기후변화에 따른 관개저수지의 용수공급 안정성 평가

Reliability Assessment of Agricultural Reservoirs for Water Supply under Climate Change

고다상* · 주영철** · 이태삼***

Ko, Dasang*, Joo, Yeongcheol**, and Lee, Taesam***

Abstract

Recently, the frequency of drought occurrence and the resulting damage has increased due to climate change. Frequent severe droughts induce water shortages in agricultural reservoirs. The role of drought monitoring and prediction is critical for mitigating the effects of severe drought in agricultural areas. In this study, a compound standardized storage and precipitation index (CSSPI) was developed that adapted the existing drought index-the standardized precipitation index (SPI)-by adding hydrological data on storage rate. Furthermore, the future storage rate was simulated using autoregressive models (AR) to estimate the future CSSPI. A dataset containing records of reservoirs and precipitation at the three areas of Jungbu, Youngnam, and Honam was applied to estimate the current and future status of the CSSPI. The results indicate that the CSSPIs generated accurately present the past pattern of the observed data and that they can be considered as inputs for predicting future drought conditions.

Key words : Climate Change, Drought, SPI, CSSPI, Future Drought Conditions

요 지

최근 기후변화에 따라 가뭄의 발생빈도와 그 피해가 점차 증가하고 있다. 요즈음 극심한 가뭄으로 인한 관개저수지의 물 부족으로 인해 농업의 피해가 많이 발생하였다. 가뭄의 모니터링과 예측은 농업에서 심각한 가뭄의 영향을 완화시키는 것에 목적을 두고 있다. 이번 연구를 통하여 기존의 가뭄지수인 표준 강수 지수(Standardized Precipitation Index)에 수문학적인 저수율의 정보를 추가하여 복합 표준 저수 및 강수 지수(Compound Standardized Storage and Precipitation Index, CSSPI)가 개발되었다. 더불어, 미래 CSSPI를 예측하기 위해서 미래 저수율은 AR모형을 사용하여 시뮬레이션 되었다. 중부지역, 영남지역, 호남지역의 각 3곳의 저수지와 각 3곳의 강수량 자료의 데이터셋이 현재와 미래의 CSSPI를 예측하기 위하여 사용되었다. 그 결과 생성된 CSSPI는 관측된 자료의 패턴을 잘 보여주었고, CSSPI는 미래의 가뭄상태를 예측할 수 있는 기초자료가 될 것으로 사료된다.

핵심용어 : 기후변화, 가뭄, 표준 강수 지수, 표준 저수 및 강수 지수, 미래 가뭄 상태

1. 서 론

1.1 서론

관개저수지의 용수공급에 대한 안정성은 농업에 있어서 다른 요건들보다도 최우선적으로 중요하다. 물은 농업에서

필수적인 요건이며 공급이 부족해졌을 때 안정성이 낮아진다. 따라서 이 용수가 부족한 상태 즉, 가뭄은 전 세계적으로 극심한 피해를 유발시키고 농업에서도 엄청난 영향을 준다. 대한민국에서도 이 가뭄은 지속적으로 발생하고 있으며 최근 2014년과 2015년 발생한 가뭄은 극심한 피해를 주었다.

*정회원, 한국시설안전공단 직원(E-mail: dasang@kistec.or.kr)

Member, Employee, Korea Infrastructure Safety Corporation

** (주)남동건설, 대표이사(E-mail: bigrockjoo@naver.com)

President, Namdong Construction Co. Ltd

***교신저자, 정회원, 경상대학교 토목공학과 부교수(Tel: +82-55-772-1797, Fax: +82-55-772-1799, E-mail: tae3lee@gnu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University

일반적으로 가뭄은 눈으로 보이는 하천바닥이 드러나거나 식물이 말라 죽거나 등 극심한 상태가 되기 전에는 사람들이 인식하기 어렵다. 가뭄이 시작된 시간과 가뭄이 끝난 시기를 정의하기란 매우 어렵다. 그렇기 때문에 이 문제를 극복하고자 가뭄의 상태나 정도를 판단할 수 있는 다양한 가뭄지수(Drought Index)가 개발 및 이용되고 있다. 가뭄지수는 개발자에 따라 강우, 강설, 유출 그리고 물 공급 등 여러 가지의 자료를 보여주기에 그림 등으로 나타낸다. 현재 대한민국에서는 해외에서 개발된 가뭄지수를 활용하여 지수들을 산정하여 이용하고 있는 상황이다. 과거 가뭄에 대한 연구가 국내에서도 적용이 된바 있으나, 현재의 가뭄지수들은 이번 연구의 목적인 관개저수지의 용수공급에 대한 안정성을 판단하기에는 관개저수지가 가지고 있는 지역적인 특성을 반영할 수 없었다.

따라서 본 연구에서는 대표적인 가뭄지수인 표준 강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)를 보완하기 위해 미래 RCP 시나리오 4.5 및 8.5 자료와 통계학적모델을 적용한 미래 저수를 자료를 생성한 후, 관개저수지의 특성을 고려한 복합 표준 저수 및 강수 지수(Compound Standardized Storage and Precipitation Index, CSSPI)를 개발하였다. 이 CSSPI는 향후 단기가뭄 및 장기가뭄을 판단하고 구분하는데 기초자료로써의 활용과 미래 가뭄에 대한 모니터링에 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

1.2 연구동향

본 연구에서는 관개저수지의 특성을 고려할 수 있는 가뭄지수를 만들기 위해 기존의 가뭄지수에 대한 연구들을 살펴 보았다.

Dracup et al. (1980)은 가뭄의 정의를 위해 4가지 요인을 고려해야 한다고 말하였고, 물부족의 형태의 선택과 연속시계열에 있어 시간의 선택 및 기본수준의 선택, 지역화 또는 기준화하는 방법이며 이에 대한 각각을 정의하였다. Shafer and Dezman (1982)은 PDSI의 광범위한 토양수분조건을 지형적으로 변화가 심한 산악지역의 용설에 적용하기 위한 한계를 보완하여 강수, 적설, 하천유출, 저수지 저수량을 이용한 가뭄지수(Surface Water Supply Index, SWSI)를 개발하였다. Rao and Padmanabhan (1982)은 Kansas와 Iowa 지방의 PDSI를 대상으로 시계열 특성분석을 실시하여 시계열모형을 구성하고 PDSI를 모의 발생하였다.

Oladipo (1985)는 미국의 Nebraska 지방을 대상으로 Rainfall Anomaly Index (RAI), Bhalme and Mooley Drought Index (BMDI), PDSI의 세가지 가뭄지수를 계산하여 비교하였다. Guttman et al. (1992)은 스펙트럼 분석을 사용하여 미국을 대상으로 PDSI와 SPI를 비교하였다. 또한, McKee et al. (1993)은 미국 Colorado 지방을 대상으로 다양한 시간 간격에 대해서 SPI를 계산하고 이 간격에 대한 가뭄의 시공간적인 변화를 분석하였으며, Colorado의 Fort Collins 지방을 대상으로 Palmer

Drought Severity Index (PDSI)와 Standardized Precipitation Index (SPI)의 상관성을 분석하였다.

Kim et al. (1995)은 미국의 서부지역에서 개발된 SWSI를 우리나라 지형과 수문학적 특성에 맞추어 변형하여 강수량과 저수량을 고려하는 용수공급지수를 제시하였다. 더불어, Edwards (1997)은 SPI의 정의와 산정방법을 설명하고, 미국 Kansas의 Mcpherson 지방의 1911년에서부터 1995년까지의 3개월, 12개월, 48개월의 SPI를 계산하였다. 나아가, Ryu et al. (2002)은 PDSI, SWSI, SPI를 사용하여 낙동강 유역의 가뭄지수를 산정하고 비교하였다. 그 결과 PDSI, SWSI, SPI 모두 가뭄을 정량적으로 판단하는데 유용하다고 판단하였다.

Lee and Lee (2005)은 PDSI와 SPI, Keetch-Byram Drought Index (KBDI)를 산정하고 비교를 통해 표준 가뭄지수를 제안하였다. 그 결과 PDSI는 누적되는 강우의 부족으로 가뭄심도를 나타내는데 유리하고 SPI, KBDI는 단기간 강우부족을 나타내는데 유리하다고 말하였다. 또한, Kim and Lee (2011)은 각종 가뭄지수를 행정구역에 따라 산정한 후 비교하여 기상학적 가뭄지수의 실제 가뭄에 대한 평가를 하였다. 분석 결과 SPI, PN, Deciles의 단기가뭄이 비교적 양호한 것으로 나타났고, 실제 가뭄 발생의 기록과 가장 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다. Im et al. (2001)은 낙동강 유역의 강우지표와 PDSI로 가뭄을 평가하였고, 짧은 기간의 가뭄상태를 재현하는 방법에는 6개월 미만의 강우지표와 유출지표가 적합하고 장기가뭄에는 9개월 이상의 강우지표 및 PDSI가 적합하다고 제시하였다. Yoo et al. (2013)은 기상학적 가뭄지수인 일 단위 SPI (DSPI)를 제안하고 DSPI를 산정하여 가뭄재현 능력을 객관적인 관점에서 평가 하였다. 분석결과 실제로 발생한 가뭄의 진행 정도를 연속적으로 일별 모니터링을 통하여 가뭄을 감지한 후, 가뭄이 없어지는 과정을 일 단위로 감시할 수 있는 것으로 나타났다.

2. 관개저수지의 용수공급 안정성평가 방법

2.1 방법론

기존의 가뭄의 빈도와 지속기간의 관계를 나타내는 기상학적 가뭄지수인 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)에 대해서 서술하고, SPI를 보완해서 이번 연구에서 새롭게 만들어낸 복합 표준 저수 및 강수지수(Compound Standardized Storage and Precipitation Index, CSSPI)에 대하여 기술하였다.

2.1.1 Standardized Precipitation Index

SPI는 강수량이 감소하면 필요한 물 수요에 비해 상대적으로 물 부족을 유발하게 되고, 가뭄을 발생하게 된다는 것에 착안하여 McKee et al. (1993)에 의해 개발되었다. 즉, 강수량이 부족하게 되면 지하수량, 적설량, 저수지 저류량, 토양함수

분, 하천유출량 등에 영향을 미친다는 가정으로부터 개발되었다. SPI는 특정시간에 따른 계산 시간단위를 3, 6, 9, 12개월 등과 같이 설정하고, 시간단위별로 강수량의 부족량을 산정하여 개개의 용수공급원이 가뭄에 미치는 영향을 산정하는 방법이다.

Mckee et al. (1993)은 SPI의 결과로부터 얻어지는 가뭄의 강도를 나타내기 위하여 Table 1과 같은 SPI 가뭄 분류를 나타내었고, 어느 시간규모에나 적용이 되는 가뭄사상에 대한 기준을 명시하였다.

Table 1. The Drought Classification Using SPI

Value	Category
Higher than 2.00	Extremely Wet
1.50 ~ 1.99	Very Wet
1.00 ~ 1.49	Moderately Wet
-0.99 ~ 0.99	Near Normal
-1.00 ~ -1.49	Moderately Dry
-1.50 ~ -1.99	Severely Dry
Less than -2.00	Extremely Dry

SPI는 시간단위별로 강수 부족량을 산정하여 각 용수공급원이 가뭄에 미치는 영향을 산정한다. 그러므로 이를 산정하기 위해 이동누가에 의한 방법을 이용하여 시간단위별 누가강수시계열이 필요하다. 즉, 월 강수량을 시간단위에 따라 연속적으로 중첩하여 구하게 된다. 강수량 자료는 12개월이나 그 이하의 시간간격에 대해서는 정규분포의 형태를 나타내지 않으므로 SPI를 산정하기 위해 지점별 강수량 분포를 정규분포의 형태로 변환시켜야 한다. 이때 강수량 자료의 분포를 변환하기 위해서 강수량자료의 일반적인 분포형을 알아야 한다. Edward 등에 따르면 강수량은 일반적으로 Gamma 분포를 따르는 것으로 알려져 있다. 이 Gamma 분포를 이용하여 각각의 변량에 대한 누가확률을 구하고, 표준정규분포에 적용시켜 최종적으로 SPI 값을 산정한다. 다음 Eq. (1)은 Gamma 분포의 확률밀도 함수를 구하는 공식이다.

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (1)$$

여기서, x 는 강수량 α 는 형상매개변수이고, β 는 축척매개변수, $\Gamma(\alpha)$ 는 Gamma분포 함수이다.

Gamma 함수의 매개변수(α, β)는 시간단위에 따라 해당 관측소별 최우도법(Maximum likelihood method)을 이용하여 추정한 후, Eq. (2)를 사용하여 강우사상의 누가확률을 계산한다.

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x \frac{x}{\beta^{\alpha-1}} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (2)$$

강우사상에 대하여 누가확률을 산정한 후, Eq. (3)을 사용하여 표준정규분포에 적용하여 표준강수지수를 산정한다.

$$SPI = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right), \text{ for } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (3)$$

$$= \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right), \text{ for } 0.5 < H(x) \leq 1$$

Where

$$t = \sqrt{\lim_{H(x) \rightarrow 0} \frac{1}{H(x)^2}}, \text{ for } 0 < H(x) \leq 0.5$$

$$= \sqrt{\lim_{H(x) \rightarrow 1} \frac{1}{(1.0 - H(x))^2}}, \text{ for } 0.5 < H(x) \leq 1.0$$

Where

$$H(x) = q + (1 - q)G(x)$$

여기서, $H(x)$ 는 강우 관측값의 누가확률이고, q 는 무강수 확률, c_0 는 2.516, c_2 는 0.803, c_3 은 0.010, d_1 은 1.433, d_2 는 0.189, d_3 는 0.001이다.

하지만 SPI 경우 실제 농사나 생활용수에 영향을 미치는 저수량 등 주요 수문변수들에 대한 고려없이 강수량만을 사용하여 계산하고 있다. 따라서 본 연구에서는 농사나 가능 공급용수량 등에 영향을 미치는 저수지의 상태까지 복합적으로 고려한 지수를 개발하였다.

2.1.2 CSSPI

SPI에서는 강우 발생에 의한 기상·기후학적 가뭄의 범위이지만 이번 연구의 목적인 관개저수지의 용수공급에 대한 안정성을 평가하기 위하여 저수지의 저류량에 의한 수문학적 가뭄을 접목시켜 확률통계적 해석을 통하여 신뢰도가 높은 복합 표준 저수 및 강수 지수(Compound Standardized Storage and Precipitation Index)를 만들었다. CSSPI는 Eq. (4)와 같다.

$$CSSPI = \frac{aP_{resv} + bP_{pre}}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (4)$$

여기서, a, b 는 저수율 및 강수량의 가중치이고, P_{resv}, P_{pre} 는 저수율 및 강수량의 표준정규분포 값이다.

CSSPI를 산정하기 위한 절차는 다음과 같다.

- ① 분석 대상 저수지 선정
- ② 대상 저수지의 저수율 자료와 해당하는 기상청 관측소 강수량 자료 및 미래 RCP자료 수집
- ③ 저수율 자료와 강수량 자료의 표준정규분포화
- ④ 미래 저수율의 표준정규분포 값 생성
- ⑤ 저수율과 강수량의 가중치 산정
- ⑥ CSSPI의 산정

2.2 CSSPI 산정

2.2.1 저수지 선정

이번 연구에서 선정된 저수지는 Fig. 1과 같다. 저수지의 규모 및 지역별로 나누어 9개의 저수지를 선택하여 가뭄의 특성을 분석하였다. 저수지의 구분은 유역의 면적에 따라 유역면적이 30 km^2 이상이면 대규모저수지, 유역면적이 $5 \sim 30 \text{ km}^2$ 이면 중규모저수지, 유역면적이 5 km^2 이하이면 소규모 저수지로 구분하였으며, 지역별로는 중부지역, 호남 지역, 영남지역으로 구분하였다.

Fig. 1. Location of Reservoirs

2.2.2 자료 수집

규모 및 지역별로 나누어진 저수지의 제원은 Table 2와 같고, 저수율 자료는 한국농어촌공사(www.ekr.or.kr)에서

해당 저수지의 저수율자료를 수집하였고, 강수량 자료는 기상청(www.kma.go.kr)에서 각 저수지에 해당하는 기상청 관할 기상관측소의 1991~2015년 15년 동안의 순별 자료를 수집하여 12개월의 이동평균값으로 사용하였다. 미래 강우 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5에 대한 자료는 Park (2016)의 편차보정된 자료를 이용하였다. 여기서 RCP 시나리오의 숫자는 복사강제력, 즉 온실가스 등으로 대기 중의 에너지의 평형을 변화시키는 영향력의 정도를 의미하며 8.5는 에너지 8.5 W/m^2 증가를 말한다.

2.2.3 수집된 자료의 표준정규분포화

저수율 자료는 0 ~ 1 의 범위로 정해져 있기 때문에, 시작과 끝의 구간이 정해져 있는 특성을 반영할 수 있는 Beta분포가 적절하다. Fig. 2는 각 저수지의 저수율 히스토그램과 Beta 분포의 PDF 선을 도시화 하였다. 이 Beta 분포를 이용하여 각각의 변량에 대한 누가확률을 구하고, 표준정규 분포에 적용시켜 저수지의 지수 값을 산정 한다. 다음 Eq. (5)는 Beta 분포의 확률밀도 함수를 구하는 식이다.

Fig. 2. Storage Rate Histogram with Beta Distribution pdf Line of Sumjin Reservoir

Table 2. Information of Reservoirs

Reservoir Name	Latitude	Longitude	Year of const.	Basin Area (km^2)	Met. Station
Sumjin	35.59	127.11	65	829.32	Imsil
Sinbang	34.79	127.22	73	0.71	Goheung
Ildae	35.53	127.6	49	6.34	Namwon
Daesung	36.13	128.29	59	178	Gumi
Bangog	36.17	129.27	45	28.5	Pohang
Songnae	35.78	128.82	75	5.3	Daegu
Gaesim	36.2	127.63	55	13.9	Boeun
Miho	36.82	127.52	85	49.94	Chungju
Idam	36.86	127.88	45	5.35	Cheongju

$$f(x) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} \quad (5)$$

여기서, α, β 는 형상 매개변수이고, $\Gamma(\alpha)$ 는 Gamma분포 함수이다.

Beta 함수의 매개변수(α, β)는 시간단위에 따라 해당 관측 소별 최우도법(Maximum likelihood method)을 이용하여 추정 한 후, Eq. (6)에 의해 강우사상의 누가확률을 계산한다.

$$F(x) = \int_0^x f(t) dt = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^x t^{\alpha-1} (1-t)^{\beta-1} dt \quad (6)$$

여기서, α, β 는 형상 매개변수이고, $\Gamma(\alpha)$ 는 Gamma분포 함수이다.

강우사상에 대하여 누가확률을 산정한 후, Eq. (3)을 이용하여 표준정규분포에 적용하여 저수율의 표준정규분포값을 산정한다.

강수량 자료는 관측된 강수량 자료에 미래 RCP시나리오 자료를 연결하여 앞서 SPI에서 설명한 방법으로 진행하여 표준정규분포값을 구한다. Fig. 3은 섬진저수지의 강수량 자료의 히스토그램과 Gamma 분포의 PDF 선을 도시화하였다.

Fig. 3. Indexes of Sumjin Reservoir was Standardized. Blue Line was Standardized by Historical Data and Red Line was Generation by AR Model in Storage Index and by RCP Scenario Each Others in Precipitation Index

2.2.4 미래 저수율의 표준정규분포값 생성

저수율의 기후변화에 따른 미래의 자료는 존재하지 않기 때문에, 앞에서 만들어진 저수율의 표준정규분포값을 자기 회귀모델(Autoregressive model)을 이용하여 생성하였다. AR 모델은 1960년대 초부터 수문학에서와 수자원분야에서 많이 사용되고 있는 시계열 모델로 생성된 변수의 값이 이전 시간의 값에 영향을 많이 받고, 사용이 편리하기 때문에 많이 사용되었다. p 의 차수를 가지는 $AR(p)$ 의 식은 Eq. (7)과

같다.

$$y_t = \mu + \sum_{j=1}^p \phi_j (y_{t-j} - \mu) + \epsilon_t \quad (7)$$

여기서, μ 는 평균, ϕ_j 는 자기회귀계수(Autoregression coefficients), ϵ_t 는 백색잡음(White noise)이다.

$AR(p)$ 모델의 p 를 결정하기 위해서 아카이케 정보기준(Akaike information criterion)을 사용하여 p 를 결정하였다.

AIC는 주어진 데이터의 통계학적 모델의 적합성을 평가하기 위해서 사용하는 방법이다. AIC는 값이 낮을수록 적합한 모델임을 나타낸다.

AIC의 식은 Eq. (8)과 같다.

$$AIC = \log V + \frac{2d}{N} \quad (8)$$

여기서, V 는 손실함수(loss function)이고, d 는 매개변수의 개수, N 은 데이터의 개수이다. 손실함수 V 는 Eq. (9)와 같다.

$$V = \det \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \epsilon(t, \theta_N) (\epsilon(t, \theta_N))^T \right) \quad (9)$$

여기서, θ_N 은 측정된 매개변수를 의미한다.

9곳의 저수지에 대하여 AR모델의 p 를 1에서부터 5까지 AIC값을 구한 값을 Table 3에 나타내었고, AIC의 결과에 따라 9곳의 저수지를 평균적으로 고려할 수 있는 $AR(4)$ 모델을 사용하여 미래 저수율의 지수를 생성하였다.

2.2.5 저수율과 강수량의 가중치 산정

저수율과 강수량의 가중치 산정은 저수율과 강수량이 CSSPI가 만들어지는데 각각 얼마만큼의 영향을 미치는가에 대한 고려가 필요하다. 이전의 가뭄을 평가하는 지수에 대한 연구에서 김선주 등은 가중치의 결정 방법에 저수지의 유역 면적에 따라 대규모 저수지는 $a = 0.8, b = 0.2$ 중규모 저수지는 $a = 0.7, b = 0.3$ 소규모 저수지는 $a = 0.6, b = 0.3$ 로 적용하여 연구를 진행하였다. 본 연구에서는 9곳의 저수지에 대하여 저수율의 가중치 a 를 0.8 ~ 0.5까지 변화를 주면서 연구를 진행하였다.

2.3 CSSPI의 산정 결과

2.3.1 저수율과 강수량의 표준정규분포화

Fig. 3은 섬진저수지의 저수율 자료와 강수량 자료의 표준정규분포화된 지수이다.

Fig. 3에서의 Storage Index에서 파란색의 라인까지는 관측치 자료로 만들어진 Index이고, 빨간색 선은 $AR(4)$ mode

Table 3. AIC of Autoregressive Model

Reservoirs name	AR(1)	AR(2)	AR(3)	AR(4)	AR(5)
Bangog	-9.460	-10.978	-10.976	-10.983	-10.982
Daesung	-10.010	-12.178	-12.178	-12.174	-12.177
Gaesim	-9.765	-11.598	-11.596	-11.599	-11.597
Idam	-10.145	-11.541	-11.547	-11.552	-11.533
Ildae	-9.654	-11.127	-11.139	-11.146	-11.153
Miho	-11.072	-12.107	-12.113	-12.116	-12.114
Sinbang	-9.600	-11.695	-11.758	-11.755	-11.755
Songnae	-10.378	-12.216	-12.213	-12.212	-12.209
Sumjin	-9.215	-11.786	-11.831	-11.830	-11.829

에 의해서 만들어진 Index이다. 그리고 Precipitation RCP 4.5 Index와 8.5 Index에서의 파란색 선은 Storage Index에서와 같이 관측치 자료로 만들어진 자료이고, 빨간색 선은 각각 RCP 4.5와 RCP 8.5로 인해서 만들어진 Index이다. 이 Precipitation의 Index는 즉, SPI를 의미한다. 만들어진 Storage Index는 저수율의 관개기간(4월~10월)에는 줄어 들고 비관개기간에는 늘어나는 일년단위의 경향과 짧게는 3년에서부터 6년, 12년 등의 경향을 보여준다. 관개기간은 일반적으로 농사를 짓는 시기를 의미하며 국내에서는 4월~10월 사이를 말하며 비관개기간은 관개기간외의 기간을 의미한다.

이와 같이 Precipitation RCP 4.5 Index에서도 비슷한 경향성을 보여주고 있다.

Precipitation RCP 8.5 Index에서는 RCP 4.5 Index와 비교하여 그 변화가 민감한 것으로 나타났다.

2.3.2 CSSPI 결과

Fig. 3의 Index를 저수율의 가중치 a 와 강수량의 가중치 b 를 변화시켜 저수율과 RCP 4.5 시나리오 자료로 만들어진 CSSPI가 Fig. 4의 (a)이고, 저수율과 RCP 8.5 시나리오 자료로 만들어진 CSSPI를 Fig. 4의 (b)에 나타내었다. Fig. 4의 결과를

보면 관측된 자료로 인해 만들어진 1991년부터 2015년까지의 CSSPI를 살펴보면 1년의 관개기간과 비관개기간의 주기성과 6년 등의 주기성을 나타내고 있다. 최근 극심한 가뭄이었던 2014년과 2015년의 CSSPI를 살펴보면 현저히 작은 지수를 나타내는 것을 보아 관개저수지의 용수공급의 상황을 잘 나타낸다. 그리고 미래의 CSSPI를 살펴보면 향후에도 3년의 주기성을 나타내는 가뭄과 6년의 큰 주기성을 가지는 것으로 보여진다. RCP 8.5 시나리오 자료로 만들어진 CSSPI와 비교 해보면 RCP 8.5 시나리오 자료로 만들어진 CSSPI가 지수가 크면 더 크게 작으면 더 작은 값을 나타내는 경향이 있는 것을 보여준다. 가중치의 변화에 따른 결과를 살펴보면, 관개저수지의 가중치 a 를 0.5에서 0.8까지 변화를 준 결과를 보면 관개기간에는 수량의 변화가 크고, 비관개기간에는 일정량의 수량을 저장하는 관개저수지의 특성으로 인해 CSSPI는 강수량보다 저수율의 영향이 큰 것으로 판단된다.

가중치에 대한 기준은 주관적인 것으로 해당되는 저수지의 중요성에 맞추어 적절하게 주어져야 할 것으로 보인다.

2.3.3 지역 평균 분석 결과

유역의 평균적인 변화를 알아보기 위해서 지역의 가중치

Fig. 4. CSSPI of Sumjin Reservoir Combined with Storage Index and Precipitation RCP 4.5 and 8.5 Index

는 고려하지 않고, 산술 평균하여, 호남지역, 영남지역, 중부지역의 CSSPI를 비교하였다.

호남지역의 저수를 지수와 RCP 4.5 시나리오 지수 및 RCP 8.5 시나리오 지수로 만들어진 CSSPI를 Fig. 5에 나타내었고, 영남지역과 중부지역은 각각 Figs. 6과 7에 나타내었다. 호남지역과 영남지역 그리고 중부지역의 CSSPI를 보여주고 있다. 전체적으로 호남, 영남 중부지역 모두에서 최근의 가뭄기간인 2014년과 2015년에 극심한 가뭄상태인 것을

보여주고 있다. 향 후 전망에 있어서도 호남지역, 중부지역, 영남지역은 비슷한 경향성을 나타내고 있다.

3. 결 론

가뭄분석을 위해서 일반적으로 SPI가 사용되었다. 하지만 SPI 경우 실제 농사나 생활용수에 영향을 미치는 저수량 등 주요 수문변수들에 대한 고려가 들어가지 않고 강수량

Fig. 5. CSSPI of Honam area Combined with Storage Index and Precipitation RCP 4.5 and 8.5 Index

Fig. 6. CSSPI of Yeungnam Area Combined with Storage Index and Precipitation RCP 4.5 and 8.5 Index

Fig. 7. CSSPI of Jungbu Area Combined with Storage Index and Precipitation RCP 4.5 and 8.5 Index

만을 사용하여 계산하고 있다. 따라서 본 연구에서는 농사나 가능공급용수량 등에 영향을 미치는 저수지의 상태까지 복합적으로 고려할수 있는 CSSPI 지수를 개발하였다. 본 연구에서 관개저수지의 용수공급에 대한 안정성을 평가하기 위하여 기존의 가뭄 평가지수인 표준 강수지수(Standardized precipitation index)에서 고려하지 않은 관개저수지의 저수율을 고려한 복합 표준 저수 및 강수지수(Compound standardized storage and precipitation index, CSSPI)를 새롭게 만들어 내었다.

호남지역, 중부지역, 영남지역으로 나누어 각 지역의 관개저수지 3곳을 선택하여 총 9곳의 관개저수지에 대하여 분석하였다. 만들어진 CSSPI는 기존 가뭄지수인 SPI의 장점과 더불어 저수지의 지역적 특성까지 고려한 결과를 잘 나타내었고, 관측된 자료로 부터의 CSSPI의 결과가 최근의 가뭄을 잘 반영한 것으로 나타난다. 이 CSSPI에서 나타난 경향성과 주기성을 고려하여 관개저수지의 용수공급에 대한 미래 대책과 방안을 정하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

추후 연구에서는 이번 연구에서 미래의 저수율에 대한 지수를 만들기 위해 AR 모델을 사용했지만, 여러 모델을 더 분석하여 여러 복합적인 요인들을 고려할 수 있는 방안이 필요할 것으로 판단되며, CSSPI의 주기성과 패턴에 대한 정확한 분석에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2018R1A2B6001799). 이에 감사드립니다.

References

- Dracup, J.A., Lee, K.S., and Paulson Jr., E.G. (1980). On the definition of droughts. *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 2, pp. 297-302.
- Edwards, D.C. (1997). *Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales*. Master's thesis, Colorado State University, CO, USA.
- Guttman, N.B., Wallis, J.R., and Hosking, J.R.M. (1992). Spatial comparability of the palmer drought severity index. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 28, No. 6, pp. 1111-1119.
- Im, K.J., Shim, M.P., Sung, K.W., and Lee, H.J. (2001). Estimation of drought indicator using various time series. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 34, No. 6, pp. 673-685.
- Kim, G.S., and Lee, J.W. (2011). Evaluation of drought indices using the drought records. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 8, pp. 639-652.
- Kim, S.J., Lee, K.Y., and Shin, D.W. (1995). Drought index calculation for irrigation reservoirs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 37, No. 6, pp. 103-111.
- Lee, J.J., and Lee, C.H. (2005). An application of various drought indices for major drought analysis in Korea. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 5, No. 4, pp. 59-69.
- Mckee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of 8th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, pp. 179-184.
- Oladipo, E.O. (1985). A comparative performance analysis of three meteorological drought indices. *Journal of Climatology*, Vol. 5, pp. 655-664.
- Park, T.W. (2016). *Stochastic simulation techniques for short-term forecasting and for long-term climate projections of extreme hydrometeorological events*. Master's thesis, Gyeongsang National University.
- Rao, A.R., and Padmanabhan, G. (1982). Analysis and modeling of Palmer's drought index series. *Journal of Hydrology*, Vol. 68, No. 1-4, pp. 211-229.
- Ryu, J.H., Lee, D.R., Ahn, J.H., and Yoon, Y.N. (2002). A comparative study on the drought indices for drought evaluation. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 35, No. 4, pp. 397-410.
- Shafer, B.A., and Dezman, L.E. (1982). Development of surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. *Proceedings of the 50th Annual Western Snow Conference*, pp. 164-175.
- Yoo, J.Y., Song, H.Y., Kim, T.W., and Ahn, J.H. (2013). Evaluation of short-term drought using daily standardized precipitation index and ROC analysis. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 5, pp. 1851-1860.

Received	July 9, 2019
Revised	July 11, 2019
Accepted	October 25, 2019