



A study on determining threshold level of precipitation for drought management in the dam basin

Lee, Kyoung Do^a · Son, Kyung Hwan^{b*} · Lee, Byong Ju^c

^aCEO, HECOREA. INC, Seoul, Korea

^bPh.D., Water Resources Information Center, Han River Flood Control Office, Ministry of Environment, Seoul, Korea

^cDirector, HECOREA. INC, Seoul, Korea

Paper number: 20-019

Received: 5 March 2020; Revised: 23 March 2020; Accepted: 23 March 2020

Abstract

This study determined appropriate threshold level (cumulative period and percentage) of precipitation for drought management in dam basin. The 5 dam basins were selected, the daily dam storage level and daily precipitation data were collected. MAP (Mean Areal Precipitation) was calculated by using Thiessen polygon method, and MAP were converted to accumulated values for 6 cumulative periods (30-, 60-, 90-, 180-, 270-, and 360-day). The correlation coefficient and ratio of variation coefficient between storage level and MAP for 6 cumulative periods were used to determine the appropriate cumulative period. Correlation of cumulative precipitation below 90-day was low, and that of 270-day was high. Correlation was high when the past precipitation during the flood period was included within the cumulative period. The ratio of variation coefficient was higher for the shorter cumulative period and lower for the longer in all dam, and that of 270-day precipitation was closed to 1.0 in every month. ROC (Receiver Operating Characteristics) analysis with TLWSA (Threshold Line of Water Supply Adjustment) was used to determine the percentage of precipitation shortages. It is showed that the percentage of 270-day cumulative precipitation on Boryung dam and other 4-dam were less than 90% and 80% as threshold level respectively, when the storage was below the attention level. The relationship between storage and percentage of dam outflow and precipitation were analyzed to evaluate the impact of artificial dam operations on drought analysis, and the magnitude of dam outflow caused uncertainty in the analysis between precipitation and storage data. It is concluded that threshold level should be considered for dam drought analysis using based on precipitation.

Keywords: Dam, Mean area precipitation, Storage, Threshold level, ROC score

댐 유역 가뭄 관리를 위한 강수량 임계수준 결정에 관한 연구

이경도^a · 손경환^{b*} · 이병주^c

^a주식회사 헥코리아 대표이사, ^b환경부 한강홍수통제소 수자원정보센터 시설연구사, ^c주식회사 헥코리아 이사

요 지

본 연구에서는 댐 유역의 가뭄 관리를 위한 강수량의 적정 임계수준을 결정하였다. 5개 댐 유역(보령댐, 부안댐, 대청댐, 합천댐 및 용담댐)을 대상으로 일단위 저수량 및 강수량 자료를 수집하였고, 유역평균강수량을 계산하였다. 6개 누적기간(30, 60, 90, 180, 270 및 360일)의 값으로 변환하였고, 일 단위 저수량 및 누적강수량의 예년대비 백분율을 계산하였다. 강수량의 적정 누적기간 결정을 위해 상관성 및 변동성을 분석하였다. 모든 댐에서 90일 이하의 누적 강수량은 댐 홍수기를 제외하고는 상관성이 낮았고, 270일 누적 강수량의 상관성은 높았다. 누적기간 중에 댐 홍수기 강수량 값의 포함여부가 상관성에 큰 영향을 미친 것으로 확인되었다. 변동계수 비율은 누적기간이 짧을수록 비율이 크고 길수록 적었으며, 270일이 모든 월에서 1에 근접하였다. 댐 용수공급 조정기준을 이용한 ROC 분석을 통해 보령댐은 저수량이 관심단계 이하일 때 강수량의 임계수준은 270일 누적강수량의 백분율이 90% 이하, 4개 댐은 80% 이하로 나타났다. 인위적인 댐 운영이 가뭄분석에 미치는 영향을 분석하고자 강수량 백분율, 저수량 및 방류량 백분율의 거동을 분석하였다. 댐 방류량 조건은 강수량 및 저수량간의 연계분석에 불확실성을 야기하였다. 따라서 강수량을 활용한 댐 가뭄 분석을 위해서는 대상 댐유역에 대한 적정 임계수준 및 방류량 조건이 검토되어야 할 것이다.

핵심용어: 댐, 유역평균강수량, 저수량, 임계수준, ROC 점수

*Corresponding Author. Tel: +82-2-590-9976

E-mail: hydroskh@korea.kr (K. H. Son)

1. 서론

전 세계적으로 이상기후 및 기후변화로 인하여 가뭄피해가 지속적으로 증가하는 추세이다. 보통 국내에서의 가뭄은 5~7년 주기로 발생해 왔으나, 최근에는 주기가 짧아지고 국지적인 가뭄이 빈번하게 발생함에 따라 물 부족 피해가 증가하는 실정이다. 2010년 이후로 뉴스나 메스컴 등을 통해 매년 가뭄 피해와 관련한 소식이 보도되어 왔으며, 2014년부터 시작된 마른장마는 댐의 용수 공급 부족을 야기하였다. 실제로 2015년 보령댐의 저수율은 사상 최저치인 8.8%로 기록된바 있으며, 충남 서북부 지역 8개 시·군은 급수조정이 시작되었다. 또한, 2017년 전국 용수댐 저수율은 예년대비 71.1%였으며, 그 중 장성지역에 위치한 평립댐이 27.5%로 가장 낮은 저수량을 기록한바 있다. 향후에도 이러한 가뭄피해가 지속될 가능성을 간과할 수 없는 상황이며, 댐 유역의 가뭄관리를 위한 연구가 지속적으로 요구되는 실정이다.

가뭄은 강수량 부족에 따른 물수지 불균형 현상으로 정의되며(Maliva and Missimer, 2012), 가뭄의 시작은 강수량의 부족에서부터 비롯된다. 강수량은 가뭄관리에 있어 중요한 요소이며, 그동안 댐 관리 기관에서는 장기간의 강수량 부족이 댐 저수 상황에도 큰 영향을 미침에 따라 댐 가뭄 판단, 원인 분석 및 사전 감지를 위해 강수량을 활용해왔다. 다만, 댐 유역 및 유역외 지역에 대해서는 강수량을 구분하여 사용할 필요가 있는데, 예를 들어 강수량 보다는 저수량에 직접적인 영향을 받는 댐 유역의 경우 강수량 부족 시 저수량이 충분하다면 가뭄 지역으로 볼 수 없으나 자연하천 유역의 경우 약간의 강수량 부족에도 큰 영향을 받게 된다. 따라서 댐 가뭄 관리를 위해서는 댐 상황을 고려한 강수량 부족 정보를 생산 및 활용할 수 있는 기술이 필요하다.

가뭄 정보는 가뭄을 판단하기 위한 임계수준에 의해 가뭄 발생 여부가 결정된다. 여기서 임계수준이란 가뭄의 지속기간과 부족수준을 의미하며, 강수량의 경우 해당 기간을 기준으로 과거 누적기간 및 누적강수량의 예년대비 수준이 임계수준에 해당된다. 강수량 기반의 가뭄정보는 주로 SPI (Standardized Precipitation Index) 등의 가뭄지수(Mckee *et al.*, 1993) 및 예년대비 백분율 값이 활용되어왔으며, 수자원 관리기관의 경우 가뭄 상황에 대한 이해 및 분석의 편의를 위해 백분율을 주로 활용해왔다. 그러나 백분율 적용시 강수량 활용의 누적기간을 당해연도 시작부터 현재까지 또는 해당 일을 기준으로 30일 및 90일로 설정하는 등 다소 주관적이며, 가뭄 발생과 관련된 강수부족 백분율에 대한 명확한 기준 없이 활용하고 있다. 또한, 가뭄전망에서도 강수량 누적기간 결정은 전망의 정확도와도 밀접한 관련이 있음에도 불구하고(Son and Bae,

2015), 전국을 3, 6개월 누적값으로만 제시하고 있는 실정이다. 비록 댐 별로 수문기상 조건이 달라 분석에도 차이가 있겠으나, 가뭄 분석에 있어 대상 댐에 대한 강수량의 임계수준을 미리 설정하고 업무에 활용할 필요가 있다.

국외에서는 댐 유역에 강수량 활용의 불확실성을 정량적으로 검토하고 적정 누적기간 활용에 대한 연구를 다수 수행해왔다. Vicente-Serrano and López-Moreno (2005)는 다양한 강수량 누적기간에 따른 SPI 지수와 댐 유입량 및 저수량과의 상관성을 분석하였으며, Zhang *et al.* (2016)은 강수량과 댐 저수량에 대한 copula 함수를 이용한 결합확률분포를 유도하고 단일 및 결합 변수 활용에 따른 차이를 제시하였다. Wu *et al.* (2017)은 대 유역 댐을 대상으로 기상학적 가뭄과 수문학적 가뭄의 비선형 관계를 규명하였으며, Huang *et al.* (2017)은 기상학적 가뭄에서 댐 가뭄으로 전이되는 영향 인자를 제시한 바 있다. Wu *et al.* (2018)은 인위적인 댐 운영이 기상학적 가뭄 지수 활용에 미치는 영향을 분석하고자 여러 누적기간별 SPI 지수와 수문학적 가뭄지수의 상관성을 분석하였다. 국내에서는 3개월 누적 강수량의 SPI와 저수지 가뭄지수를 이용하여 기상학적 가뭄에서 농업적 가뭄으로 전이되는 현상을 제시한바 있으며(Yu *et al.*, 2018), 그 외에는 주로 하천 유역을 대상으로 기상학적 가뭄지수와 수문학적 가뭄지수를 활용하여 가뭄특성 분석 및 비교에 관한 연구가 수행되었고(So *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2015; Kim and Chung, 2018), 댐 가뭄 분석을 위한 강수량 활용에 관한 연구는 미흡하였다. 한편, K-water는 최근 지속되는 댐 가뭄 상황에 대응하기 위해 댐 유역 강수량이 부족할 경우에도 피해를 최소화 될 수 있도록 댐의 적정 용수 공급능력을 유지할 수 있는 댐 용수공급 조정기준을 마련하였다(K-water, 2016). 댐 용수공급 조정기준은 댐 가뭄의 객관적 판단을 유도함에 따라 댐 관리자의 즉각적인 가뭄 대응이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 이를 고려한 강수량 활용의 임계수준이 설정된다면 댐 가뭄 분석 및 예보에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 댐 용수공급 조정기준을 고려하여 강수량의 적정 임계수준을 결정하고자 한다. 본 논문의 2장에서는 대상 유역 및 자료 현황과 방법론을 설명하고, 3장에서는 강수량 활용의 적정 누적기간 및 예년대비 기준을 제시하였다. 4장에서는 본 연구에서 개발한 주요 연구 결과를 요약 기술하였다.

2. 연구방법

연구수행 절차는 Fig. 1과 같으며, 유역평균강수량의 누적기간별 누적강수량으로 변환, 댐 저수량 및 누적강수량의 예

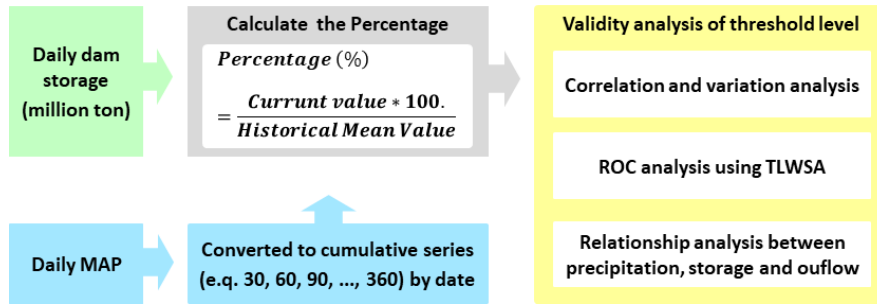


Fig. 1. Procedure of validity analysis of cumulative precipitation threshold level

Table 1. The characteristics of study area

Dam	Area (km ²)	Total Storage (A) (10 ⁶ m ³)	Total distribution (B) (10 ⁶ m ³)	Data period (year)
Buan	59.0	50.3	35.1	2000~2019
Boryung	163.6	116.9	106.6	1999~2017
Daechong	4,134.0	1,490.0	1,649.0	1988~2019
Habcheon	925.0	790.0	599.0	1990~2019
Yongdam	930.0	815.0	650.4	2003~2019

년대비 백분을 산정, 누적강수량 임계수준의 유효성 분석으로 구성된다. 유역평균강수량 산정을 위해 대상유역에 속한 관측소별 일 단위 강수량 자료를 활용하였으며, 현업 운영을 고려하고자 6개 누적강수량 값을 일별로 계산하였다. 임계수준은 강수량의 누적기간 및 예년대비 백분을 기준이며, 유효한 누적기간 결정을 위해 상관성 및 변동성 분석, 백분율 기준 결정에는 ROC 분석을 이용하였다. 또한, 댐 운영으로 야기되는 임계수준 활용의 불확실성을 분석하고자 댐 유역의 강수량, 저수량 및 방류량에 대한 관계를 비교분석 하였다.

2.1 대상유역 및 자료

본 연구의 대상유역은 장기간 양질의 수문 자료가 활용가능 하고, 용수공급 조정기준이 선정된 댐 이며, 단일 및 다중 댐 운영 여부가 명확하게 구분되어야 한다. 다중 댐 운영이란 하류 용수공급을 위해 2개 이상의 댐의 연계운영 및 댐 간에 도수관로가 연결되어 공동 운영되는 댐을 의미하며, 그 예로 하류 팔당댐으로 두 댐의 저수상황을 고려하여 용수를 교차공급하는 충주댐·소양강댐, 댐 저수지 간에 도수로가 연결되어 공동 운영되는 주암댐(본댐, 조절지댐)과 안동·임하댐이 있다. 이 댐들은 가뭄상황 판단 및 용수공급 조절을 위해 동일한 기준이 적용됨에 따라 강수량 분석에 어려움이 있어 제외하였다. 본 연구에서는 K-water에서 관리하는 다목적댐들 중에서 수문자료의 가용성 및 단일 댐 운영 여부를 고려하여 5개의 댐을 대상 댐 유역으로 선정하였으며, 댐별 주요 특성은 Table 1 과 같다. 여기서 총 배분량(Total distribution)은 댐에서 연간

공급하는 생·공·농업 및 하천유지용수를 의미한다. 한편, 보령댐의 경우 가뭄 시 금강에 위치한 백제보 하류 하천수 활용을 위해 도수로가 연결되어 있어 대상유역으로는 부적절하나, 2010년 이후 댐 가뭄이 빈번하게 발생하여 분석에 중요한 유역이라 볼 수 있다. 따라서 도수로가 본격 운영되기 전까지 (2017년)를 분석 기간으로 선정하고 대상유역에 포함하였다.

기초자료로는 일 단위 강수량과 댐 저수량 자료이며, 강수량의 경우 기상청 종관기상관측소(Automated Synoptic Observing System) 및 환경부 4개 홍수통제소에서 관리하는 강수량 관측소 자료, 저수량은 K-water에서 제공하는 5개 댐별 저수량 자료를 수집하였다. 유역평균강수량 산정을 위한 자료 기간은 1988년부터 2019년까지이며, 연도별 증가하는 관측소 개소수를 고려하고자 매년 티센계수를 산정하여 계산에 활용하였다. 저수량은 댐 준공부터 저수지의 안정적 운영 이후 기간의 자료를 수집하였으며, 각 댐별 자료기간은 Table 1에 명시하였다.

2.2 댐 용수공급 조정기준

댐 용수공급 조정기준은 환경부 주관의 댐·보 연계운영 중앙협의회 의결에 의해 2015년 3월부터 시행되었으며, 2년간의 시범운영과 성과 검토 등을 통해 지속적으로 보완되어 왔다. Fig. 2는 보령댐의 용수공급 조정기준을 예로써 나타낸 것이다. 댐 용수공급 조정기준은 저수량을 4단계(관심·주의·경계·심각) 기준선으로 구분하여 공급량을 조정하며, 용수공급 조정기준 선 결정 방법은 유입량 계산, 실수요량 반영 및 이수안

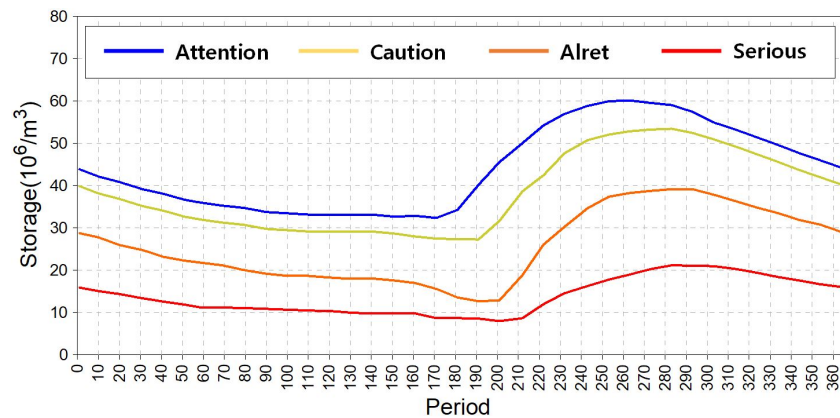


Fig. 2. The TLWSA on Boryung dam

전도 계산을 통해 결정된다. 유입량 결정을 위해 연도별 해당 일에 대한 과거 관측 유입량은 추계학적 모형이 탑재된 SAMS (Stochastic Analysis Modeling and Simulation) 프로그램에 의해 500개의 값들로 재산정 된다. 이수안전도는 20년에 1회 물 부족을 허용하는 조건으로 계산되며, 댐 저수지 모의운영을 통해 유입량과 실제 용수사용량이 반영된 수요량을 이용하여 단계별 저수량을 찾게 된다. 관심단계에서는 댐 가뭄의 시작단계로 미계약된 용수공급 감량, 주의단계에서는 관심단계 유지 및 하천유지용수 100% 및 용수별 여유량 감량, 경계단계에서는 주의단계 유지 및 농업용수를 단계적으로 감량 그리고 심각단계에서는 경계단계 유지 및 농업용수 100% 및 생·공용수 20%를 감량하게 된다.

용수공급 조정기준에 의하면 관심단계가 댐 가뭄의 시작, 주의단계부터 용수 감축이 시작됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 대상 댐 유역별 과거 기록된 저수량과 댐 용수공급 조정기준 선을 시계열로 도시한 후, 저수량이 관심단계 이하에 도달한 경우를 가뭄 시작 기간으로 선정하였다. 또한, 댐 유역에 가뭄과 관련이 있는 강수 부족량을 산정하고자 ROC 분석을 통해 관심단계에 가장 적합한 누적 강수량 백분율 값을 선정하였으며, ROC 분석에 관한 구체적인 이론 및 내용은 다음 절에 기술하였다.

2.3 강수 누적기간 및 예년대비 기준 결정

강수의 누적기간 결정을 위해 본 연구에서는 상관계수 및 변동계수 비율(Cv_R)을 이용하였다. 상관계수는 -1과 +1 사이의 값을 가지는 무차원 계수로서 표준편차의 비율을 이용하여 강수량과 저수량 예년대비 값의 크기와 모양의 일치 정도를 동시에 파악할 수 있는 지표이다. 상관계수 적용을 위해 일별로 누적기간에 따른 강수량의 예년대비 백분율과 저수량의 예년대비 백분율을 각각 계산하였으며, 어느 특정 누적 강

수량에 대한 상관계수가 +1에 가장 가까울 경우 해당 강수량이 저수량에 잘 일치한다고 평가된다.

저수량은 이수기 및 홍수기에 변동성이 달라 이를 적절히 반영하는 강수 누적기간을 찾는 것이 필요하다. 본 연구에서는 Eqs. (2) and (3)과 같이 저수량과 누적기간별 누적 강수량에 대한 변동계수를 각각 계산하고 Eq. (1)의 변동계수 비율을 산정하였다. 변동계수 비율이 1에 근접할수록 해당 누적기간의 강수량이 저수량의 변동성을 적절히 반영한다고 평가된다.

$$Cv_R_{i,t} = PPTN_Cv_{i,t} / STRG_Cv_t \quad (1)$$

$(i = 30, 60, \dots, 360; t = 1, 2, \dots, 365)$

$$STRG_Cv_t = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n (s_{t,j} - \bar{s}_t)^2 / n}}{\bar{s}_t} \quad (2)$$

$$PPTN_Cv_{i,t} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n (p_{i,t,j} - \bar{p}_{i,t})^2 / n}}{\bar{p}_{i,t}} \quad (3)$$

여기서, $STRG_Cv$ 는 저수량에 대한 변동계수, $PPTN_Cv$ 는 강수량에 대한 변동계수, i 는 누적기간, t 는 해당 일, j 는 예년의 첫 번째 연도, s 는 일 단위 저수량, p 는 누적강수량 그리고 n 은 예년기간의 연도 개수를 의미한다.

댐 가뭄판단을 위한 강수량의 적정 예년대비 수준을 결정하고자 본 연구에서는 Wilks (2006)이 제시한 ROC 분석을 이용하였다. ROC 분석은 주로 기상분야에서 확률예보의 정성적 검증에 활용되는 기법이나 (Mason, 1982; KMA, 2010), 가뭄지수의 활용성 평가 (Kim and Lee, 2011) 및 가뭄판단기준 제시 (Bae et al., 2013)에 활용된바 있다. 이를 위해 선정된 누

적기간 강수량의 예년대비 비율, 댐 저수량 및 댐 용수공급 조정기준을 이용하였다. 가뭄 판단을 위한 강수량 예년대비 백분율 범위를 0~100%로 미리 설정한 후, 해당 범위 내에서 댐 저수량이 관심단계 이하이고 강수량도 해당 비율 이하인 경우 Hit (H), 이상인 경우는 Missing (M), 반면에 강수량이 해당 비율 이하이고 저수량은 관심단계 이상일 경우 False (F), 모두 아닌 경우 Negative hit (N)로 분류된다. 이 4가지 요소를 이용하여 Eqs. (4) and (5)와 같이 적중률(Hit rate, HR)과 비적중률(False Alarm Rate, FAR)을 산정할 수 있다. 값의 범위는 0~1 사이의 값을 가지며, 완벽히 일치할 때 HR=1, FAR=0 (Missing=0 & False=0)이다. Wilk (2006)은 Eq. (6)과 같이 HR 및 FAR을 대표하는 ROC score를 제안한바 있으며, 값이 1.0일 경우 완벽, 0.5 이하일 경우 불일치한 것으로 간주한다.

$$HR = H / (H + M) \tag{4}$$

$$FAR = F / (F + N) \tag{5}$$

$$ROC\ score = \frac{1}{2}(HR \times FAR) + \frac{1}{2}\{(HR + 1)(1 - FAR)\} \tag{6}$$

3. 결과 및 분석

3.1 적정 누적기간 결정

댐 가뭄 관리를 위한 강수량 누적기간의 적정 임계수준을 결정하고자 댐의 예년대비 저수량을 기준으로 6개 누적기간별 강수량의 예년대비 값에 대한 상관성을 분석하였다. Fig. 3은 각 댐별로 매일 계산된 누적기간별 상관계수의 월별 평균 값을 도시한 것이다. 부안댐은 30일과 60일의 상관계수가 모든 월에서 0.60이하로 나타나 활용성이 낮은 것으로 확인되었으며, 90일도 특정 월을 제외하고는 상관성이 낮게 나타났다. 그러나 180일의 경우 3, 4 및 8월, 270일의 경우 5월 및 8월을 제외하고는 모두 0.6에 근접하거나 그 이상의 값이 산정되었고, 360일에서는 6월과 9월~12월을 제외하고는 상관성이 낮게 산정되었다. 보령댐의 경우 30~90일은 1월~6월 및 11월, 12월에 상관성이 낮았으며, 180일은 3~6월을 제외하고는 상관성이 높게 나타났다. 270일 및 360일은 모든 월에서 상관계수가 0.60 이상으로 나타나 활용성이 높은 것으로 확인되었다. 대청댐의 경우 30~90일의 상관계수가 1~6월에는 낮았으며, 180일은 3월을 제외하고는 270일과 같이 모든 월에서 상관성이 높게 산정되었다. 합천댐의 경우도 보령댐과 같이

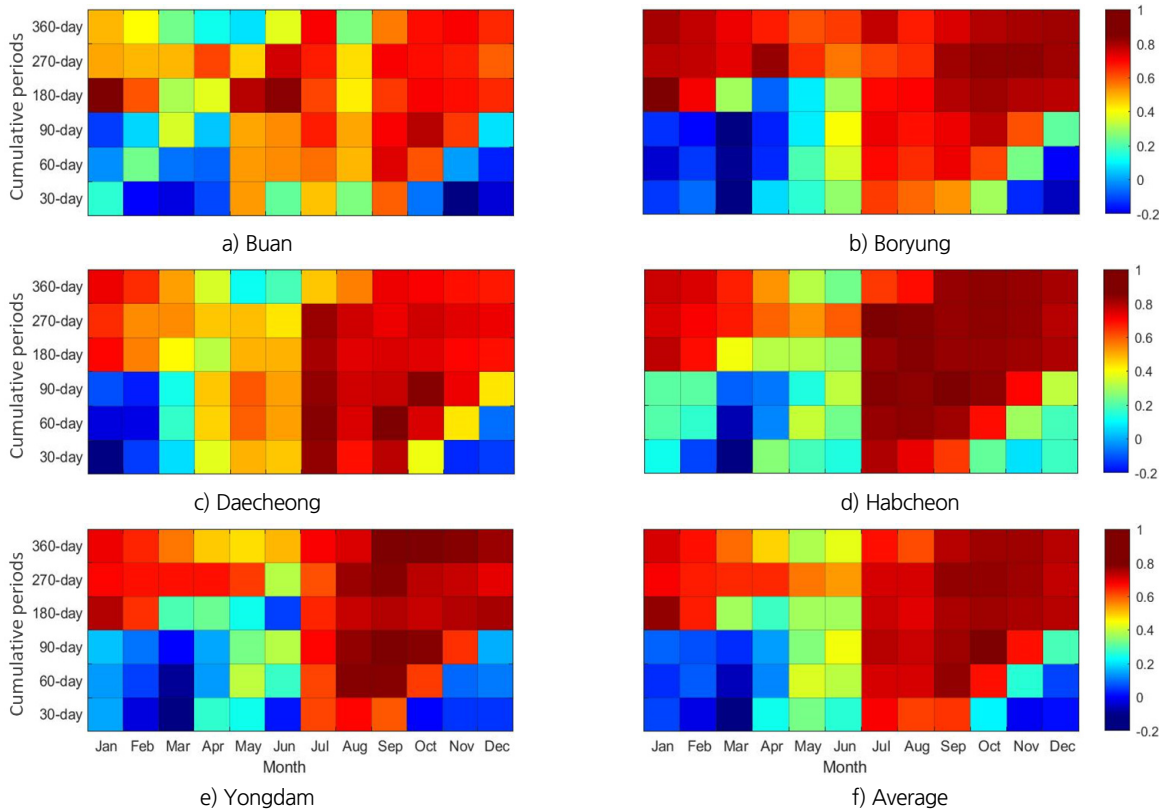


Fig. 3. The result of correlation analysis between precipitation and storage percentage

30일은 7~9월, 60일은 7~10월, 90일은 7~11월을 제외하고는 상관성이 낮게 나타났다. 180일은 3~6월, 360일은 5~6월을 제외하고는 상관성이 높게 나타났으며, 270일의 경우 모든 월에서 상관계수가 0.60 이상으로 상관성이 높은 것으로 확인되었다. 용담댐의 경우도 합천댐의 결과와 유사하였으며, 270일 및 360일의 상관성이 대체로 높은 것으로 확인되었다.

평균적으로 30~90일 누적강수량은 1~6월 및 12월, 180일은 3~6월에 상관성이 낮게 나타났는데, 이는 누적기간 내에 댐 홍수기인 6월 중순~9월 중순의 강수량 포함 여부가 저수량과의 상관성 결정에 큰 영향을 미친다고 판단된다. 즉, 11월을 기준으로 60일 누적강수량은 10월, 90일은 9~10월, 180일은 6~10월의 강수량이 활용되며, 6~9월 강수량이 포함되지 않은 60일의 상관계수가 가장 낮았다. 또한, 6월을 기준으로 270일 및 360일과 달리 전년도 6~9월 강수량이 포함되지 않은 180일 이하 누적강수량의 상관계수가 낮게 산정됨을 볼 수 있다.

통상 국내에서는 가뭄 분석 시, 주로 3개월 누적 강수량이 주로 활용되어 왔으나(So et al., 2014; Kown et al., 2018), 댐 유역에서는 홍수기를 제외하고는 상관성이 낮았다. 또한 360일 누적강수량의 경우 댐 홍수기의 강수량이 포함되었을 지라도 270일에 비해 상관성이 낮음을 알 수 있었다. 이를 분석하고자 본 연구에서는 각 댐별 누적기간에 따른 변동계수 비율을 산정하였으며, 연평균 값으로 변환하여 Table 2에 명시하였다. 5개 댐 모두 누적기간이 짧을수록 변동계수 비율이 높고 누적기간이 길수록 비율이 낮았다. 270일 누적강수량의 비율이 1에 가장 근접하였으며, 360일 누적강수량은 30~180일 누적강수량에 비해서는 1에 더욱 근접하였으나 부안댐을 제

외한 4개 댐에서 비율이 1 이하로 낮게 산정된 것으로 나타났다. 360일 누적강수량은 상대적으로 누적기간이 길어서 낮은 변동폭을 야기하여 저수량의 변동성을 적절히 반영하지 못한 것으로 판단된다.

Fig. 4는 변동계수 비율을 월별로 상세히 검토하고자 합천댐에 대해 20년 평균 일 강수량 및 저수량을 도시한 것이다. 합천댐 저수량은 평균적으로 7~9월까지 증가하고 나머지 9개월 동안은 용수공급으로 점차 감소하는 것을 볼 수 있는데 7~9월에 3개월 누적 강수량의 변동계수 비율은 1에 근접하였으나, 이외 기간에서는 1 이상으로 값이 크게 산정된 것으로 나타났다. 즉, 댐 홍수기에 속한 7~9월은 1년 중 강수량 및 저수량의 변동이 가장 큰 기간임에 따라 이 시기 1~3개월 누적 강수량의 활용은 가능할지라도 그 외 기간에서는 강수량의 변동이 저수량 보다 높아 활용이 어렵다고 볼 수 있다. 따라서 저수량과의 변동성 분석에서도 270일이 대체로 모든 월에서 1에 근접한 것으로 나타나 임계수준으로써 활용성이 높다고 판단되며, 다른 4개 댐의 결과도 이와 유사한 것으로 확인되었다.

Table 2. The annual mean ratio of variation coefficient in 5 dam basins

Dam	Cumulative periods of precipitation					
	30-day	60-day	90-day	180-day	270-day	360-day
Buan	8.4	6.8	5.6	3.3	1.0	1.7
Boryung	5.9	4.7	3.9	2.2	1.1	0.5
Daecheong	5.6	4.6	3.8	2.1	1.0	0.5
Habcheon	7.0	5.8	4.8	2.4	1.2	0.6
Yongdam	6.9	5.6	4.6	2.5	1.2	0.6

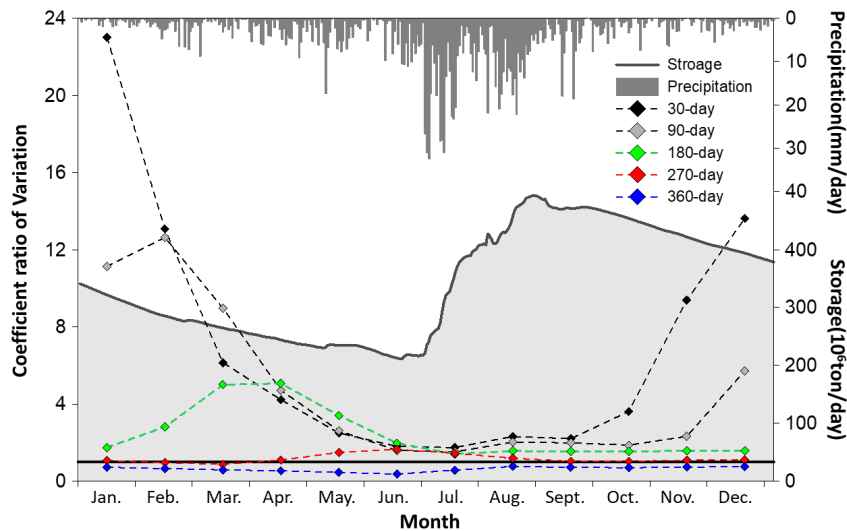


Fig. 4. The comparative analysis of precipitation, storage and coefficient ratio of variation on Habcheon dam

3.2 적정 예년대비 수준 결정

본 연구에서는 ROC 분석을 통해 5개 댐에 대해 시계열 저수량 및 9개월 누적 강수량 백분율, 댐 용수공급기준을 이용하였다. 저수량의 관심단계와 관련 높은 백분율 값이 임계수준이 되며, 이를 선정하고자 예년대비 백분율 설정을 100%에서 0%까지 10%씩 감소시켜가며 HR 및 FAR을 산정하였다(Fig. 5). 관심단계일 때 예년대비가 40% 이하인 강수량이 전무하여 그림에서 제외하였다. 만약 X축의 FAR이 0에 근접할 경우 두 값 모두 가뭄이 아니라 해석한 것이고, Y축의 HR이 1에 근접하다는 것은 관심단계에 강수량이 가뭄으로 나타낸 경우이다. 따라서 완벽한 ROC는 X축 값이 0에, Y축 값이 1에 근접할 경우 성립된다. 다만, 두 값이 완벽히 일치하는 경우는 드물기 때문에 기존 연구에서 활용된 적정 유의수준(HR 0.70 이상, FAR 0.30 이하)을 적용하였다(Bae et al., 2013). 강수량 백분율 기준이 50~60%인 경우 HR 및 FAR 모두 0에 근접하였는데 관심단계 이상인 경우 해당일의 강수량 백분율이 50~60% 이상이었으나, 관심단계 이하인 경우에도 이상으로 나타나 정확도가 낮다고 볼 수 있다. 또한, 기준이 100%인 경우 HR이 1에 근접하고 FAR이 0.3 이하로 나타났는데 관심단계 이하일 때 강수량 백분율도 100% 이하였으나, 저수량이 관심단계

이상인 경우에도 100% 이하로 나타나 적절치 않은 것으로 확인되었다. 강수량 백분율 기준이 70%에서는 HR 및 FAR이 낮게 산정되어 정확도가 낮았으며, 80~90%에서는 HR 및 FAR은 대부분의 댐들이 유의수준 내에 범주하여 다른 기준들보다 저수량의 관심단계 상황을 가장 잘 고려한다고 판단된다.

구체적인 결과 검토를 위해 각 댐별 ROC score를 산정하였으며, Table 3에 명시하였다. 보령댐의 경우 예년대비 60~100%에서의 ROC score가 0.55~0.87로 예년대비 90%일 값이 가장 높았으며, 부안댐은 ROC score가 0.49~0.83으로 예년대비 80%, 대청댐은 ROC score가 0.58~0.81로 예년대비 80%, 합천댐은 ROC score가 0.68~0.84로 예년대비 80% 그리고 용담댐은 ROC score가 0.73~0.85로 예년대비 80%에서 값이 가장 높게 산정되었다. 댐별로는 보령, 용담, 합천, 부안 및 대청댐 순으로 보령댐의 ROC score가 가장 높은 것으로 확인되었다.

다만, ROC score가 1에 근접한 댐은 없었으며, 본 연구에서는 원인 분석을 위해 강수량의 가뭄 여부에 따라서 저수량 및 방류량 거동을 분석하였다. Fig. 6은 합천댐을 대상으로 시계열 270일 누적강수량의 예년대비 값이 80% 이상(Wet) 및 80% 이하(Dry)인 조건에서 댐 용수공급 조정기준에 따른 저수율의 거동과 누적기간 30일의 예년대비 총 방류량의 백분율을 도시한 것이다. 92~93년에는 Dry 기간일 지라도 예년대비는 방류량에 의해 저수량이 92년 6월에 잠시 관심단계 이상으로 상승하였으며, 94~97년, 08~10년에서도 이와 유사한 거동을 보였다. 또한, 01~02년 및 15~16년에서는 Dry 기간임에도 적은 방류 영향으로 관심단계 이상의 저수량을 유지하였다. 반면, 04년도에는 Dry 기간이 짧았으나 예년보다 많은 방류량에 의해 저수량이 관심단계에 도달하였으며, 특히 04년 및 13년도는 Wet 기간임에도 많은 방류량으로 관심단계에 도달한 것으로 확인되었다. 다른 4개 댐들에서도 유사한 결과가 확인되어 방류 조건은 강수량 활용에 많은 불확실성을 야기한다고 볼 수 있다. 댐 가뭄 분석 시 예년대비 방류량의 수준도 같이 고려할 필요가 있다고 판단된다.

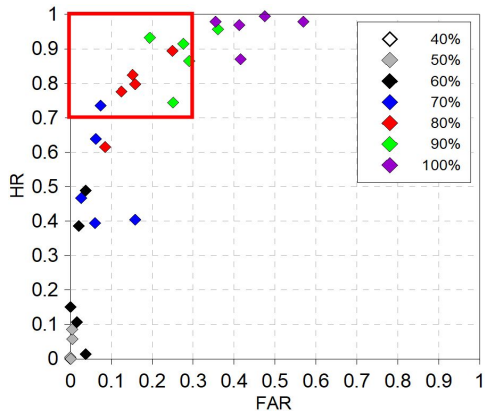


Fig. 5. The result of ROC analysis considering TLWSA and Precipitation Percentage

Table 3. ROC score for each dam

Percentage (%)	Dam				
	Buan	Boryuon	Dacheong	Habcheon	Yongdam
50	0.50	0.50	0.50	0.53	0.54
60	0.49	0.55	0.58	0.68	0.73
70	0.62	0.67	0.72	0.79	0.83
80	0.83	0.83	0.81	0.84	0.85
90	0.80	0.87	0.75	0.80	0.79
100	0.71	0.81	0.70	0.78	0.76

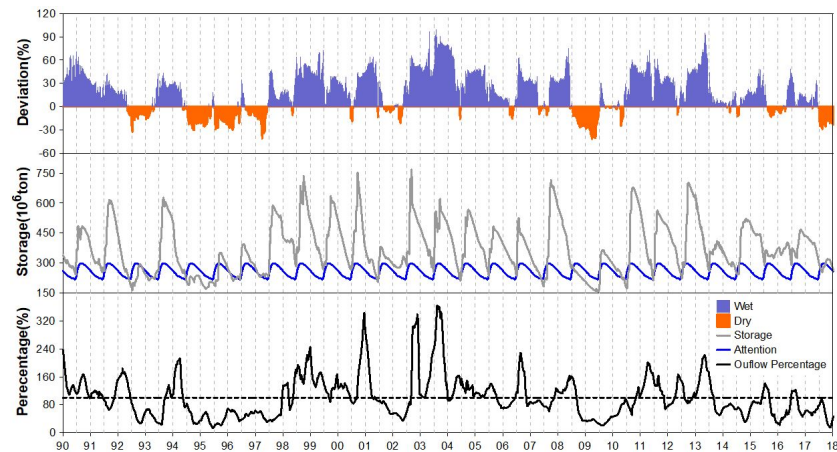


Fig. 6. Temporal analysis of storage, percentage of precipitation and outflow on the wet & dry condition in Habcheon dam

4. 결론

본 연구에서는 강수량을 활용한 댐 유역 가뭄 분석을 위해 임계수준인 누적기간과 예년대비 수준을 결정하고 결과를 분석하였다. 5개 댐 유역에 일 단위 저수량 자료를 수집하고 유역 평균강수량을 산정하였다. 일별 저수량과 누적강수량의 예년대비 백분율을 계산하였으며, 적정 누적기간을 결정하고 자 상관성 및 변동성 분석을 수행하였다. 강수량 부족의 예년대비 수준을 결정하고자 강수량 예년대비 백분율과 댐 용수공급 조정기준을 이용하여 ROC 분석을 수행하였다. 본 연구에서 분석된 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 상관성 분석결과 누적기간 30~90일 강수량은 1~6월 및 12월, 180일은 3~6월에 0.40 이하, 270일은 모든 월에서 상관계수가 0.60 이상, 360일은 5월을 제외하고는 0.40 이상으로 산정되었다. 누적기간 내에 댐 홍수기인 6월말~10월초의 강수량 포함 여부가 저수량과의 상관성 결정에 밀접한 관련이 있는 것으로 확인되었다.
- 2) 연평균 변동계수 비율을 분석한 결과 누적기간이 짧을수록 비율이 크고, 기간이 길수록 비율이 적었다. 360일 누적강수량은 상대적으로 누적기간이 길어서 낮은 변동폭을 야기하여 저수량의 변동성을 적절히 반영하지 못한 것으로 확인되었다. 합천댐에 대한 월별 변동계수 비율을 분석하였다. 누적기간 90일 이하는 댐 홍수기인 7~9월에 변동계수 비율이 1에 근접하였으나, 그 외의 기간에서는 변동성이 높게 나타났다. 그 외에 180일 누적 강수량도 6월 이전에는 변동성이 높았다. 270일이 모든 월에서 1에 근접한 것으로 나타나 임계수준으로써 활용성이 가장 높은 것으로 판단된다.

- 3) ROC 분석을 통해 과거 댐 저수량이 관심단계 이하인 경우에 점수가 높게 산정되는 강수량 예년대비 백분율을 선정하였다. 모든 댐이 예년대비 50% 이하에서는 유의수준을 만족하지 못하였으며, 보령댐은 예년대비 90%, 부안댐, 대청댐, 합천댐 및 용담댐은 예년대비 80%에서 ROC score 가 높게 산정되었다. 모든 댐의 예년대비 수준이 일치하지 않음에 따라 강수량을 활용에 있어 대상 댐에 적합한 임계수준 결정이 요구된다.
- 4) 강수량에 의한 가뭄 여부에 따라 저수량과 방류량을 분석하였다. 가뭄인 경우 저수량도 관심단계에 진입하였으나, 예년보다 적은 방류량으로 일부 기간에서는 관심단계 이상의 거동을 보였다. 반대로, 가뭄이 아닌 경우에도 많은 방류로 인해 관심단계에 도달하는 경우도 발생하였다. 인위적인 댐 방류는 강수량 활용의 불확실성을 야기함에 따라 가뭄 분석 시, 예년대비 방류량의 수준도 같이 고려할 필요가 있다고 판단된다.

본 연구에서는 댐 가뭄 관리를 위한 강수량의 적정 임계수준을 명확히 제시하였으며, 특히 강수량과 댐 용수공급 조정기준의 연계 분석 및 결과는 현업 활용에 큰 의미가 있다고 판단된다. 다만, 댐 용수공급 조정 기준은 수문기상 여건 변화 및 정책 기조에 따라 주기적으로 갱신되며, 현재의 댐 용수공급 조정 기준을 과거에 적용했을 때 실제 가뭄 상황을 명확히 대변하지 못하는 경우가 있을 수 있다. 또한, 기준 변경 시에도 본 연구 방법을 통해 임계수준의 지속적인 업데이트가 필요하다. 향후 다중 운영 댐 유역에 대한 분석이 필요하며, 댐 용수공급 조정기준과 SPI 지수에 대한 비교평가도 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 스마트시티 혁신성장동력 프로젝트 지원으로 수행되었음(과제 번호 20NSPS-B149842-03).

References

- Bae, D.H., Son, K.H., and Kim, H.A. (2013). "Derivation & evaluation of drought threshold level considering hydro-meteorological data on South Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 3, pp. 287-299.
- Huang, S., Li, P., Huang, Q., Leng, G., Hou, B., and Ma, L. (2017). "The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors." *Journal of Hydrology*, Vol. 547, pp. 184-195.
- K-water (2016). *Improving water supply adjustment criteria against dam water shortage*. K-water, pp. 116-120.
- Kim, G.S., and Lee, J.W. (2011). "Evaluation of drought indices using the drought records", *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 8, pp. 639-652.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2010). *Research of precise long-term forecast techniques based on UM Atmospheric model*. Korea Meteorological Administration, pp. 155-161.
- Kown, M.S., Sung, J.H., Kim, T.W., and Ahn, J.H. (2018). "Drought assessment by bivariate frequency analysis using standardized precipitation index and precipitation deficit: Focused on Han river basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 10, pp. 875-886.
- Lee, B.R., Sung, J.H., and Chung, E.S. (2015). "Comparison of meteorological drought and hydrological drought index." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 1, pp. 69-78.
- Maliva, R., and Missimer, T. (2012). *Arid Lands Water Evaluation and Management*. Environmental Science and Engineering, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 21-39.
- Mason, I.B. (1982). "A model for assessment of weather forecasts." *Australian Meteorological Magazine*, Vol. 30, pp. 291-303.
- Mckee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration of time scales." *8th Conference on Applied Climatology*, Anaheim, C.A, U.S., pp. 179- 184.
- So, J.M., Son, K.H., and Bae, D.H. (2014). "Estimation and assessment of bivariate joint drought index based on copula functions." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 2, pp. 171-182.
- Son, K.H., and Bae, D.H. (2015). "Applicability assessment of hydrological drought outlook using ESP method." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 7, pp. 581-593.
- Vicente-Serrano, S.M., and López-Moreno, J.I. (2005). "Hydrological response to different time scales of climatological drought: An evaluation of the standardized precipitation index in a mountainous mediterranean basin." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 9, pp. 523-533.
- Wilks, D.S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, Cambridge, pp. 293-298.
- Wu, J., Chen, X., Yao, H., Gao, H., Chen, Y., and Liu, M. (2017). "Non-linear relationship of hydrological drought responding to meteorological drought and impact of a large reservoir." *Journal of Hydrology*, Vol. 551, pp. 495-507.
- Wu, J., Liu, Z., Yao, H., Chen, X., Chen, X., Zheng, Y., and He, Y. (2018). "Impacts of reservoir operations on multi-scale correlations between hydrological drought and meteorological drought." *Journal of Hydrology*, Vol. 563, pp. 726-736.
- Yu, M.S., Cho, Y.H., 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.
- Zhang, R., Chen, X., Cheng, Q., Zhang, Z., and Shi, P. (2016). "Joint probability of precipitation and reservoir storage for drought estimation in the headwater basin of the Huaihe River, China." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 30, pp.1641-1657.