



# SPI 및 SDI 기반의 Seasonal ARIMA 모형을 활용한 가뭄예측 - 충주댐, 보령댐 유역을 대상으로 -

## Short Term Drought Forecasting using Seasonal ARIMA Model Based on SPI and SDI - For Chungju Dam and Boryeong Dam Watersheds -

윤영선<sup>a</sup> · 이용관<sup>b,†</sup> · 이지완<sup>c</sup> · 김성준<sup>d</sup>

Yoon, Yeongsun · Lee, Yonggwang · Lee, Jiwan · Kim, Seongjoon

### Abstract

In this study, the SPI (Standardized Precipitation Index) of meteorological drought and SDI (Streamflow Drought Index) of hydrological drought for 1, 3, 6, 9, and 12 months duration were estimated to analyse the characteristics of drought using rainfall and dam inflow data for Chungju dam (6,661.8 km<sup>2</sup>) with 31 years (1986-2016) and Boryeong dam (163.6 km<sup>2</sup>) watershed with 19 years (1998-2016) respectively. Using the estimated SPI and SDI, the drought forecasting was conducted using seasonal autoregressive integrated moving average (SARIMA) model for the 5 durations. For 2016 drought, the SARIMA had a good results for 3 and 6 months. For the 3 months SARIMA forecasting of SPI and SDI, the correlation coefficient of SPI3, SPI6, SPI12, SDI1, and SDI6 at Chungju Dam showed 0.960, 0.990, 0.999, 0.868, and 0.846, respectively. Also, for same duration forecasting of SPI and SDI at Boryeong Dam, the correlation coefficient of SPI3, SPI6, SDI3, SDI6, and SDI12 showed 0.999, 0.994, 0.999, 0.880, and 0.992, respectively. The SARIMA model showed the possibility to provide the future short-term SPI meteorological drought and the resulting SDI hydrological drought.

**Keywords:** Drought forecasting; seasonal ARIMA model; SPI; SDI

### 1. 서 론

가뭄관리는 해당지역에서 가뭄이 발생한 후 얼마나 긴 시간동안 심각하게 지속되는지를 파악하여 대응하는 위기관리(crisis management)와 가뭄이 발생하기 전에 이를 예측하여 사전에 대비하는 위험관리(risk management)가 있다. 가뭄상황은 기상학적 가뭄, 농업적 가뭄, 수문학적 가뭄, 사회경제적 가뭄으로 분류하여 각각을 지수형태로 표현하여 해당가뭄을 정량화시키는 것이 일반적이다. 우리나라에서는 현재 기상학적 가뭄지수로는 SPI(Standardized Precipitation Index, McKee

et al., 1993), SPEI(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, Vicente-Serrano et al., 2010) 등이 대표적으로 사용되고 있다. 이에 대해 Kim and Lee (2017)는 2010년 1월부터 2015년 12월까지 총 6년에 대한 SPI 1, 3, 6, 9, 12개월의 산정결과를 월 단위 분포도로 정리하여 가뭄해석에 대한 활용성을 분석한 바 있으며, Nam et al. (2015) 및 Nam et al. (2017)는 SPEI를 미래 RCP 기후변화 시나리오와 북한에 대해 적용해 극한 가뭄 평가를 수행한 바 있다. 농업적 가뭄지수로는 SMI(Soil Moisture Index, Baier, 1969), DCI(Dry Condition Index, Lee et al., 2017), RDI(Reservoir Drought Index, Lee et al., 2018) 등이 있으며, 수문학적 가뭄지수로는 MSWSI(Modified Surface Water Supply Index, Kwon et al., 2006), WADI(Water Availability Drought Index, Park et al., 2011) 등이 개발되어 활용되고 있다.

한편, 우리나라의 다목적 댐들은 건설이후 지난 수십 년 동안 유역에서 댐으로의 유입량자료를 계속하여 왔다. 이와 같이 장기간으로 축적된 시계열자료를 활용한 수문학적 가뭄지수에 대한 다양한 연구가 필요한 실정이다. 그 예로, 수문학적 가뭄지수의 하나인 하천수 가뭄지수(Streamflow Drought Index, SDI)와 기상학적 가뭄지수를 활용하여 가뭄상황을 표현하고 예측하는 유역가뭄 관리기법에 대한 연구가 진행되어 왔다. Tabari et al. (2012)은 지속시간에 따른 SDI를 산출하여

<sup>a</sup> Researcher, Geum River Survey Division, Korea institute of Hydrological Survey, 1201, Office building, Kintex, 217-59 Kintex-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10390, Korea

<sup>b</sup> Ph.D. Student, Dept. of Civil, Environmental, and Plant Engineering, Konkuk University, Seoul 05029, Korea

<sup>c</sup> Ph.D. Candidate, Dept. of Civil, Environmental, and Plant Engineering, Konkuk University, Seoul 05029, Korea

<sup>d</sup> Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul 05029, Korea

† **Corresponding author**

Tel.: +82-444-0186 Fax: +82-444-0186

E-mail: leeyg@konkuk.ac.kr

Received: March 14, 2018

Revised: October 24, 2018

Accepted: November 6, 2018

과거 가뭄사상에 대해 평가하였고, Hisdal and Tallaksen (2013)은 기상학적 및 수문학적 가뭄특성을 고려하여 덴마크 지역의 가뭄특성을 분석하였다. Tigkas et al. (2012)은 Reconnaissance Drought Index와 하천수 가뭄지수를 이용하여 기상학적 가뭄지수가 수문학적 가뭄을 얼마만큼 평가할 수 있는지를 분석한 바 있으며, Liu et al. (2012)은 기상학적 가뭄 지수와 수문학적 가뭄지수를 이용하여 해당 지역의 과거 가뭄사상을 재평가하여 미래 가뭄위험도를 추정하였다. 또한 Alam et al. (2016)은 표준강수지수와 확률론적 모델을 이용하여 가뭄에 대한 조기예측을 연구하였다. SDI는 다양한 수문학적 변수 중에서 하천유량만을 이용하여 가뭄의 심도-지속시간-면적-빈도의 관계를 심도-빈도의 2차 관계로 간단하게 표현함으로써 간편하게 산정할 수 있는 장점이 있다. 가뭄의 예측은 추계학적 수문분석기법인 AR(Auto Regressive), MA(Moving Average), ARMA(AR+MA), ARIMA(Autoregressive integrated moving average) 등을 활용하는 방법이 있을 수 있다.

본 연구에서는 충주댐 유역은 31년(1986~2016), 보령댐 유역은 19년(1998~2016년) 동안의 강수량 및 댐 유입량을 이용하여 기상학적 가뭄지수인 SPI와 수문학적 가뭄지수인 SDI를 산정한 후, 이들 SPI와 SDI의 산정된 시계열 자료들을 대상으로 한 각각의 확률론적 SARIMA(Seasonal ARIMA) 모형으로 구성하여, SPI와 SDI 산정결과와 비교분석함으로써 이들 가뭄지수의 예측가능성을 살펴보고자 하였다. 두 가뭄지수는 1, 3, 6, 9, 12개월에 대한 각각의 지수를 산정하였으며, 이들 중에서 통계분석을 통하여, 적합한 SARIMA 모형을 선정하는 과정을 거쳤다(Fig. 1).

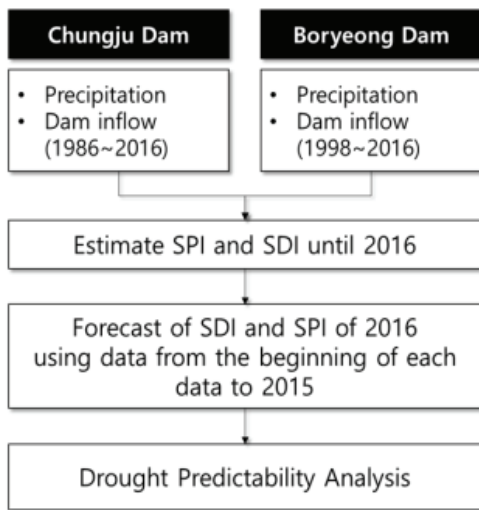


Fig. 1 Flow chart of the study

## II. 재료 및 방법

### 1. 대상 유역

본 연구에서는 한강과 금강 유역에 위치하고 있는 충주댐과 보령댐 유역을 대상으로 하여 분석을 실시하였다. 충주댐 유역은 충주호를 포함하는 충주댐 상류 유역으로 유역면적은 6,661.8 km<sup>2</sup>이다. 충주댐 유역의 평균표고는 609.1 m, 유역 평균경사는 36.9%로 우리나라 북동부 산악지역에 위치해 있으며, 산림면적은 5,573.1 km<sup>2</sup>로서 유역면적의 84.6%에 이르는 산림유역이다. 행정구역상으로는 강원도, 충청북도, 경상북도가 각각 69.9%, 28.4%, 1.7%를 차지하고 있다. 주요 유입하천으로는 본류인 남한강, 지류인 제천천과 동달천이 합류되며 연평균 강수량은 1,359.5 mm이며, 평균기온은 9.4 °C이다. 충주호는 한강유역의 홍수조절 및 한강유역의 용수난을 해결하기 위해 건설된 다목적댐 저수지로 1985년 10월에 완공되어 담수가 시작되었고, 최대저수용량은 2,750 10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>, 저수면적은 97 km<sup>2</sup>, 총 길이는 75 km, 최대 수심은 83 m이다(Ahn et al., 2013). 충주댐은 서울 수도권 지역에 연간 33억 8,000만톤의 각종 용수를 공급하는 중요한 공급원이다.

보령댐 유역은 금강서해유역에 위치한 유역면적 163.6 km<sup>2</sup>의 표준유역으로 유역 전반에 걸쳐 웅천천이 흐르고 있다. 보령댐 유역의 북측으로는 차령산맥이 유역계를 이루고 있으며 행정구역상으로는 충청남도 부여군의 외산면과 보령시 성주면, 미산면 등이 보령댐 유역에 포함되어 있다. 보령댐 유역에 위치한 웅천천은 지방 2급 하천으로 총 유로연장 36.0 km 중 22.3 km가 보령댐 유역 내에 위치하고 있으며 웅천천의 총 유역면적 234.8 km<sup>2</sup> 중 69.7%에 해당하는 163.6 km<sup>2</sup>가 보령댐 유역에 포함된다. 보령댐 유역은 전체 유역면적의 75 % 이상이 산림으로 이루어져 있으며, 시가화 면적은 전체 유역면적의 약 2 %로 매우 작은 비중을 차지하고 있다. 보령댐 유역에서 가장 근거리(약 11 km)에 위치한 보령기상대의 관측기록을 살펴보면 강수량 평년값 (1981~2010년)은 1,244.3 mm이며, 보령 기상대 관측 이래 일 최고기온과 최저기온은 각각 37.8 °C, -17.6 °C로 관측되었다. 보령댐은 국토 균형개발을 위한 서해안 개발계획에 따라 1992년 건설을 시작하여 1998년 준공된 다목적댐으로, 총 저수용량은 116.9 백만m<sup>3</sup>, 유효저수용량은 98.7 백만m<sup>3</sup>, 계획홍수위 및 상시만수위는 각각 EL. 75.5 m와 74.0 m이다. 보령댐은 충청남도 서북부 지역에 용수공급을 담당하며, 충청남도 당진시, 보령시, 서산시, 서천군, 예산군, 청양군, 태안군, 홍성군 등 총 8개 지역에 생공용수를 공급하고 있다(Choi, 2017).

가뭄기록조사보고서(2001)에 따르면, 최근 40년 동안 한

반도에서는 5~8년마다 극심한 가뭄이 발생하고 있고, 1990년 이후에는 1~2년마다 전국 또는 지역에 따라 크고 작은 가뭄이 발생하고 있다. 특히 충주댐 유역이 위치한 충북 지역과 보령댐 유역이 위치한 충남 지역의 가뭄은 1988, 2001, 2006, 2008~2009, 2012, 2014년에 발생한 것으로 보고되어 있다.

## 2. 표준강수지수와 하천수 가뭄지수

표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)는 가뭄이 물의 수요에 비해 상대적으로 부족한 강수량에 의해 시작한다는 것에 착안하여 개발되었다(Mckee et al., 1993). 최초 Mckee et al. (1993)은 강수변수만을 가지고 계절단위(단기)부터 다년(장기)간의 다양한 시간간격으로 습하거나 건조한 상태를 평가하는 목적을 가지고 있었다. 이러한 다양한 시간간격에 대한 건조한 상태의 평가로 수자원의 가용성(water resources availability)에 대한 가뭄영향을 반영할 수 있다는 것이었다. 이러한 이유로 이 지수는 3, 6, 12, 24, 48개월 등과 같은 기간을 대상으로, 각각의 기간별로 현재(오늘)의 SPI를 계산하고 지도형태의 분포도로 해석할 수 있게 고안되었다. 여기서 짧은 기간의 시간축척은 농업적 관심에 사용될 수 있으며, 비교적 장기간의 시간축척은 수자원 공급 관리에 사용될 수 있다(Oh et al., 2011). 우리나라의 경우, 1년 이내 단기 가뭄의 경우는 SPI 6개월 이하에서 잘 표현하였으며, Carry-over 된 2년 연속가뭄(2014~2015)의 경우 SPI의 개월 수를 늘릴수록 봄철부터의 가뭄을 잘 표현하는 것으로 나타났다(Kim and Lee, 2017).

SPI는 관측강수가 실제 강수기록에 대한 정규분포와 적합한 확률분포에 대하여, 장기간의 평균에서 벗어나는 표준편차로 표현된다. 따라서 우선적으로 강수는 정규분포를 따르지 않으므로, 정규 분포에 맞게 변화시키는 작업을 거치게 된다. 일반적으로 특정 지점의 장기간에 대한 SPI의 평균과 표준편차가 각각 0과 1이 되도록 하는 정규분포가 변환에 사용되고 있으며(Edwards and Mckee, 1997), 최종적으로 산정한

SPI는 Table 1과 같이 구분하였다. SPI 계산 과정에 대한 자세한 설명은 Lloyd-Hughes and Saunders (2002)에서 찾아볼 수 있다.

수문학적 가뭄지수인 하천수 가뭄지수(Streamflow Drought Index, SDI)는 Eq. (1)~(3)과 같이 계산되며,  $Q_{i,j}$ 는 월 유량, 누적 값  $V_{i,k}$ 는 Eq. (1)과 같이 계산된다(Nalbantis, 2008).

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,j}, (i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots, 12, k = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

여기서,  $i$ 는 수문년(水文年, hydrological year)을 나타내고,  $j$ 는 해당 수문년에 속한 월을 의미한다( $j=1$ 은 10월이며,  $j=12$ 는 9월을 의미).  $V_{i,k}$ 는  $i$ 번째 연도에서  $k$ 번째 기간 동안 누가한 유량이다. 예를 들어  $k=1$ 이면 특정 년도의 10월부터 12월,  $k=2$ 이면 10월부터 그 다음해의 3월,  $k=3$ 이면 10월부터 그 다음해 6월까지 기간을 의미한다. 누가한 유량  $V_{i,k}$ 를 이용하여 SDI는 특정  $i$ 번째 연도의  $k$ 기간에 대하여 Eq. (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{s_k} (i = 1, 2, \dots, k = 1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

여기서,  $\bar{V}_k$ 와  $s_k$ 는 각각 누적한 하천수량의 평균과 표준편차를 나타낸다. 임계수준은 주로 평균인  $\bar{V}_k$ 가 사용된다. 작은 규모의 하천에는 유량이 Gamma 분포형에 근사하게 되어 확률분포형이 왜곡되므로 유량을 정규분포에 적합하게 변환하여야 한다. 2변수 대수정규(log-normal) 분포형으로 변환하면, SDI는 최종적으로 Eq. (3)과 같으며,  $y$ 는 Eq. (4)와 같이 하천수량에 자연로그를 취한 값이다.

$$SDI_{i,k} = \frac{y_{i,k} - \bar{y}_k}{s_{y,k}} (i = 1, 2, \dots, k = 1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

$$y_{i,k} = \ln(V_{i,k}) (i = 1, 2, \dots, k = 1, 2, 3, 4) \quad (4)$$

Nalbantis and Tsakiris (2009)에 의하면, SDI에 의해 정의되는 수문학적 가뭄은 값이 -2 이하이면 극한 가뭄(extremely drought), -1.5 이하이면 심각한 가뭄(severe drought), -1 이하이면 중간 가뭄(moderate drought), 0 이하이면 가벼운 가뭄(mild drought), 0 이상이면 가뭄이 아닌 것으로 분류되고 있다(Kim and Chung, 2017).

**Table 1** Classification Range of Drought Condition for SPI value

Classification	SPI Index
Extremely wet	2.0 < SPI
Very wet	1.5 < SPI < 2.0
Moderately wet	1.0 < SPI < 1.5
Near normal	-1.0 < SPI < 1.0
Moderately dry	-1.5 < SPI < -1.0
Severely dry	-2.0 < SPI < -1.5
Extremely dry	SPI < -2.0

**Table 2** Classification Range of Drought Condition for SDI value

Classification	SDI Index
Non-drought	$0.0 \leq \text{SDI}$
Mild drought	$-1.0 \leq \text{SDI} < 0.0$
Moderate drought	$-1.5 \leq \text{SDI} < -1.0$
Severe drought	$-2.0 \leq \text{SDI} < -1.5$
Extreme drought	$\text{SDI} < -2.0$

### 3. ARIMA 모형

ARIMA(autoregressive integrated moving average)은 Box and Jenkins (1976)에 의해서 이론적으로 체계화 된 후 시계열 분석에서 가장 많이 활용되고 있는 모형 중 하나이다. ARIMA 모형은 뛰어난 예측성과를 보일 뿐만 아니라 다른 예측모형에 비해 정교한 이론적 토대를 가지고 있기에 실제 예측작업 뿐만 아니라 새로운 시계열 예측모형의 개발에 있어서 개발된 모형의 성능을 평가하기 위한 기준 모형으로 사용되고 있다(Shin and Jeong, 2011). 비록 비선형시계열분석에 있어 한계점을 가지고 있으나 본 연구에서와 같이 가뭄지수를 활용한 시계열가뭄분석에는 적합한 모형으로 볼 수 있다.

ARIMA 모형은 기본적으로 설명 또는 예측하려고 하는 시계열의 과거 자료와 모형의 설정에 수반되는 오차의 함수로 구성되는데, 해당 시계열이 가지고 있는 운동법칙을 과거 값에 대한 특정 모형의 설정을 통해 최대한 반영하고, 해당 시계열의 과거 값으로 설명되지 않는 부분은 오차에 대한 특정 모형의 설정을 통해 추가적으로 설명한다. 이러한 개념에 기초하여 T개 관측 값의 특정 시계열( $x(t) : t = i, \dots, T$ )에 대한 ARIMA( $p, d, q$ ) 모형은 다음 Eq. (5)와 같이 해당 시계열의 안정적인 과거 움직임(movement)에 대한 모형  $A_p(L)(1-L)^d x_t$  과 오차의 현재 및 과거 움직임에 대한 모형  $B_q(L)\epsilon_t$ 의 합으로 구성된다. 따라서 특정 시계열 ARIMA 모형은 결정 모수  $p, d, q$ 에 의해 설정되며, 모수  $p$ 와  $q$ 는 각 시계열의 자기회귀(autoregressive) 정도와 오차의 이동평균(moving average) 정도를 결정하고, 모수  $d$ 는 해당 시계열의 안정성(stationarity) 또는 정상성을 확보하기 위한 차분을 뜻한다.

$$A_p(L)(1-L)^d x_t = B_q(L)\epsilon_t \quad (5)$$

마지막으로 자기회귀(AR) 모형  $A_p(L)$ 과 이동평균(MA) 모형  $B_q(L)$ 의 구체적인 함수는 다음 Eq. (6), (7)과 같이 해당 시계열 및 오차의 특정 시차에 대한 계수의 합 또는 차로써 설정된다.

$$A_p(L) = 1 - a_1L - a_2L^2 - \dots - a_pL^p \quad (6)$$

$$B_q(L) = 1 + b_1L + b_2L^2 + \dots + b_qL^q \quad (7)$$

여기서 해당 시계열이 특정 형태의 계절성(seasonality)이 나타날 경우 계절성을 ARIMA 모형에 반영할 필요가 있다. 이와 같이 계절성을 반영한 ARIMA 모형을 계절성(seasonal) ARIMA(또는 SARIMA) 모형이라고 하며, 모형의 형태는 아래의 Eq. (8)과 같이 주어진다. 그리고 특정 시계열에 대한 SARIMA( $p, d, q$ )( $P, D, Q$ )( $s$ ) 모형은 ARIMA 모형의 결정모수  $p, d, q$  뿐만 아니라 계절적 주기를 나타내는 모수  $s$ 와 계절적 안정성을 위한 시차의 정도를 나타내는 모수  $D$  및 시차  $(1-L^s)$  그리고 Eq. (6), (7)의  $A_p(L)$  및  $B_q(L)$ 과 유사한 함수를 갖고 있는  $A_p^s(L^s)$ 와  $B_q^s(L^s)$ 를 추가로 요구한다(Eq. 9와 10).

$$A_p(L)A_p^s(L^s)(1-L)^d(1-L^s)^D X_t = B_q(L)B_q^s(L^s)\epsilon_t \quad (8)$$

$$A_p^s(L^s) = 1 - a_{s1}L^s - a_{s2}L^{s2} - \dots - a_{sp}L^{sp} \quad (9)$$

$$B_q^s(L^s) = 1 + b_{s1}L^s + b_{s2}L^{s2} + \dots + b_{sq}L^{sq} \quad (10)$$

시계열 자료를 SARIMA 모형에 적용하기 위해서는 시계열의 안정성을 판단하여야 한다. 안정적인 시계열(stationary time series data)이란 시간이 흘러도 시계열의 평균, 분산 등이 변하지 않는 시계열을 뜻하며, 불안정적 시계열(non-stationary time series data)은 t년도의 데이터가 (t-1)년도의 데이터에 의존하여 시간의 흐름에 따라 평균과 분산이 변화하는 추세가 있는 시계열을 의미한다. 불안정한 시계열의 경우 단위근 검정(Unit Root Tests)를 통해 검정한 후, 1차 차분으로 변환을 통해 정상시계열로 변환할 수 있다. 이후 시계열 그래프에서 변동에 산포가 있는 계절성이 있는지를 조사한 후 계절차분을 취한다. 시간에 따른 추세가 불안정적인 시계열 자료들로 분석을 수행할 경우 종속변수와 독립변수 사이에 인과관계가 없어도 회귀계수가 유의하고 결정계수 또한 높은 값으로 나올 수 있으며, 이러한 현상을 허구적 회귀(spurious regression)라 부른다(Granger and Newbold, 1974). 본 연구에서는 산정한 기준기간별 SPI와 SDI의 시계열 자료를 이용하여 단위근을 가지고 있는지 검정하는 방법으로 가장 일반적으로 사용되는 기본적인 방법인 ADF(Augmented Dickey-Fuller) 검정을 실시하였다. ADF 검정법은 오차항의 자기상관을 보정하기 위하여 Dickey-Fuller 검정법을 보완한 것으로 검정방법 및 검정력

(power of test)에 대한 자세한 내용은 선행연구(Cho and Choi, 2005)에서 확인할 수 있다.

시계열 자료의 안정성이 확보되면, 자기상관함수(Auto correlation function, ACF)와 편자기상관함수(Partial Auto Correlation Function)를 통해 SARIMA 모형의 차수의 범위를 결정하고 매개변수를 잠정적으로 산정하는데 이를 모형의 식별(model identification)이라고 한다. 본 연구에서는 자기상관함수(ACF)와 부분자기상관함수(PACF)의 그래프를 참고하여 시계열자료의 차수 범위를 정하였고, 모형 선택의 기준(model selection criterion)으로 사용되는 통계량인 AIC(Akaike's Information Criterion)와 SBC(Schwartz Bayesian Criterion)을 모형식별 및 차수결정에 이용하였다. AIC와 SBC는 다음 Eq. (11), (12)와 같이 정의된다.

$$AIC = n \ln \hat{\sigma}_\epsilon^2 + 2(p+q) \quad (11)$$

$$SBC = n \ln \hat{\sigma}_\epsilon^2 + 2(p+q) \ln n \quad (12)$$

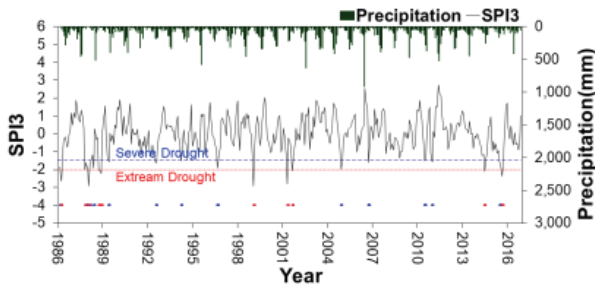
여기서,  $n$ 은 시계열 관측 값의 개수이며,  $\hat{\sigma}_\epsilon^2$ 는  $\sigma_\epsilon^2$ 의 최대가 능도추정량이다.  $p+q$ 는 일종의 벌칙함수로서  $p$ 와  $q$ 가 커짐에 따라 AIC 값을 증가시킨다. 모형에 포함되는 모수의 개수

가 증가하면,  $\hat{\sigma}_\epsilon^2$ 의 값이 작아지며, AIC 값도 작아질 것이나 추가되는 모수의 개수만큼 AIC 값을 크게 하므로 모수를 많이 포함시키는 것이 반드시 AIC 값을 줄이는 것은 아니다.

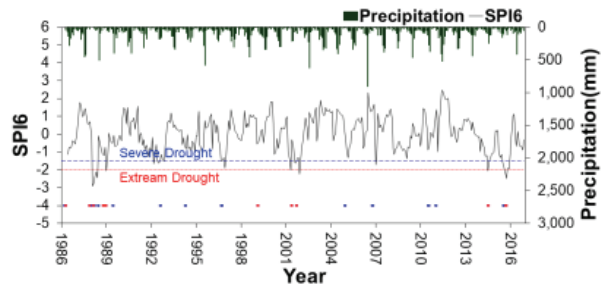
### III. 결과 및 고찰

#### 1. SPI 및 SDI 가뭄지수 산정 결과

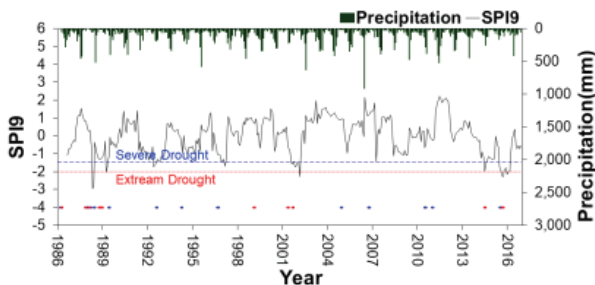
충주댐 유역(1986~2016년)과 보령댐 유역(1998~2016년)에 대하여 SPI와 SDI를 해당 유역에 내린 강수량과 댐 유입량을 이용하여 산정하고, 결과를 분석하였다(Fig. 2 and 3). 충주댐 유역의 가뭄 심도 및 기간은 SPI3, SPI6의 경우 1980년대 후반과 2000년대 초반, 2014~2015년의 가뭄을 잘 표현하였으며(Fig. 2a, 2b), SPI9, SPI12는 2014~2015년의 가뭄을 잘 표현하였다(Fig. 2c, 2d). SDI의 경우 대부분 2014~2015년의 가뭄을 잘 나타내는 것으로 나타났다. 보령댐 유역의 가뭄 심도 및 기간은 SPI3의 경우(Fig. 3a) 2001년과 2014~2016년이 극심한 가뭄인 것으로 나타났으며, SPI6, SPI9(Fig. 3b, 3c) 역시 동 기간에 대한 가뭄이 적절하게 표현되는 것을 확인하였다. SDI 값도 SPI와 유사한 경향으로 나타나고 있으나, 극심한 가뭄은 SPI보다 SDI3, SDI6에서 더 확연히 나타나는 모습을 보였다(Fig. 3e, 3f).



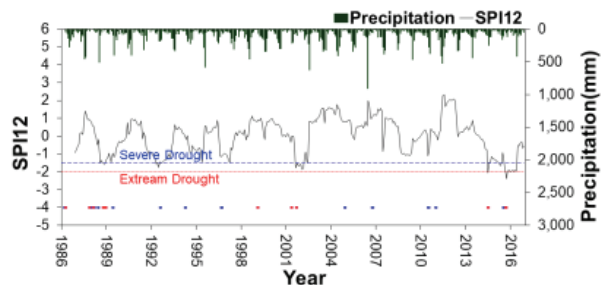
(a) SPI3



(b) SPI6



(c) SPI9



(d) SPI12

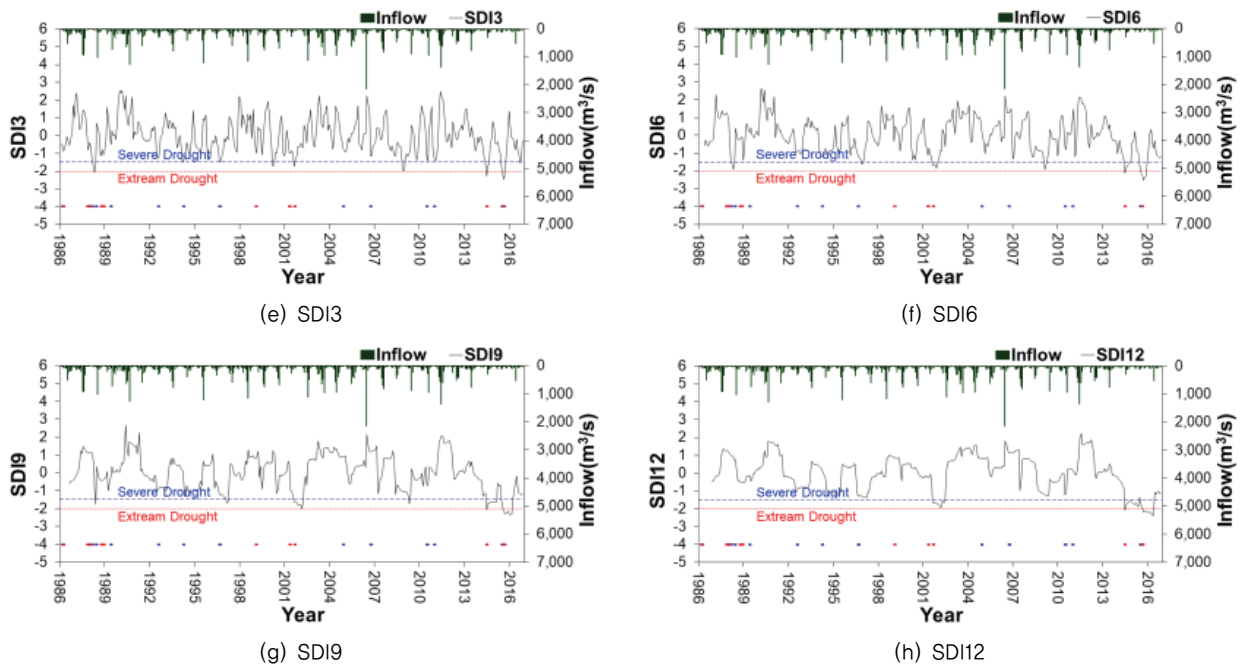
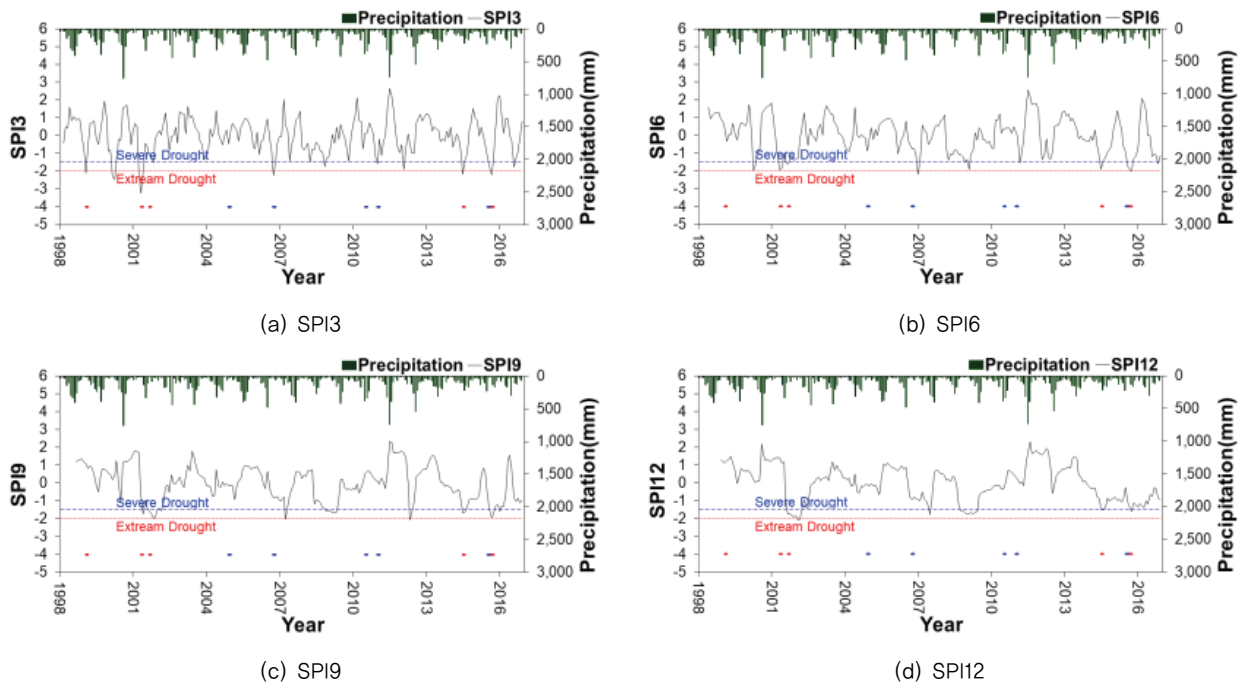


Fig. 2 SPI and SDI values from 1986 to 2016 at Chungju Dam watershed



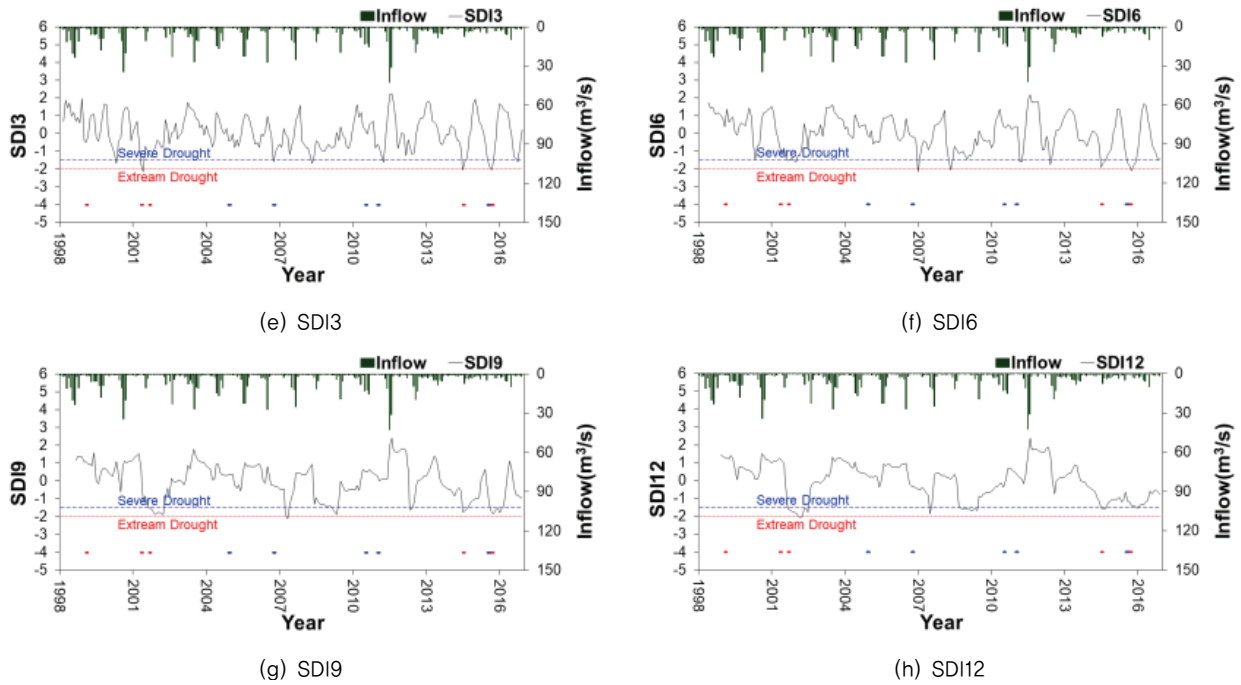


Fig. 3 SPI and SDI values from 1998 to 2016 at Boryeong Dam watershed

2. SARIMA 모형 구축 및 검증

SARIMA 모형을 통한 시계열 분석에 앞서 안정적인 충주댐과 보령댐의 SPI, SDI 자료를 바탕으로 ADF 검정을 실시하였다(Table 3). 검정통계량(test statistic)의 값이 양수로 나타날 경우 시계열이 단위근을 갖는다는 귀무가설을 기각하지 못함을 의미하고, 매우 큰 음의 값을 가지면 임계치로부터 판단할 때 1% 유의수준의 단위근을 갖는다는 귀무가설을 기각하는 안정적 시계열이라고 판단할 수 있다. 검정 결과 두 유역의 SPI와 SDI 대부분 검정통계량 기준 및 p-value가 대부분 0.05

보다 작게 나타나 안정적 시계열로 판단되었다. 그러나 각 SPI와 SDI 시계열 자료는 수문시계열(강우 및 유입량) 자료를 이용하기 때문에 계절주기를 가지는 시간적인 범위 안에서 매년 진동처럼 주기적으로 반복되는 경향이 나타나는 계절성을 보임을 알 수 있으며, 계절성을 제거하기 위해 계절차분(seasonal differencing)을 실시하였다. 계절차분의 항에 1차 차분이 포함되어 있으므로 계절차분만으로 시계열의 추세를 제거할 수 있었다.

Table 3 Test results of Augmented Dickey–Fuller (ADF) about SPI and SDI at Chungju Dam and Boryeong Dam watershed

Type	Chungju Dam		Boryeong Dam	
	test statistic	p-value	test statistic	p-value
SPI1	-6.5506	<0,01	-6.7347	<0,01
SPI3	-5.5808	<0,01	-6.6995	<0,01
SPI6	-4.4514	<0,01	-6.3229	<0,01
SPI9	-4.4530	<0,01	-4.0893	<0,01
SPI12	-3.8293	<0,01	-3.4086	0,056
SDI1	-5.4236	<0,01	-5.7773	<0,01
SDI3	-4.4986	<0,01	-5.8478	<0,01
SDI6	-4.0070	<0,01	-5.7743	<0,01
SDI9	-4.3738	<0,01	-3.6900	0,026
SDI12	-3.7193	0,023	-3.2111	0,088

시계열 자료의 안정성의 검증 뒤 AIC와 SBC 통계 값을 통해 최적 SARIMA 모델을 선정하였다(Table 4). 선정된 모형은 결정계수(Coefficient of determination,  $R^2$ )를 통해 검증하였다. 두 유역에서 산정결과 1개월의 단기간 자료를 활용해 산정하는 각 지수(SPI1, SDI1)를 제외한 나머지 지수는 모두  $R^2$ 가 0.65이상으로 나타났다. 특히 모든 유역에서 활용하는 자료의 기간이 길어질수록  $R^2$ 값이 높아지는 모습을 보이고 있다. 이는 4계절이 뚜렷하며 여름철에 강우가 집중되는 우리나라의 특성상 단기간의 자료를 활용할 경우 강우 및 유출량 패턴의 변동성이 크고, 장기간의 자료를 활용할 경우 강우 패턴이 일정해지기 때문일 것으로 판단된다.

추정된 모형의 적합성을 검증하기 위해 SPI 및 SDI 계열의 잔차(residuals)에 대한 포트만토(Portmanteau) 검정을 실시했다. 잔차에 대한 분석결과, 제시된 통계량에 대한 ACF, PACF의 값이 모두 유의 수준보다 큰 것으로 나타났으며, 포트만토 검정에서도 각 lag수준의 p값을 검정한 결과 잔차에 대해서도 문제가 없는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 선정된 모형 선택 및 모수 추정이 만족할 수준임을 확인할 수 있었다.

### 3. 가뭄 예측 및 비교분석

검증을 통해 적합한 SARIMA 모델을 선정하고 각 유역에 대한 SPI, SDI series의 예측을 실시하였다. SARIMA모형의 예측에 적용된 기간은 충주댐은 1986년 1월부터 2015년 12월까지의 시계열 자료를 사용하여 2016년 시계열 자료를 예측하였고, 보령댐은 1998년 1월부터 2015년 12월까지의 시계열 자료를 사용하여 2016년 시계열 자료를 예측하였다(Table 5). Table 5에서 평균절대백분율오차(Mean Absolute Percentage Error, MAPE)는 예측 값이 관측 값과 괴리 정도를 의미하며 일반적으로 오차율로 표현할 수 있다. 이는 관측 값이 작은 경우 상대오차의 비율은 크다는 것을 의미한다. 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)는 예측 값과 관측 값이 어느 정도 오차가 발생하는지 나타내는 계수로, 낮을수록 예측 값과 관측 값의 오차가 거의 없는 결과를 나타낸다. 주로 SPI, SDI 모두 기준기간이 늘어날수록 예측 추정치의 MAPE, RMSE가 점점 낮게 나타나고 있고, 기준기간이 늘어날수록 예측 추정치의 정확도가 높아지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4와 5는 2016년 충주댐, 보령댐 유역의 가뭄지수 관측 값과 SARIMA 모형의 예측 값에 대하여 비교분석한 것이다.

**Table 4** Selection of optimal SARIMA model through Akaike's Information Criterion (AIC) and SBC (Schwartz Bayesian Criterion) for Chungju Dam and Boryeong Dam watershed

Type	Chungju Dam				Boryeong Dam			
	Model	$R^2$	AIC	SBC	Model	$R^2$	AIC	SBC
SPI1	SARIMA (1,0,0)(0,1,1)[12]	0.413	1032.15	1077.73	SARIMA (1,0,2)(0,1,1)[12]	0.430	626.96	646.86
SPI3	SARIMA (0,0,2)(0,1,1)[12]	0.674	834.29	857.37	SARIMA (2,0,2)(0,1,1)[12]	0.674	492.09	511.94
SPI6	SARIMA (0,0,5)(0,1,1)[12]	0.758	715.03	738.06	SARIMA (1,0,5)(0,1,1)[12]	0.780	403.16	422.92
SPI9	SARIMA (1,0,8)(0,1,1)[12]	0.842	521.77	544.75	SARIMA (1,0,8)(0,1,1)[12]	0.859	327.23	346.90
SPI12	SARIMA (1,0,0)(0,1,2)[12]	0.921	247.38	262.66	SARIMA (1,0,1)(2,1,1)[12]	0.914	212.81	232.39
SDI1	SARIMA (1,0,0)(0,1,1)[12]	0.543	984.36	1007.47	SARIMA (1,0,0)(0,1,1)[12]	0.410	517.25	527.21
SDI3	SARIMA (2,0,2)(0,1,1)[12]	0.767	723.60	746.68	SARIMA (2,0,3)(0,1,1)[12]	0.719	411.78	431.63
SDI6	SARIMA (1,0,8)(0,1,1)[12]	0.805	640.40	663.43	SARIMA (1,0,5)(0,1,1)[12]	0.814	350.35	370.11
SDI9	SARIMA (0,0,8)(0,1,1)[12]	0.859	486.66	509.64	SARIMA (1,0,8)(0,1,1)[12]	0.863	313.24	332.91
SDI12	SARIMA (2,0,1)(0,1,2)[12]	0.938	173.76	196.68	SARIMA (1,0,1)(0,1,2)[12]	0.938	120.66	143.49



**Table 5** Statistical analysis results for SPI, SDI series using SARIMA at Chungju Dam and Boryeong Dam watershed

Type	Chungju Dam		Boryeong Dam	
	MAPE	RMSE	MAPE	RMSE
SPI1	136,649	0.980	178,109	0.996
SPI3	189,219	0.739	167,778	0.706
SPI6	131,376	0.620	131,939	0.566
SPI9	104,031	0.462	126,736	0.458
SPI12	67,819	0.314	70,549	0.346
SDI1	204,067	0.914	210,161	0.800
SDI3	138,018	0.625	200,735	0.601
SDI6	149,562	0.549	102,089	0.496
SDI9	71,707	0.441	121,380	0.449
SDI12	41,527	0.279	101,609	0.255

각 시계열 자료의 예측 값은  $\pm 95\%$ 의 신뢰구간에서 대부분 만족하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 각 유역의 SPI1, SDI1의 경우 예측 추정치가 관측치를 잘 반영하지 못하고 있음을 보였다. 이는 앞서 선정된 SPI1, SDI1의 최적 SARIMA 모형이 다른 SPI, SDI series에 비해 적합성이 떨어지기 때문인 것으로 보인다.

각 가뭄지수에 적합한 모형으로 산정한 예측 값을 기간별

로 3, 6, 9, 12개월로 나누어 표준오차와 상관관계를 산정한 결과(Table 6 and 7), 두 유역에서 예측기간에 대한 SPI1의 상관계수는 음수 값으로 모두 -0.5 이하인 뚜렷한 음적 선형관계를 갖는 것으로 나타났으며, 예측 기간이 짧을수록 강한 양적 선형관계를 갖는 경향성을 보였다. 또한 충주댐, 보령댐 유역 모두 각 가뭄지수의 기준기간이 3개월, 6개월에서 상관계수가 크게 나타나고 있으며, 각 SPI, SDI series는 기준기간이 높아질수록 상관계수가 크게 나타나고 있는 것을 확인하였다. 충주댐은 SPI3, SPI6, SPI9, SPI12에서 예측기간 3개월 일 때 상관계수가 각각 0.960, 0.990, 0.992, 0.999의 높은 상관관계를 보이고 있고 6개월 예측기간은 SPI9에서 0.980의 높은 상관관계를 나타냈다. SDI series에서는 SDI9에서 예측기간 6개월, 9개월에서 각각 상관계수 0.972, 0.869로 비교적 높은 상관관계를 보였다(Table 6). 보령댐은 예측기간 3개월일 때 SPI3의 상관계수가 0.999로 높은 상관관계를 보였고 SPI6에서 0.994를 나타냈다. 예측기간 6개월에서는 SPI9가 상관계수 0.976으로 나타났고, SPI3은 0.845를 나타냈다. SDI series에서는 예측기간 3개월에서 SDI3, SDI6, SDI12가 각각 0.999, 0.880, 0.992의 높은 상관관계를 보이고, 6개월 예측기간은 SDI6, SDI9, SDI12에서 각각 0.847, 0.969, 0.986의 높은 양적 상관관계를 나타냈다(Table 7).

**Table 6** Correlation analysis between observed and predicted values of SPI and SDI series using SARIMA model (2016, Chungju Dam)

SPI, SDI Series		$Z_{n+3}$	$Z_{n+6}$	$Z_{n+9}$	$Z_{n+12}$
SPI1	Standard error	1,016	1,017	1,017	1,017
	Correlation coefficient	-0.535	-0.553	-0.586	-0.742
SPI3	Standard error	0.915	0.976	0.996	1,006
	Correlation coefficient	0.960	0.850	0.839	0.671
SPI6	Standard error	0.797	0.907	0.957	0.981
	Correlation coefficient	0.990	0.279	0.052	-0.096
SPI9	Standard error	0.622	0.733	0.804	0.849
	Correlation coefficient	0.992	0.980	0.884	0.830
SPI12	Standard error	0.439	0.565	0.662	0.742
	Correlation coefficient	0.999	0.367	0.509	0.703
SDI1	Standard error	1,002	1,020	1,027	1,030
	Correlation coefficient	0.868	0.541	0.394	0.206
SDI3	Standard error	0.852	0.944	0.974	0.990
	Correlation coefficient	0.673	0.864	0.838	0.774
SDI6	Standard error	0.752	0.864	0.919	0.950
	Correlation coefficient	0.846	0.499	0.141	-0.182
SDI9	Standard error	0.596	0.705	0.773	0.815
	Correlation coefficient	-0.102	0.972	0.869	0.779
SDI12	Standard error	0.410	0.536	0.631	0.709
	Correlation coefficient	-0.386	-0.961	0.777	0.850

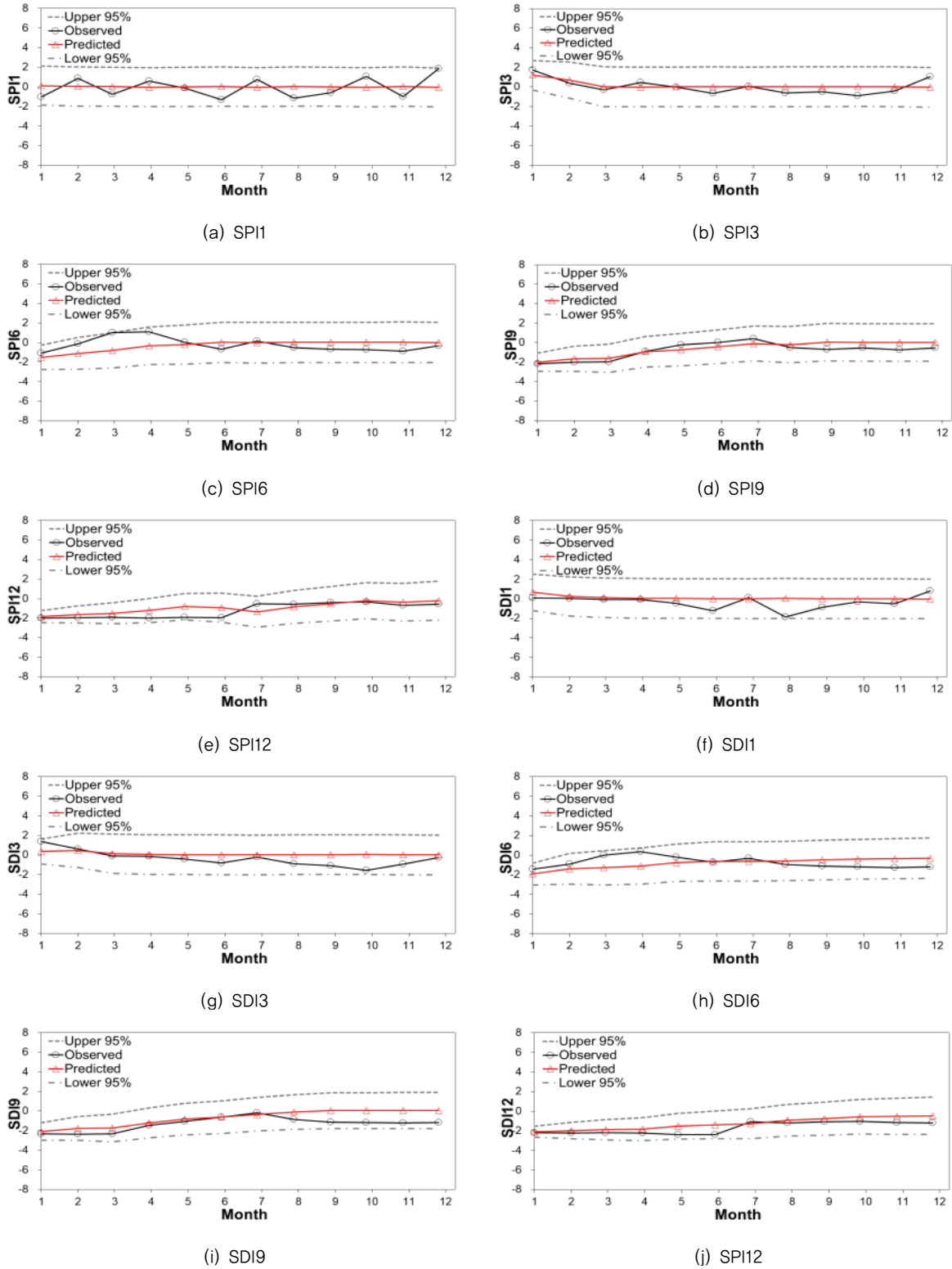


Fig. 4 Comparison of SARIMA results of SPI and SDI series at Chungju dam watershed (2016)

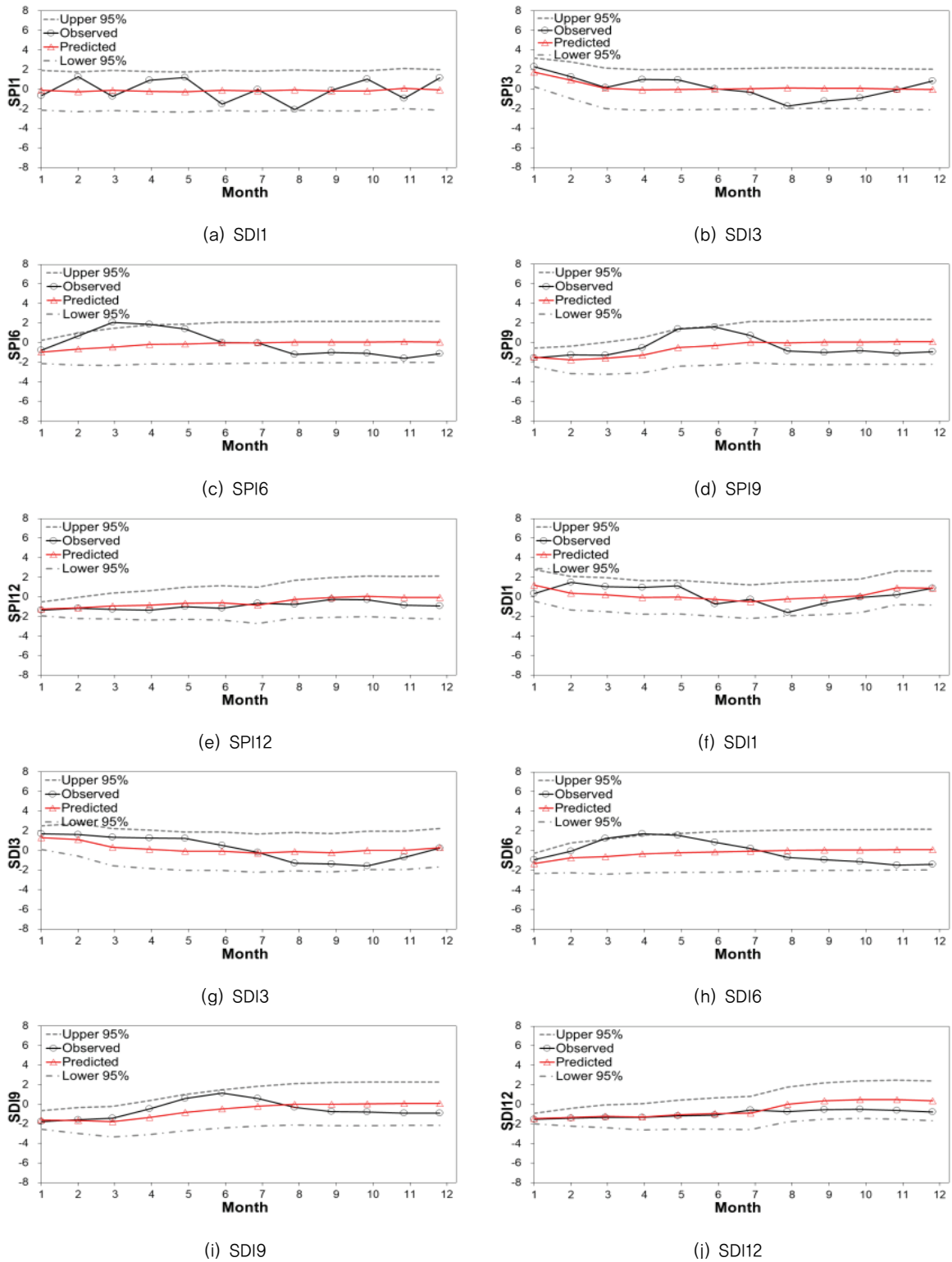


Fig. 5 Comparison of SARIMA results of SPI and SDI series at Boryeong dam watershed (2016)

**Table 7** Correlation analysis between observed and predicted values of SPI and SDI series using SARIMA model (2016, Boryeong Dam)

SPI, SDI Series		Z <sub>n+3</sub>	Z <sub>n+6</sub>	Z <sub>n+9</sub>	Z <sub>n+12</sub>
SPI1	Standard error	1,038	1,042	1,045	1,047
	Correlation coefficient	-0.998	-0.968	-0.971	-0.610
SPI3	Standard error	0,919	0,987	1,010	1,021
	Correlation coefficient	0,999	0,845	0,645	0,603
SPI6	Standard error	0,797	0,919	0,971	0,997
	Correlation coefficient	0,994	0,482	-0.158	-0.368
SPI9	Standard error	0,678	0,824	0,923	0,985
	Correlation coefficient	-0.861	0,976	0,537	0,314
SPI12	Standard error	0,529	0,680	0,783	0,858
	Correlation coefficient	0,246	0,550	0,766	0,738
SDI1	Standard error	0,858	0,869	0,873	0,874
	Correlation coefficient	-0.854	0,146	0,420	0,419
SDI3	Standard error	0,814	0,903	0,934	0,949
	Correlation coefficient	0,999	0,790	0,688	0,664
SDI6	Standard error	0,737	0,875	0,936	0,967
	Correlation coefficient	0,880	0,847	0,118	-0.229
SDI9	Standard error	0,651	0,797	0,891	0,951
	Correlation coefficient	-0.932	0,969	0,634	0,396
SDI12	Standard error	0,444	0,597	0,701	0,778
	Correlation coefficient	0,992	0,986	0,846	0,870

#### IV. 결 론

본 연구에서는 지속기간에 따른 가뭄지수 중 강수량을 변수로 하는 기상학적 가뭄지수인 표준강수지수 SPI와 유출량을 변수로 하는 수문학적 가뭄지수인 하천수가뭄지수 SDI를 바탕으로 최근 가뭄의 영향을 지속적으로 받고 있는 충주댐, 보령댐 지역의 가뭄현상을 파악하였다. 또한 시계열 가뭄지수 자료를 통한 적절한 타당한 예측을 위하여 Box-jenkins의 시계열 분석방법인 Seasonal ARIMA 모형을 구축하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 충주댐, 보령댐 지역의 기준기간별 SPI, SDI 계열의 가뭄지수를 산정하여 가뭄현상에 대해 파악한 결과, SPI와 SDI에서 모두 극심한 가뭄에 대해 유사하게 표현하고 있으며, 특히 2014년 이후 가뭄영향에 대해서도 가뭄지수로 잘 나타나고 있었다.
- 2) 해당 지역의 2015년까지의 각 기준기간별 SPI, SDI series의 시계열 자료를 이용하여 SARIMA 모형을 구축한 후, 2016년 예측 추정치를 산정하였다. 기간별(3, 6, 9, 12개월)로 예측기간을 산정하였으며 예측 값의 정확도를 파악하기 위해 MAPE, RMSE를 산정한 결과, 기준기간이 높을수록 정확도가 향상되었다.

3) SARIMA 모형을 통해 산정한 2016년 예측 값과 관측 값을 비교분석하였다. SARIMA 모형은 비교적 단기예측에서 정확성이 높기 때문에 2016년을 3, 6, 9, 12개월의 예측 값을 관측 값과 비교하였다. 그 결과, 충주댐 유역의 경우 3개월 예측의 상관계수가 SPI3, SPI6, SPI9, SPI12, SDI1, SDI6에서 0.8 이상의 강한 양적 상관관계를 보이고 있으며, 6개월 예측에서는 SPI3, SPI9, SDI3, SDI9에서 0.8 이상의 상관관계를 보였다. 보령댐의 경우 3개월 예측은 SPI3, SPI6, SDI3, SDI6, SDI12에서 0.8 이상의 상관관계를 보이고 있으며, 6개월 예측에서는 SPI3, SPI9, SDI6, SDI9, SDI12에서 0.8 이상의 상관관계를 보였다.

최근 기상이변 및 자연재해가 빈번하게 일어나고 기후 양극화 현상으로 홍수, 가뭄 등의 피해가 지속적으로 발생하는 상황에서 수문순환의 예측은 효율적인 수자원 관리 운영 및 계획에 있어 중요하다고 할 수 있다. 특히 가뭄의 경우, SPI 및 SDI 이외에도 다양한 지수를 활용해 예측 및 정도 파악에 많은 연구가 수행되고 있다. 이에 본 연구에서는 강수량과 유출량 자료를 이용하여 간단하게 가뭄의 심도를 파악할 수 있고 시계열 분석을 통해 가뭄지수 예측을 실시하였다. 주로 사

용되고 있는 SPI 뿐만 아니라 SDI 자료를 활용하여 가뭄의 심도를 좀 더 명확히 파악하였으며, SARIMA 모형을 통해 가뭄의 예측 또한 높은 상관성으로 가능성을 보였다. 이 연구 결과를 통해 현재 현업에서 주로 사용되고 있는 가뭄지수인 SPI 뿐만 아니라 SDI 자료를 활용하여 수문학적 가뭄발생특성에 맞는 수자원관리 및 세부계획을 수립하는데 활용할 수 있으며, 실시간 예측을 통해 안정적이고 효율적인 수자원 시스템에 대한 타당성을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부/한국환경산업기술원의 지원으로 수행되었음(과제번호 18AWMP-B083066-05).

## REFERENCES

- Ahn, S. R., S. H. Kim, S. W. Yoon, and S. J. Kim, 2013. Evaluation of suspended solids and eutrophication in Chungju lake using CE-QUAL-W2. *Journal of Korea Water Resources Association* 46(11): 1115-1128 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2013.46.11.1115.
- Alam, N. M., S. K. Sarkar, C. Jana, A. Raizada, D. Mandal, R. Kaushal, N. K. Sharma, P. K. Mishra, and G. C. Sharma, 2016. Forecasting meteorological drought for a typical drought affected area in India using stochastic models. *Journal of the Indian Society of Agricultural Statistics* 70(1): 71-81.
- Baier, W., 1969. Concepts of soil moisture availability and their effect on soil moisture estimates from a meteorological budget. *Agricultural Meteorology* 6(3): 165-178. doi:10.1016/0002-1571(69)90002-8.
- Box, G. E. P., and G. M. Jenkins, 1976. *Time Series Analysis Forecasting and Control*, Holden-Day, San Francisco.
- Cho, S. I., and J. S. Choi, 2005. A Monte Carlo experiment of the power of augmented Dickey-Fuller Unit Root Test. *Journal of The Korean Official Statistics* 10(1): 165-188 (in Korean).
- Choi, Y. J., 2017. *Analysis of Boryeong Dam diversion tunnel operation effects*. Master Thesis, Ajou University, Republic of Korea (in Korean).
- Edwards, D. C., and T. B. McKee, 1997. *Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales*. Climatology Report No. 97-2, Colorado State Univ., Ft. Collins, CO.
- Granger, C. W., and P. Newbold, 1974. Spurious regressions in econometrics. *Journal of econometrics* 2(2): 111-120.
- Hisdal, H., and L. M. Tallaksen, 2003. Estimation of regional meteorological and hydrological drought characteristics: a case study for Denmark. *Journal of Hydrology* 281(3): 230-247. doi:10.1016/S0022-1694(03)00233-6.
- Kim, S. J., and J. W. Lee, 2017. A brief review on utilization of standard precipitation index (SPI). *Water for future* 50(6): 41-49.
- Kim, S. H., and E. S. Chung, 2017. Peak drought index analysis of cheongmicheon watershed using meteorological and hydrological drought index. *J. Korea Water Resour. Assoc.* 50(1): 65-73 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2017.50.1.65.
- Kwon, H. J., H. J. Park, D. O. Hong, and S. J. Kim, 2006. A study on semi-distributed hydrologic drought assessment modifying SWSI. *Journal of Korea Water Resources Association* 39(8): 645-658. doi:10.3741/JKWRA.2006.39.8.645.
- Lee, J. W., Y. G. Lee, and S. J. Kim, 2017. The possibility of drought expression by late march dryness in rice paddy areas using terra MODIS NDVI. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 20(3): 27-41. doi:10.11108/kagis.2017.20.3.027.
- Lee, J. W., J. U. Kim, C. G. Jung, and S. J. Kim, 2018. Forecasting of monthly agricultural reservoir storage rate using multiple linear regression. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* in press. doi:10.11108/kagis.2018.21.3.019.
- Liu, L., Y. Hong, C. N. Bednarczyk, B. Yong, M. A. Shafer, R. Riley, and J. E. Hocker, 2012. Hydroclimatological drought analyses and projections using meteorological and hydrological drought indices: a case study in Blue River Basin, Oklahoma. *Water Resources Management* 26(10): 2761-2779. doi:10.1007/s11269-012-0044-y.
- Lloyd-Hughes, B., and M. A. Saunders, 2002. A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology* 22(13): 1571-1592. doi:10.1002/joc.846.
- McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, 1993. The relationship of drought frequency and duration to time

- scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* 17(22): 179-183.
18. Nalbantis, I., 2008. Evaluation of a hydrological drought index. *European Water* 23(24): 67-77.
  19. Nalbantis, I., and G. Tsakiris, 2009. Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management* 23(5): 881-897. doi:10.1007/s11269-008-9305-1.
  20. Nam, W. H., E. M. Hong, J. Y. Choi, T. Kim, M. J. Hayes, and M. D. Svoboda, 2017. Assessment of the extreme 2014~2015 drought events in north korea using weekly standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI). *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 59(4): 65-74. doi:10.5389/KSAE.2017.59.4.065.
  21. Nam, W. H., M. J. Hayes, D. A. Wilhite, and M. D. Svoboda, 2015. Projection of temporal trends on drought characteristics using the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in South Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(1): 37-45. doi:10.5389/KSAE.2015.57.1.037.
  22. Oh, T. S., Y. I. Moon, S. S. Kim, and G. S. Park, 2011. Frequency analysis of meteorologic drought indices using boundary Kernel Density function. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 31(2B): 87-98. doi:10.12652/Ksce.2011.31.2B.087.
  23. Park, M. J., H. J. Shin, Y. D. Choi, J. Y. Park, and S. J. Kim, 2011. Development of a hydrological drought index considering water availability. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(6): 165-170. doi:10.5389/KSAE.2011.53.6.165.
  24. Shin, C. H., and S. H. Jeong, 2011. A study on application of ARIMA and Neural Networks for time series forecasting of port traffic. *Journal of Navigation and Port Research* 35(1): 83-91 (in Korean). doi:10.5394/KINPR.2011.35.1.83.
  25. Tabari, H., H. Abghari, and P. Hosseinzadeh Talae, 2012. Temporal trends and spatial characteristics of drought and rainfall in arid and semiarid regions of Iran. *Hydrological Processes* 26(22): 3351-3361. doi:10.1002/hyp.8460.
  26. Tigkas, D., H. Vangelis, and G. Tsakiris, 2012. Drought and climatic change impact on streamflow in small watersheds. *Science of the Total Environment* 440: 33-41. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.08.035.
  27. Vicente-Serrano, S. M., S. Beguería, and J. I. López-Moreno, 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate* 23(7): 1696-1718. doi:10.1175/2009JCLI2909.1.