표준강수증발산지수와 댐 방류에 따른 저수량 변화의 통계적 분석

Statistical Analysis of Changes in Reservoir Storage According to Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Dam Water Release

김병일* · 정도범** · 신사철***

Kim, Byungil*, Chung, Do Bum**, and Shin, Sha Chul***

Abstract

Since drought can't be solved technically once it occurs, it is important to anticipate and prepare for the drought before it occurs. This study statistically investigates the relationship between dam reservoir storage, standard precipitation evapotranspiration index, and dam water release conditions using regression analysis. 208 annual data from 6 multi-purpose dams with over 30 years in South Korea is collected and analyzed. The analysis indicates that the standard precipitation evapotranspiration index with a long-term time scale has a predictive power on dam reservoir storage. The larger the amount of average monthly discharge in August and October, the more water will be stored in April of the following year. Floodgate discharge in September is also related to the dam water storage. Using these results, we can estimate the possibility of drought in the next year, and if the possibility is high, we can find out how to improve resilience against drought by controlling the dam discharge conditions.

Key words : Drought, Dam, Standard Precipitation Evapotranspiration Index, Regression Analysis

요 지

가뭄은 일단 발생하면 공학적으로 해소할 수 있는 방안이 제한적이므로 발생 이전에 이를 예상하고 대비하는 위험관리가 중요하다. 이에 본 연구는 회귀분석을 이용하여 댐 저수량과 표준강수 증발산지수(SPEI) 및 댐 방류량의 관계를 통계적으로 조사한다. 30년 이상의 운영 자료를 보유한 6개 다목적댐의 208개의 연간 수문자료를 수집하여 분석한다. 장기 시간 척도를 갖는 표준강수 증발산지수는 댐 저수량에 대한 예측력을 갖는다는 결과가 도출되었다. 또한 8월 및 10월에 하천 유량을 유지하기 위하여 일상적으로 방류하는 양이 클수록 다음해 4월에 저수량이 많다는 결과를 얻었다. 9월에 홍수가 발생할 경우 홍수조절을 위한 수문방류량도 저수량과 관련이 있음을 통계적으로 확인하였다. 이 결과는 홍수와 가뭄을 동시에 대비하기 위한 다목적댐의 운영 방안을 제시하는 데 기여할 수 있을 것이다.

핵심용어 : 가뭄, 댐, 표준강수 증발산지수, 회귀분석

1. 서 론

가뭄은 강수량 부족이 지속되는 현상으로 홍수 혹은 지진과는 달리 수개월, 지역에 따라 수년 동안 발생하기도 하는

자연재해이다. 어느 지역에서 가뭄이 발생하면 경제적, 사회적, 환경적 및 상수도 운영상의 피해가 심각하게 발생할 수 있다. Swiss Re(2017)는 2016년도에 전 세계에서 발생한 자연재해로 인한 손실 중 보험에 가입된 금액을 집계하였는

*정회원, 안동대학교 토목공학과 조교수(E-mail: bkim@anu.ac.kr)

Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Andong National University

**한국과학기술정보연구원 온라인창업지원센터 선임연구원(E-mail: dbchung@kisti.re.kr)

Senior Researcher, Div. of Online Startup Support Center, Korea Institute of Science and Technology Information

***교신저자, 정회원, 안동대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-54-820-5595, Fax: +82-54-820-6255, E-mail: scshin@anu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Andong National University

데 가뭄은 미화 46.64억 달러의 손실을 초래하였다. 이 수치는 홍수로 인한 손실액의 약 80%에 달한다.

일반적으로 가뭄은 기상학적 가뭄(meteorological drought), 수문학적 가뭄(hydrological drought), 농업적 가뭄(agricultural drought) 및 사회경제적 가뭄(socioeconomic drought) 등으로 구분된다(Wilhite and Glantz, 1985; Correir et al., 1991). 본 연구에서 대상으로 하고 있는 기상학적 가뭄은 물의 부족이 수요에 대한 공급의 부족 현상에서 발생하는 것이므로 가뭄은 평균 강우량과의 비교를 통해 평가될 수 있다. 이와 같은 관점에서 많은 가뭄지수가 제안되었다(Sahoo, 2015; Vicente-Moreno et al., 2012; Heim, 2000; Rajsekhar et al., 2015). 그 중 가장 대표적인 기상학적 가뭄지수는 McKee et al.(1993)에 의해 제안된 SPI(Standardized Precipitation Index)로서 시간 간격에 따라 합산한 강수량이 평년치와 얼마나 적거나 많은지를 계량화한다. 그러나 이러한 SPI의 가장 큰 한계는 증발산에 대한 고려없이 단지 강수량만을 이용하여 산정한다는 것이다(Vicente-Serrano et al., 2012; McKee et al., 1993). 이에 Vicente-Serrano et al.(2010)은 표준강수증발산지수(SPEI, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)를 제안하였으며 이 지수는 SPI에 수문학적 접근을 접목시킨 것으로 평가되고 있다.

기존에 기상학적 가뭄을 적용하여 수문학적 가뭄을 파악하기 위한 연구로서 Vasiliaddes and Loukas(2009)는 SPI와 수문학적 가뭄지수인 PDSI(Palmer, 1965)와의 상관성을 분석하였고, Dai(2011)는 PDSI와 연 유입량과의 상관성을 전 세계의 대표유역에 적용하여 비교하기도 하였다. 또한 Lee et al.(2015)은 하천수 가뭄지수인 SDI(Streamflow Drought Index, Nalbantis and Tsakiris, 2009)와 SPEI와의 상관성을 조사하여 매우 높은 관련이 있음을 확인하였으나 수문학적 가뭄을 정확히 파악하기에는 한계가 있음을 제시하였다. 또한 Kim et al.(2012; 2013)은 SPEI를 이용하여 우리나라 가뭄을 평가하기도 하였다.

한편 가뭄은 일단 발생하면 공학적으로 취할 수 있는 방안이 매우 제한적이다. 따라서 가뭄은 발생 이전에 이를 예상하고 대비하는 위험관리가 매우 중요하다. 또한 대표적인 홍수 및 가뭄 대비 수단인 댐의 경우 그 효용은 제로섬(zero-sum)과 같아서 치수능력이 강화될수록 이수능력이 약화될 수 있기 때문이다. 댐의 저수위(water level)를 낮출수록 홍수 대비 능력은 증대되지만 가뭄 대비 능력은 감소되는 탓이다. 따라서 다목적댐에서 홍수와 가뭄은 상호 보완적이므로 반드시 동시에 고려되어야 한다.

이에 본 연구에서는 다목적댐의 금년 치수 능력을 해하지 않는 범위 안에서 다음해 이수 능력에 영향을 주는 요인들을 패널 데이터 분석을 통하여 판별하고자 한다. 이 결과를 활용하면 올해 기상학적 요인들을 통하여 다음 해 가뭄 발생 가능성을 가늠하고 만약 그 가능성이 높다면 어떤 댐 운영 관련 요인들을 조절함으로써 가뭄에 대한 대비

능력을 향상시킬 수 있는지를 파악할 수 있을 것이다. 궁극적으로 홍수와 가뭄을 동시에 대비하기 위한 다목적댐의 운영 방안을 제시하는 데 기여할 수 있을 것이다.

2. 자료 및 방법

2.1 연구대상

본 연구는 연구 모형을 도출하기 위하여 1990년대 이전에 준공된 모든 다목적댐을 대상으로 총 208개의 연간 수문자료를 수집하였다. 현재 우리나라에는 총 20개의 다목적댐이 운영되고 있으나 30년 이상의 운영 자료를 보유한 6개 댐으로 연구 대상을 한정하는 이유는 가뭄은 해마다 일어나는 자연재해가 아니므로 충분한 운영 기간이 필요하기 때문이다. Fig. 1은 본 연구에서 사용한 댐의 지리적 위치를 지도상에 도시한 것으로 낙동강 수계에 존재하는 안동댐과 합천댐을 제외하면 각기 서로 다른 수계에 위치하며 행정구역별로도 다양하게 분포하고 있다(Table 1).

수문자료는 월별 저수위(m), 유입량(m^3/s), 방류량(m^3/s), 수문방류량(m^3/s) 및 유역평균우량(mm)을 사용하였고 지표별로 월평균값, 월최저값 및 월최고값을 구할 수 있지만 수문방류량 및 유역평균우량의 최저값은 대부분 0이기 때문에 사용하지 않는다. 최대값은 특정 일의 값으로 해당 월을 대표할 수 없으므로 분석에서 제외한다. 특히 댐 유입량의 경우 저수위를 이용하여 산정하는 방식으로 인해 최대값은 비정상적으로 큰값을 나타내는 경우가 많아 회귀분석에서 제외한다. 저수량은 국가수자원관리종합정보시스템(Water Management Information System)에서 제공하는 수위-저수량관계곡선식에 월평균 저수위를 대입하여 계산하였다.

Fig. 1. Locations of Selected Multipurpose Dams

Table 1. Specifications of Selected Dams

Name of Dams	Impounds	Dam and Spillways (m)		Reservoir Capacity (10 ⁶ m ³)		Opening Date
		Height	Lenght	Total	Active	
Andong Dam	Nakdong River	83	612	1,248	1,000	1976
Chungju Dam	Namhan River	98	447	2,750	1,789	1985
Daechong Dam	Geum River	72	495	1,490	790	1980
Soyang Dam	Soyang River	123	530	2,900	1,900	1973
Hapcheon Dam	Nakdong River	96	472	790	560	1988
Seomjingang Dam	Seomjin River	64	344	460	370	1965

2.2 표준강수 증발산지수(Standardised

Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)

기상학적 가뭄의 시작과 끝, 강도 등을 객관적이고 보편적으로 정의하기 위하여 다양한 지수들이 개발되었다. 이 지수들의 대부분은 토양수분에 대한 물수지 방정식(soil water balance equation)을 활용한 Palmer Drought Severity Index (Palmer, 1965) 또는 강수 확률론적 기법(precipitation probabilistic approach)을 이용한 Standardised Precipitation Index (McKee et al., 1993)에 기반을 두고 있다. 본 연구는 세계 기상 기구(World Meteorological Organization)가 대표적인 기상학적 가뭄 지수로 권고한 후자를 수정한 Standardised Precipitation Evapotranspiration Index(SPEI) (Vicente-Serrano and Begueria, 2010)를 사용한다.

SPEI는 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)와 마찬가지로 다양한 시간 척도(예 1~48개월)를 사용하여 가뭄을 정의할 수 있다. 예를 들어 12개월 척도를 사용하는 경우 지난 1년 동안의 강수량을 누적하여 365개의 이동누적 시계열 집합을 구성한다. 이 집합에 적합한 확률분포를 추정하고 이에 근거하여 누적확률값에 대한 표준정규분포를 산출하여 가뭄의 정도를 결정한다. 이때 사용한 시간 척도에 따라 단기부터 장기까지 가뭄을 정의할 수 있다. 표준정규분포값이 -1.0~-1.5, -1.5~-2.0 및 -2.0~인 경우 각각 약한, 보통 및 심한 가뭄에 해당된다.

SPEI는 주어진 월 i(month i)의 강수량(P)과 잠재증발산량(PET)의 차이에 의한 Eq. (1)과 같은 기후학적 물수지에 기반을 두고 있다(Vicente-Serrano and Begueria, 2010).

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$

Eq. (1)을 통해 분석 대상 월에 대한 물의 과잉 및 부족량을 계산할 수 있다. 증발산량은 계산이 간단하고 자료획득이 쉬운 Thornthwaite방법을 이용한다. D 는 다음 Eq. (2)와 같이 각 시간규모에서 합성된다.

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} P_{n-i} - PET_{n-i} \quad (2)$$

여기서 k 는 합성을 위한 시간 규모(time scale), n 은 계산에 이용된 월(month)이다. D^k 는 시간 규모 k 에서 집계된 D 이다. 다음으로는 D^k 에 대해 3변수 대수-로지스틱분포(three-parameter log-logistic distribution)의 확률밀도함수를 적용한다.

$$f(x) = \frac{\lambda}{\kappa} \left(\frac{x-\mu}{\kappa} \right)^{\lambda-1} \left[1 + \frac{x-\mu}{\kappa} \right]^{-\lambda-2} \quad (3)$$

여기서 κ , λ 와 μ 는 범위($\lambda > D^k < \infty$)인 D^k 에 대한 각각 분포의 크기(scale), 모양(shape)과 위치(origin)에 관한 매개변수이다. 대수로지스틱분포의 매개변수를 얻기 위한 많은 방법 중에서 L-moment 방법(Hosking and Wallis, 1997)이 가장 적합하고 용이한 것으로 보고되고 있다.

$$\lambda = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2} \quad (4)$$

$$\kappa = \frac{(w_0 - 2w_1)\lambda}{\Gamma(1+1/\lambda)\Gamma(1-1/\lambda)} \quad (5)$$

$$\mu = w_0 - \kappa\Gamma(1+1/\lambda)\Gamma(1-1/\lambda) \quad (6)$$

여기서 $w_l (l = 0, 1, 2, \dots)$ 는 L-모멘트 방법을 이용하여 계산한 차수 l 에 대한 확률가중모멘트(PWM)이다.

$$w_l = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \left(1 - \frac{i-0.35}{n} \right)^l, \quad l = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

여기서 x_i 는 D^k 의 표본 난수($x_1 < x_2 < \dots < x_n$)이고 n 은 표본의 크기이다. 대수로지스틱분포에 의해 D^k 의 확률분포함수는 다음과 같이 주어진다(Vicente-Serrano et al., 2010).

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\kappa}{x-\mu} \right)^{\lambda} \right]^{-1} \quad (8)$$

마지막으로 얻어진 $F(x)$ 에 대응하는 z -표준화정규값으로 변환되어 SPEI가 계산된다.

전지구를 대상으로 하는 SPEI는 Global SPEI 데이터베이스(Global SPEI database)인 SPEIbase를 통해 제공되고 있다(<http://spei.csic.es/>). 이 자료는 전세계 어디든 0.5°의 공간 해상도로 1개월에서 48개월의 시간척도로 SPEI를 제공하고 있으며 digitalCSIC를 통해 접속할 수 있다. SPEIbase는 영국의 이스트 앵글리아 대학교(University of East Anglia)의 기후연구센터(Climatic Research Unit)로부터 월별 강수량과 잠재증발산량 자료를 근거하고 있다. SPEIbase는 잠재증발산량 산정을 위해 FAO-56 Penman-Monteith 방법을 사용하고 있으며, 이는 최초로 사용된 Thornthwaite PET 산정과 가장 큰 차이점이다.

본 연구에서는 우리나라 대표 6개 댐 유역뿐 만아니라 추후의 연구에서 우리나라 전역 및 한반도전역에 대한 연구로 확장하고자 동일한 해상도로 제공되는 SPEIbase 자료를 이용하였다. 이 자료는 연구대상 지역의 회귀분석에서 기상학적 가뭄을 추정하는 지수로서 독립변수로 활용된다.

2.3 연구 가설

본 연구에서는 올해 정보를 바탕으로 다음 해 가뭄 발생 가능성을 가늠해야 하므로 예측력 혹은 선행성이 있는 정보를 독립변수로 사용해야 한다. 우리나라에서 주로 영농기(4~10월) 중 모내기를 하는 시점(즉 4월)이 가뭄에 가장 취약한 시기라 할 수 있다. 6월부터 장마철이 시작되므로 4~5월이 가뭄 발생 가능성이 가장 높고 표토수 부족은 발아에 치명적이므로 4월이 가뭄에 가장 취약하기 때문이다. 반면에 비영농기(11~3월)에는 강수량이 적지만 문자 그대로 농업용수에 대한 수요도 적기 때문에 사회적 문제가 발생할 가능성은 낮다. 이에 본 연구는 다목적댐의 4월 저수량을 회귀분석의 종속변수로 설정한다. 전술한 바와 같이 농업적 가뭄을 정의하는 지수는 동일 지역 내에서도 농작물별로 달라질 수 있는 미시적인 성격을 띠고 있으므로 종속변수로 설정하는 데 한계가 있다. 또한 본 연구의 목적은 농업적 가뭄 발생 여부를 예측하기보다 가뭄에 대한 대비 정도를 파악하는 데 있으므로 다목적댐의 저수량이 종속변수에 더 적합하다고 볼 수 있다.

만약 다목적댐의 4월 저수량이 부족할 것으로 예상된다면 이에 대한 대비는 상당히 오래 전부터 시작되어야 한다. 우리나라는 강수량의 시기적 편차가 커서 수자원의 효율적 이용이 어려운 수문기상학적 특성을 갖고 있기 때문이다. 일반적으로 11~3월은 강수량이 적으므로 4월 가뭄에 대한 대비는 강수량을 확보할 수 있는 지난해 11월 이전에 시작되어야 한다. 하지만 너무 빨리 저수량을 늘리게 되면 홍수 대비 능력을 해할 수 있다는 점을 염두에 두어야 한다. 이에 본 연구는 월별 저수량의 모평균에 대한 t 검정(Table 2)을 실시하였다.

Table 2. Results of Paired T-Test

Month	Mean	t-Statistic (p-Value)		
8	938.938	-7.8946 (0.0000)	-	-
9	1047.661		0.8644	-
10	1041.550	-	(0.3884)	10.3042 (0.0000)
11	992.9453	-		

Table 2에서 확인할 수 있듯이 8월과 9월의 저수량이 동일하다는 가설은 0.1% 유의수준에서 기각된다. 10월과 11월에 대한 동일 가설도 마찬가지로 기각된다. 하지만 9월과 10월에 대해서는 기각할 수 없으므로 9월과 10월의 저수량은 평균적으로 차이가 난다고 할 수 없다. 이 검정 결과는 저수량이 9월까지 증가하고 10월에는 별다른 변동이 없으나 11월부터는 감소함을 뜻한다. 따라서 다음 해 가뭄에 대비하는 시점은 8월이 합리적이라는 결론을 내릴 수 있다. t 검정 결과를 비롯하여 문헌 고찰 결과를 토대로 다음과 같은 가설을 세웠다.

- H1. 다목적댐이 위치한 지점의 8월 SPEI는 다음해 4월 저수량에 영향을 미칠 것이다.
- H2. 다목적댐이 위치한 지점의 8~10월 방류량은 다음해 4월 저수량에 영향을 미칠 것이다.
- H3. 다목적댐이 위치한 지점의 8~10월 수문방류량은 다음해 4월 저수량에 영향을 미칠 것이다.

3. 분석 결과

댐 유역에 강우가 발생하면 그로 인한 유출량은 댐에 유입되어 저수량 증가에 기여하며 그 중 일부는 댐으로부터 방류된다. 이 관계를 본 연구에서 수집한 수문자료의 관점에서 보면 유역평균우량 중 일부는 유입량을 통하여 댐의 저수량을 증가시키며 일상적인 방류 및 수문방류를 통하여 저수량이 감소된다. 여기서 유역평균우량 및 유입량이 댐의 저수량에 미치는 영향은 명백하지만 인간이 물리적으로 통제할 수 없으므로 회귀모형의 독립변수에서 배제하였다. 무엇보다 전술한 일련의 관계는 설명변수들 간에 완전한 선형관계(perfect linear relationship)가 없어야 한다는 회귀분석의 기본 가정에 위배될 가능성이 높다. 즉 다중공선성(multicollinearity) 문제가 발생할 가능성을 사전에 차단하기 위해 회귀분석에서 배제하는 것이 바람직하다고 판단하였다. 같은 이유로 방류량 및 수문방류량의 월평균값만 사용하고 최소값 및 최대값은 분석에서 사용하지 않았다. 월별 저수량 역시 독립변수의 범주에 포함시키지 않았다.

Table 3은 회귀분석에 사용할 독립변수들 간의 상관관계

분석 결과이다. 일부 변수들 간의 상관관계가 높게 나타났으나 다중공선성 문제를 확인하고자 모든 모형에 대하여 분산팽창계수(variance inflation factor)를 측정하였을 때 모든 독립변수에 대하여 4 이하의 값이 도출되었다. 이에 다중공선성에 관한 문제는 없다고 간주하고 모든 변수들을 활용하여 실증 분석을 수행하였다.

Table 4는 SPEI 시간 척도별 패널 데이터 분석 결과이다. 수문자료는 1974년부터 2014년까지 패널 데이터의 형태이므로 랜덤효과(random-effect) 모형을 통해 분석을 수행하였다. 댐의 종류 및 연도 등은 통제변수로 처리하였다.

2.3절에서 대립가설 H1의 ‘다목적댐이 위치한 지점의 8월 SPEI는 다음해 4월 저수량에 영향을 미칠 것이다’라는 가설의 채택여부를 조사하기 위해 시간척도별로 8월 SPEI와 다음해 4월의 저수량과의 연관성을 분석하여 p값 (p value)을 계산하였다. 그 결과 시간척도 24개월까지는 유의수준 90% (p값 0.1) 하에서 귀무가설이 채택되었다. 반면에 시간척도

36개월 이상에서는 유의수준 90% 하에서 귀무가설이 기각되었다. 또한 이때의 관계는 음의 관계가 성립함을 알 수 있다(Table 4). 이와 같은 결과를 통해 유추해 볼 수 있는 하나의 현상은 어느 해 8월까지 지속적으로 건조상태가 유지된 경우 그 다음해 4월에 건조상황(예를 들어 가뭄 등)이 해소될 것으로 예상되기 위해서는 시간척도(지속적인 건조 기간)가 36개월 이상이 되어야 함을 알 수 있다.

모든 독립변수 중에 통계적으로 가장 유의미한 변수는 8월 및 10월의 방류량이다. 이 결과와 전장의 t 검정 결과를 종합하여 보면 댐의 저수량이 증가 혹은 감소하는 시기에 방류량이 다음 해 4월의 저수량에 중요한 영향을 미침을 알 수 있다. 이 양은 발전방류 및 하천유지용수 등을 위한 방류량으로 계수가 양수를 갖는 결과가 도출되었다. 8월과 10월의 방류량이 많았다는 것은 그에 상응하는 강우가 많았음을 의미하므로 결과적으로 다음해 4월의 저수량과 양의 관계를 갖게 됨을 의미한다.

Table 3. Descriptive Statistics and Correlation Matrix

	Mean	Std. Dev.	Aug. SPEI 48	Aug. discharge	Aug. floodgate	Sept. discharge	Sept. floodgate	Oct. discharge	Oct. floodgate
Aug. SPEI 48	.6350568	.9221585	1.0000						
Aug. discharge	99.43178	117.4951	0.2131	1.0000					
Aug. floodgate	23.1438	79.76123	-0.0051	0.5131	1.0000				
Sept. discharge	75.29808	88.0362	0.1406	0.6936	0.3265	1.0000			
Sept. floodgate	25.14096	86.16412	0.0740	0.2554	0.0975	0.5428	1.0000		
Oct. discharge	43.25534	39.89174	0.1020	0.6228	0.2327	0.6788	0.2692	1.0000	
Oct. floodgate	.0592308	.8507618	-0.0329	-0.0398	0.0485	-0.0367	-0.0196	-0.0456	1.0000

Table 4. Results of Panel Data Analysis

Variable		Model 1 (SPEI 01)	Model 2 (SPEI 06)	Model 3 (SPEI 12)	Model 4 (SPEI 24)	Model 5 (SPEI 36)	Model 6 (SPEI 48)
Aug. SPEI XX		-24.80742	-36.48031	-36.01247	-41.2987	-43.40871†	-45.44893†
Aug.	Discharge	1.373654***	1.505352***	1.519258***	1.551759***	1.520933***	1.564241***
	Floodgate	-.208923	-.2576194	-.2696673	-.3400225	-.3484853	-.3927751
Sept.	Discharge	-.4199724	-.5076439	-.547823	-.5680165	-.5059036	-.5203645
	Floodgate	.6258331†	.6654856†	.6813128*	.6904111*	.6209114†	.6477177†
Oct.	Discharge	5.405556***	5.294203***	5.352295***	5.379507***	5.420675***	5.275798***
	Floodgate	-13.51898	-12.39121	-12.93522	-11.13273	-12.96802	-15.58939
Overall R-squared		0.4706	0.4725	0.4733	0.4751	0.4756	0.4757

† P < .1; * P < .05; ** P < .01; *** P < .001

The control variables (i.e., ID and year) are not shown in this table

마지막으로 9월 수문방류량도 통계적으로 유의미한 독립 변수에 포함되었다. 수문방류는 집중호우에 의한 급격한 수위상승으로 인한 방류로서 9월에 많은 양의 호우가 발생했음을 의미한다. 따라서 이 지수는 다음해 4월의 저수량에 양의 관계가 성립함을 알 수 있다. 9월의 수문방류량은 홍수 조절을 위해 불가피하게 이루어지는 경향이 있으나 다음해의 저수량과도 밀접한 관련이 있음을 통계적으로 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 패널 회귀분석을 이용하여 댐 저수량과 표준강수 증발산지수 및 댐 방류량의 관계를 통계적으로 조사하였다. 이를 위하여 30년 이상의 운영 자료를 보유한 6개 다목적댐의 208개의 연간 수문자료 수집 및 이용하여 회귀모형을 구축하였다. 그 결과 본 연구에서 세운 세 가지 대립가설이 모두 채택되는 결과를 얻었다.

장기 시간 척도를 갖는 8월의 표준강수 증발산지수는 다음해 4월의 댐 저수량에 대한 예측력을 갖는다는 결과가 도출되었다. 또한 댐의 수위가 올라가는 8월 및 내려가는 10월에 발전과 하천 유지용수를 위해 방류하는 양이 클수록 다음해 4월에 저수량이 많다는 결과를 얻었다.

방류를 많이 한다는 사실을 단순히 저수량의 감소로 생각하면 안 되며 이것의 원인이 되는 강우현상에 초점을 두어 생각하여야 한다는 것을 의미한다. 또한 9월의 수문방류에 대해서도 이것의 원인이 되는 강우 현상이 많았음을 의미하므로 다음해 저수량과 관련이 있음을 통계적으로 확인하였다.

이 결과를 활용하면 올해 기상학적 요인들을 통하여 다음해 가뭄 발생 가능성을 기능하고 만약 그 가능성이 높다면 어떻게 방류량을 조절함으로써 가뭄에 대한 대비 능력을 향상시킬 수 있는지를 파악할 수 있을 것이다. 궁극적으로 홍수와 가뭄을 동시에 대비하기 위한 다목적댐의 운영 방안을 제시하는 데 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 안동대학교 기본지원사업에 의하여 연구되었습니다.

References

Correir, F.N., Santos, M.A., and Rodrigues, R.R. (1991) *Reliability in Regional Frought Studies, Water Resources Engineering Risk Assessment*, pp. 63-72.

Dai, A. (2011) Characteristics and Trends in Various Forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900-2008. *J. Geophysical Research: Atmospheres* (1984-

2012), Vol. 116, Doi: 10.1029/2010JD015541.

Heim, R.R. (2000) Drought Indices: A Review. *Drought: A Global Assessment*; Edited by Wilhite, D.A., Routledge Hazards and Disasters Series Vol. 1, Routledge, London, UK, pp. 159-167.

Hosking, J.R.M., and Wallis, J.R. (1997) *Regional Frequency Analysis: An Approach Based L-moments*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Kim, B.S., Sung, J.H., Kang, H.K., and Cho, C.H. (2012) Assessment of Drought Severity over South Korea using Standardized Precipitation Evapo-transpiration Index (SPEI). *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 45, No. 9, pp. 887-900.

Kim, B.S., Sung, J.H., Lee, B.H., and Kim, D.J. (2013) Evaluation on the Impact of Extreme Droughts in South Korea using the SPEI and RCP8.5 climate change scenario. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 2, pp. 97-109.

Lee, B-R., Sung, J.H., and Chung, E-S. (2015) Comparison of Meteorological Drought and Hydrological Drought Index. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 48, No. 1, pp. 69-78.

McKee, T.B.N., Doesken, J., and Kleist, J. (1993) The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. *Eight Conference On Applied Climatology*, American Meteorological Society, pp. 179-184.

Nalbantis, I., and Tsakiris, G. (2009) Assessment of Hydrological Drought Revisited. *Water Resources Management*, Vol. 23, No. 5, pp. 881-897.

Palmer, W.C. (1965) *Meteorological Droughts. U.S., Department of Commerce Weather Bureau Research Paper 45*.

Rajsekhar, D., Singh, V.P., and Mishra, A.K. (2015) Multivariate Drought Index: An Information Theory Based Approach for Integrated Drought Assessment. *J. Hydrol.*, Vol. 526, pp. 164-182.

Sahoo, A.K., Sheffield, J., Pan, M., and Wood, E.F. (2015) Evaluation of the Tropical Rainfall Measuring Mission Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) for Assessment of Large-scale Meteorological Drought. *Remote Sens. Environ.*, Vol. 159, pp. 181-193.

Swiss Re (2017) *Natural Catastrophes and Man-made Disasters in 2016: A Year of Widespread Damages*. Swiss Re Institute.

Vasiliades, L., and Loukas, A. (2009) Hydrological Response to Meteorological Drought using the Palmer Drought Indices in Thessaly, Greece. *Desalination*, Vol. 237, No. 1, pp. 3-12.

Vicente-Serrano, S.M., Begueria, S., and Lopez-Moreno, J.I. (2010) A Multi-scalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *J. Climate.*, Vol. 23, pp. 1696-1718.

Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J.J., López-Moreno, J.I., Azorin-Molina, C., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E., and Sanchez-Lorenzo, A. (2012) Performance of Drought Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications.

Earth Interact., Vol. 16, Paper No. 10, pp. 1-27.
 Wilhite, D.A., and Glantz, M.H. (1985) Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, International Water Resources Association, Vol. 10, No. 3, pp. 111-120.

Received	July 10, 2017
Revised	July 12, 2017
Accepted	September 26, 2017