.8~11.26	11.27~4.10	1.1~12.31
Dudation	65	105	90	105	365	Dudation	75	105	70	115	365
R ²	0.9800	0.9891	0.9819	0.9809		R ²	0.9971	0.9953	0.9907	0.9992	
Q _{max}	50.5	255.4	19.1	29.0	255.4	Q _{max}	119.6	778.8	187.4	53.6	778.8
Q _{upper}	28.8	117.1	8.7	13.0		Q _{upper}	58.4	406.4	56.9	33.0	
Q _{mean}	16.3	69.0	4.9	8.0		Q _{mean}	36.5	242.2	35.4	25.7	
Q _{lower}	3.8	20.9	1.9*	3.0		Q _{lower}	16.3*	78.0	16.3*	18.3	
Q _{min}	2.5	3.5	1.3	1.7	1.3	Q _{min}	10.5	35.6	13.6	13.5	10.5
Q _{max} / Q _{min}	20.3	72.3	14.5	17.6	193.5	Q _{max} / Q _{min}	11.3	21.9	13.7	4.0	73.9

Note : * in upper limit means flood discharge (Q₁₀) and lower limit means drought discharge (Q₃₅₅)

상류지점은 155.8(용담댐)에서 507.2(소양강댐)에 이르지만 하류지점에서는 이보다 크게 작아져 17.9(금강교)에서 73.9(송정리)으로 유량이 안정되고 있다. 둘째, 기간별 최소유량에

대한 최대유량의 비는 전 기간보다 기간별로 구분했을 때 더 작아졌다. 소양강댐 지점의 경우, 전 기간의 하상계수는 507.2지만 기간별로는 홍수기 이전에는 25.2, 홍수기에는 26.3, 홍

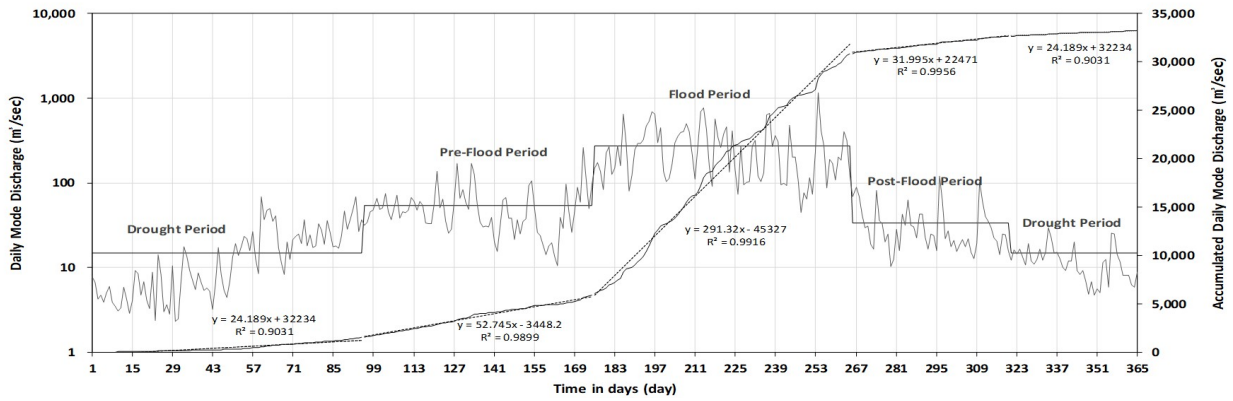


Fig. 2. Period division result at Soygangang Dam

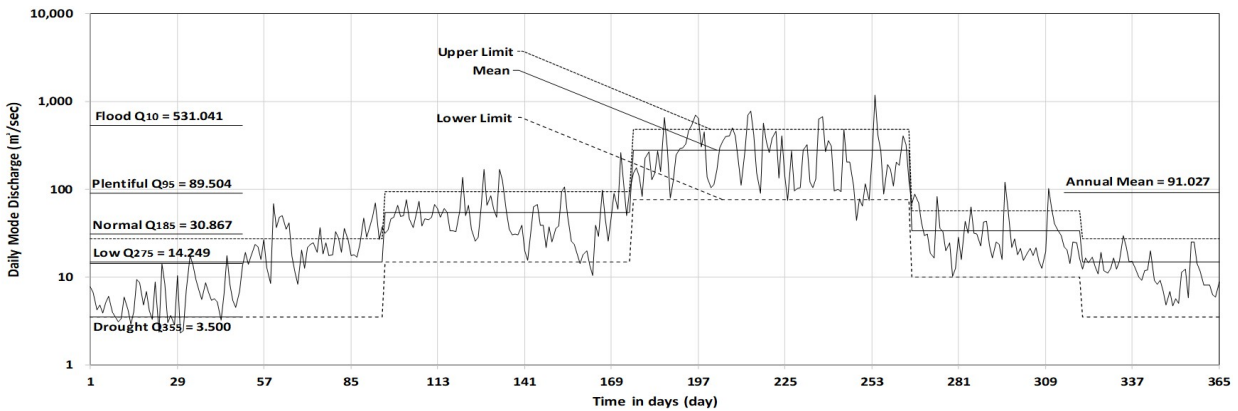


Fig. 3. Discharge management ranges by period division at Soygangang Dam

수기 이후에는 11.8, 갈수기에는 30.1로 크게 작아졌다. 즉, 1년을 몇 개의 기간으로 세분하면 일평균유량의 판단범위를 좁힐 수 있었다.

마지막으로, 기간별로 관리해야 할 하한유량(Q_{lower})과 상한유량(Q_{upper})의 범위도 Table 5에 제시하였는데 하한유량이 갈수량(Q_{355}) 보다 작으면 갈수량이 이상이 유지되도록 갈수량으로 설정하였고, 상한유량이 홍수량(Q_{10}) 보다 크면 홍수를 조절하도록 홍수량 이하가 되도록 설정하였다. Fig. 3에는 소양강댐 지점의 기간별 일평균유량의 관리범위와 유형분석 기준유량을 사례로 제시하였다.

5. 결론

본 연구에서는 4대강 상하류 8개 지점의 장기간 일평균량 자료를 이용하여 1년을 몇 개의 관리기간으로 구분하는 방법을 제시하였다. 분석을 위해, CUSUM 검정 등을 이용하여 일평균유량의 변화점을 찾아낸 후, F-검정과 t-검정을 이용하여

인접한 기간 간의 평균이 일정한가의 여부를 판단하였다. 이러한 기간구분 결과는 일평균유량의 누가곡선과 함께 도시함으로써 시각적 판단이 용이하도록 하였다. 또한, 연중 갈수량 이상 홍수량 이하를 유지하도록 기간별로 일평균유량의 관리범위를 설정하는 방안도 제시하였다.

본 연구의 주요 결론은 다음과 같다. 첫째, 8개 지점 모두에서 홍수기와 비홍수기가 뚜렷하게 구분되었다. 둘째, 비홍수기는 홍수기 이전과 홍수기 이후로 구분할 수 있었다. 다만, 지점에 따라 홍수기와 비홍수기로 구분되거나 비홍수기 이후에 갈수기가 별도로 구분되는 경우도 있었다. 셋째, 기간별 최소유량에 대한 최대유량의 비는 기간을 세분하면 작아지기 때문에 유량변화의 판단범위를 좁힐 수 있다. 마지막으로, 기간별 유량관리의 상·하한을 평균유량 $\pm 1\sigma$ 로 설정하는 방안을 제시하였다.

그러나 누적합법(CUSUM)을 적용함에 있어 본 연구에서는 전체 구간을 대상으로 변화점을 식별한 후, 이를 기준으로 전체 구간을 둘로 나누어 변화점을 반복적으로 식별하는 이진분할(Binary Segmentation, BS) 알고리즘을 적용하였으나

Jang and Son (2022)에 의하면 이러한 방법은 다중변동점에 대한 처리방안이 마련되어야 하며, Zhou *et al.* (2019)의 연구에서와 같이 정규분포, Gumbel, Weibull 등 다양한 분포형에 대한 검토도 필요하다. 또한, 보다 많은 지점에 대한 기간 구분과 기간별 유량의 변화특성을 분석하여 지점별, 기간별, 상·하류 지점 간의 유량변화 특성에 대한 고찰도 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 국토연구원의 연구과제(수시 20-04) 중 일부 내용을 수정·보완한 것임.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Brooks, C., and Carruthers, N. (1953). *Handbook of statistical methods in meteorology*. First Edition, Her Majesty's Stationery Office, London, UK.
- Gu, S., Xiao, C., Cui, W., Gao, L., and Li, Z. (2014). "The division of flood season of Xianjiang river basin based on Fisher optimal division method." *6th International Conference on Flood Management*, ABRHidro, Sao Paulo, Brazil, PAP014966.
- Huntsberger, D. (1961). *Elements of statistical inference*. Allyn and Bacon, Chicago, IL, U.S.
- Jang, W.S., and Son, W. (2022). "WBS algorithm for consistent multiple change points detection via the FLSA." *Journal of the Korea Data & Information Science Society*, Vol. 33, No. 5, pp. 801-815. doi: 10.7465/JKDI.2022.33.5.801.
- Jung, I.W., Kim, D.Y., and Park, J.Y. (2019). "Analysis of drought risk in the upper river basins based on trend analysis result." *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 8, pp. 671-684. doi: 10.5389/KSAE.2019.61.1.021.
- Kim, S.U., and Lee, C.E. (2018). "Identification of yearly variation in Hwacheon dam inflow using trend analysis and hydrological sensitivity method." *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 5, pp. 425-438. doi: 10.3741/JKWRA.2018.51.5.425.
- Lee, H.Y., and Noh, S.C. (2012). *Advanced statistical analysis*. Bubu-moonsa, p. 93.
- Lee, S.H., Kim, S.U., Lee, Y.S., and Sung, J.H. (2014). "Intercomparison of change point analysis methods for identification of inhomogeneity in rainfall series and applications." *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 8, pp. 671-684. doi: 10.3741/JKWRA.2014.47.8.671.
- Li, T., and Yongbo, Z. (2018). "Considering abrupt change in rainfall for flood season division: A case study of the Zhangjia Zhuang reservoir, based on a new model." *Water*, Vol. 10, No. 9, 1152. doi: 10.3390/w10091152.
- National Institute of Standards and Technology (NIST) (2022). Information technology laboratory, accessed 14 September 2022, <<https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pmc/section3/pmc31.htm>>.
- Oh, J.S., Kim, H.S., and Seo, B.H. (2006). "Trend and shift analysis for hydrologic and climate series." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 4B, pp. 355-362.
- Park, T.S. (2021a). "Flow regime analysis method by using discharge Gini coefficient." *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 54, No. 12, pp. 1223-1232. doi: 10.3741/JKWRA.2021.54.12.1223.
- Park, T.S. (2021b). "Improved method of the conventional flow duration curve by using daily mode discharges." *Journal of the Korea Water Resources Association*, Vol. 54, No. 6, pp. 355-363. doi: 10.3741/JKWRA.2021.54.6.355.
- Wang, H., Xiao, W., Wang, J., Wang, Y., Huang, Y., and Hou, B. (2016). "The impact of climate change on the duration and division of flood season in the Fenhe river basin, China." *Water*, Vol. 8, No. 3, 105. doi: 10.3390/W8030105.
- Wu, P.L., Li, J., and Wang, J.Y. (2016). "Flood season division based on improved set pair analysis." *2016 International Conference on Applied Mathematics and Mechanics (ICAMM2016)*, Bangkok, Thailand, pp. 396-400.
- Zhou, C.R., van Nooijen, R., Kolechkina A., and Hrachowitz, M., (2019). "Comparative analysis of nonparametric change-point detectors commonly used in hydrology." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 64, No. 14, pp. 1690-1710. doi: 10.1080/02626667.2019.1669792.