

MSWSI와 강수인자를 고려한 수문학적 가뭄 분석

정민수¹, 이철희¹, 이주헌^{2*}, 홍일표³
¹방재관리연구센터, ²충부대학교 토목공학과, ³한국건설기술연구원

Analysis of Hydrological Drought Considering MSWSI and Precipitation

Min-Su Jeong¹, Chul-Hee Lee¹, Joo-Heon Lee^{2*}, Il-Pyo-Hong³

¹Disaster Management Research Center

²Dept. of Civil Engineering, Joongbu University

³KOREA Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약 본 연구에서는 강수량을 주요인자로 하는 수문학적 가뭄지수 및 기상학적 가뭄지수를 산정하였으며, 이를 토대로 수문학적 가뭄에 대한 다양성 있는 검토를 수행하였다. 수문학적 가뭄지수는 MSWSI(Modified Surface Water Supply Index)를 적용하고, 기상학적 가뭄지수는 SPI(Standardize Precipitation Index)를 이용하여 지수를 산정하였다. 대상범위는 댐 유역을 대상으로 하였으며, 1975년부터 2017년까지 43년 기간 자료를 보유하고 있는 중권역 4001 (섬진강 수계)을 대상으로 국내의 가뭄 발생 현황 및 시계열 도시 등에 대한 분석을 함께 수행하였다. 두 지수에 대한 평가에 앞서, 수문순환 과정에서 물 공급의 역할을 갖는 강수를 중심으로 강수와 댐 유입량 및 하천유량에 대한 이동평균별(1개월~9개월) 상관분석을 수행하였고 이를 토대로 두 가뭄지수에 대한 월별 및 이동평균별(3개월, 6개월)로 상관분석을 수행하였다. 선행적인 가뭄지수 평가인 기상학적 가뭄지수와 함께 지체시간을 고려한 수문학적 가뭄지수의 다양성 있는 분석결과를 통해 최근 빈번한 발생을 갖는 가뭄 발생에 따른 물이용 정책을 마련하는데 있어 활용성을 가질 것으로 판단하였다.

Abstract In this study, the hydrological and meteorological drought index with precipitation as a major factor were calculated, and various analyses of hydrological drought were conducted. The Modified Surface Water Supply Index (MSWSI) was applied to the hydrological drought index and Standardize Precipitation Index (SPI) was used to estimate the meteorological drought index. The target area for the estimation is the dam area among MSWSI categories. The 4001 basin with 43 years data from 1975 to 2017 was analyzed for the drought occurrence status and time series plotted with the monthly SPI and MSWSI. For the dam watershed based on the precipitation that has the role of a water supply in the hydrological cycle, correlation analysis of precipitation, dam inflow, and stream flow was performed by the monthly and moving average (2~9 months), and the correlation between meteorological and hydrological index by monthly and moving average (3, 6 months) was then calculated. The result of multifaced analysis of the hydrological drought index and meteorological drought index is believed to be useful in developing water policy.

Keywords : Hydrological Drought, Modified Surface Water Supply Index(MSWSI), meteorological Drought, Standardize Precipitation Index(SPI), Correlation Analysis

1. 서론

최근에 발생되고 있는 연이은 가뭄의 발생원인 중 하

나인 강수의 부족은 물 공급 측면에서 해결이 어려운 난
제이며, 이를 극복하기 위한 물이용 측면을 고려하여 가
뭄에 따른 피해를 최소화 할 수 있는 방안이 마련되어야

본 연구는 행정안전부 재난관리지원기술개발사업의 연구비 지원(2017-MPSS31-001)에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Joo-Heon Lee(Joongbu Univ.)

Tel: +82-31-8075-1615 email: leejh@joongbu.ac.kr

Received October 20, 2017

Revised November 27, 2017

Accepted December 8, 2017

Published December 31, 2017

할 것이다[1, 2].

가뭄의 정의는 다양하며, 여러 정의 중에서 수문순환과 관련하여 가뭄을 평가할 수 있다. 수문순환 과정 안에서 강수의 부족은 기상학적 가뭄으로 평가되어지고, 지표의 기저유출 감소 및 하천수량의 부족에 따른 수문순환에 영향을 주어 수문학적 가뭄을 발생시킴에 따라 두 지수에 대한 가뭄 평가를 통한 가뭄 상태의 판단과정에 대한 연구가 진행된 바 있다[3-5]. 두 지수에 대한 연관관계를 분석하는데 있어 통계적인 상관관계 분석에 대한 연구가 선행되고 있다. 기상학적 가뭄지수인 SPI와 수문학적 가뭄지수인 Palmer Drought Severity Index(PDSI) 지수의 분석을 이용한 다양한 연구가 진행된 바 있다[6, 7].

Vasiliades and Lolukas(2009)는 SPI 지수와 PDSI의 상관관계를 분석하였고, Dai(2011)는 PDSI와 연유입량의 상관관계에 관한 연구를 수행하였다. 또한 Lee et al(2015)은 기상학적 가뭄지수와 수문학적 가뭄지수의 모사정도를 산정하였고, Kim et al(2017)은 기상학적 가뭄 및 수문학적 가뭄지수를 이용한 침투 가뭄심도와 가뭄기간에 관한 연구를 수행하였으나 두 방법 모두 수문학적 가뭄평가에 있어 월유입량과 하천유량을 평가하는 Stream flow Drought Index(SDI) 지수를 적용한 바 있으며, 이는 수문학적 가뭄평가에 있어 다양성을 갖는 가용 수자원 측면 및 국내 유역특성을 반영하는데 있어 한계를 나타낼 수 있다.

Surface Water Supply Index(SWSI)는 강수에 의한 물 공급 및 수문순환 과정에 따른 유역 가용수자원 이용 측면에서 강수량, 하천유량, 저류량, 용설량을 고려한 가뭄평가 기법으로 PDSI가 갖는 광범위한 토양수분 조건 적용에 한계점을 가짐에 따라 이를 보완하기 위해 제안된 지수이다[9-11].

반면에 Modified SWSI(MSWSI) 기법은 계절에 따른 유역의 용수공급 수문입력 변화를 고려하여 SWSI의 산정기법을 국내 특성에 맞도록 수정·보완이 이루어졌다 [1, 9, 12]. 또한 가뭄지수의 평가에 있어 유역의 특성을 고려한 평가도 함께 이루어질 필요성이 있으며, MSWSI는 국내 유역을 특성에 따라 강수유역, 댐유역, 하천유역으로 구분하여 수문학적 가뭄지수의 평가가 이루어진다.

기상학적 가뭄지수의 평가에는 다양한 방법이 개발되고 있다[13]. 표준강수지수(SPI) 기법은 다양한 기상학적 가뭄지수 중에서 강수에 따른 직관적인 평가가 가능하고, 입력인자를 강수량만을 사용함에 따라 유역에 반

응되는 가뭄의 빠른 응답을 나타낼 수 있는 기법이다[5, 14]. SPI를 적용하여 국내 5대강 유역에 대한 가뭄빈도 분석이 수행된 바 있으며, 관측치에 대한 초과확률 고려 및 SPI 산정을 통한 5대강 유역을 중심으로 수문학적 위험도 분석이 수행된 바 있다[2, 15].

기존에 기상학적 및 수문학적 가뭄의 연구를 수행된 바 있으나 SPI와 MSWSI를 적용한 분석에 대한 연구가 미흡하였다.

본 연구에서는 월별 및 이동평균별 기상 및 수문학적 가뭄지수를 산정하고 두 지수의 연관성 분석을 수행하였다. 기상학적 가뭄지수는 표준강수지수인 SPI를 적용하였고, 수문학적 가뭄지수로는 MSWSI를 적용하였다. 공간범위는 MSWSI에 따른 댐 유역을 대상으로 각 유역의 강수량, 댐 유입량, 하천유량을 수집하여 적용하였다. 자료의 기간은 유역의 댐 수문정보에 따라 상이하므로, 다양한 대상기간이 적용되었으며, 섬진강 수계 4001 유역은 1975년부터 43년간의 자료를 보유하고 있다.

수문순환 특성 및 가뭄 발생의 시간지체를 고려하여 물 공급 주요변수인 강수, 댐 유입량 및 하천유량과 상관분석을 수행하였다. 또한 월별/이동평균별 SPI와 MSWSI를 산정하고 두 지수간의 상관분석을 하였으며, 입력변수의 이동평균 개념을 적용한 MSWSI 결과를 토대로 수문학적 가뭄지수에 대한 다양성 있는 검토를 수행하였다.

2. 연구방법

2.1 입력자료

본 연구는 기상학적 가뭄평가 지수인 SPI와 수문학적 가뭄평가 지수인 MSWSI를 각각 산정하고 두 지수간의 상관분석을 수행하고자 하였다.

수문학적 가뭄평가 기법인 MSWSI는 유역단위를 댐 유역, 하천유역, 강수유역으로 구분하여 적용됨에 따라 이러한 구분 중에서 Fig.1과 같이 댐 유역을 대상으로 적용하였으며, 댐 지역을 두 가지 형태로 구분하여 적용하였다. Type I은 강수, 댐 유입량, 하천유량이 모두 있는 경우, Type II는 강수, 댐 유입량 자료만 갖는 경우로 구분하였다.

강수량 및 하천유량은 국가수자원관리종합정보시스템(SWMIS)에서 제공되는 자료를 사용하였고, 댐유입량

자료는 한국수자원공사에서 관리하는 7개 주요 댐지역 월 유입량 자료를 사용하였다.

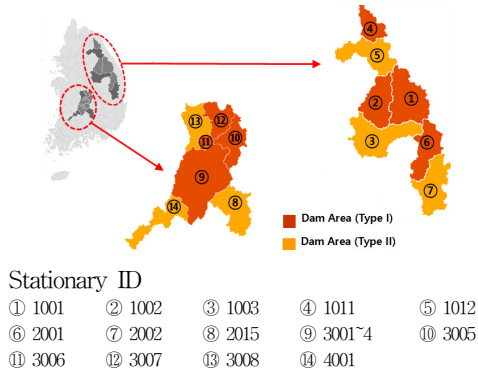


Fig. 1. Dam Area distinguished with Type I and Type II

2.2 연구절차 및 이론적 배경

두 가지 정의를 적용한 국내의 댐 지역에 대한 가뭄평가를 위해, 강수량을 변수로 하는 SPI를 적용하여 기상학적 가뭄을 평가하였고, 여러 입력변수를 고려하는 MSWSI를 적용하여 수문학적 가뭄을 평가하였다.

2.2.1 표준강수지수(SPI)

SPI는 여러 수분공급원 중에서 강수의 과함과 부족 상태에 대한 정량적 해석 기법으로 대기 상태에 따른 국부적 강우 발생을 통한 가뭄 상태의 표현 기법이다[16].

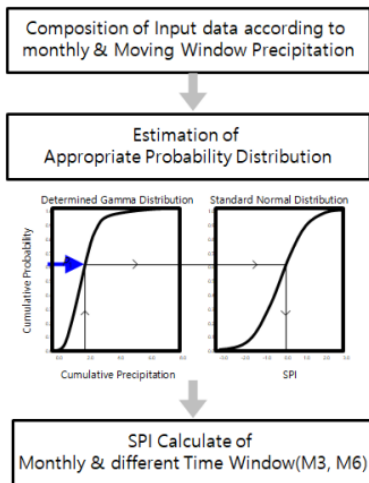


Fig. 2. Process of SPI Calculation[13]

가뭄지수 산정을 위해 시간단위별 누가 강수시계열에 적절한 확률분포형을 도입하고 이를 표준정규분포에 적용하여 가뭄평가가 이루어진다[13].

이러한 일련의 과정에 따라 SPI 산정이 이루어지며, 산정 절차는 Fig. 2로 제시하였다.

다음 table 1은 산정된 표준강수지수에 따른 가뭄 심도의 구분기준을 나타내었다.

Table 1. SPI Drought Categories[13]

Range	Condition
More than 2.0	Extreme Wet
1.5 ~ 2.0	Very Wet
1.0 ~ 1.5	Moderately Wet
-1.0 ~ 1.0	Near Normal
-1.0 ~ -1.5	Moderately Dry
-1.5 ~ -2.0	Severe Dry
Less than -2.0	Extreme Dry

SPI 산정을 위해 기상청 수문기상 가뭄정보 시스템에서 제시하고 있는 Gamma 분포형을 적용하였으며, 식은 다음과 같다.

$$F_s(x) = \frac{1}{\alpha^\beta \Gamma(\beta)} x^{\beta-1} e^{-\frac{x}{\alpha}} \quad (2.1)$$

여기서, F_s 는 Gamma 분포형 누가확률분포, $\alpha(>0)$ 는 크기 매개변수, $\beta(>0)$ 는 모양 매개변수이다.

2.2.2 지표공급지수(MSWSI)

MSWSI는 지표수 공급 체계의 고려 및 유역단위 평가를 위해 Shafer and Dezman(1982)이 제안한 Surface Water Supply Index(SWSI)를 국내 수문학적 가뭄평가에 적절하도록 보완이 이루어진 것으로 수문순환 관련 인자들인 강수량, 댐 유입량, 하천유량을 적용하며, 확률적 개념을 적용한 수문인자들의 비교 및 조합을 통해 유역 특성과 가뭄발생간의 잠재적 영향 관계 분석을 수행한다[1, 9].

산정절차는 대상 유역 특성에 맞는 수문인자 및 각 수문인자의 가중치 산정을 하고, 인자별 확률분포 추정 및 이에 따른 비초과확률을 계산하며, 그 결과를 다음 식(2.2)에 대입하는 절차를 갖는다.

$$MSWSI = \frac{a \times PN_{pdp} + b \times PN_{sf} + c \times PN_{rs} - 50}{12} \quad (2.2)$$

여기서, PV 는 비초과확률이며, a , b , c 는 총 합이 1인 각 수문인자의 가중계수이며, pcp 는 강수인자, sf 는 하천유출인자, rs 는 저류량 인자이다.

가중계수는 여러 수문인자를 대상으로 해당 지역의 가뭄 발생과의 상대적 기여도 분석을 통해 계절적 특성에 따른 수문인자별, 월별 기여도를 고려하여 산정이 이루어진다[12].

다음 Fig. 3은 가중치 산정 절차를 나타내었다.

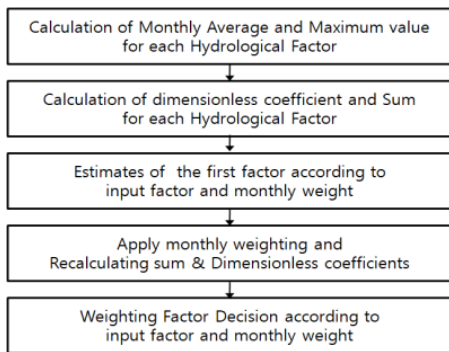


Fig. 3. Procedure for weighting factor calculating

MSWSI의 가뭄심도 평가는 Palmer Drought Severity Index(PDSI)와 동일한 범주를 가지며, 다음 Table 2로 나타내었다[18].

Table 2. MSWSI Drought Categories[18]

Range	
More than 4.0	Extremely Wet
3.0 ~ 4.0	Very Wet
2.0 ~ 3.0	Moderate Wet
1.0 ~ 2.0	Slightly Wet
-1.0 ~ 1.0	Near Normal
-2.0 ~ -1.0	Mid Drought
-3.0 ~ -2.0	Moderate Drought
-4.0 ~ -3.0	Severe Drought
Less than -4.0	Extreme Drought

3. 산정결과

3.1 댐 유역 현황 및 입력변수간의 상관분석

3.1.1 댐 유역 현황

MSWSI는 유역특성에 따라 세 가지 유형으로 구분하고 있으며, 이 중 댐 유역은 주변 하천유무에 따라 두 개의 유형으로 세분화된다. 다음 Table 3은 한강, 낙동강, 금강, 섬진/영산강 수계별로 하천 유무에 따른 국내의 댐 유역 구분 결과이다. 여기서, 강수량, 댐 유입량 및 하천 유량이 적용되는 경우에는 Type I, 강수 및 댐 유량을 적용하는 경우에는 Type II로 구분하였다.

Table 3. Adapted Status of Dam watershed and Key Station (St. 3001 : 3001~3004)

basin	St.ID	Key Station			Data	
		St.Precp.	St.Dam	St.River	From ~ To	Retention Period
Han river	1001	Daegwallyeong	Chungju	yeongwol II (geoun)	1996.1 ~ 2017.08	22yr
	1002	Jecheon	Chungju	yeongwol I	1996.01 ~ 2017.08	22yr
	1003	Jecheon	Chungju	-	1998.01 ~ 2017.08	20yr
	1011	Inje	soyang	wontong	1996.01 ~ 2017.08	22yr
	1012	Inje	soyang	-	1996.01 ~ 2017.08	22yr
Nakdongriver	2001	Yeongju	Andong	Bomghwa	2013.01 ~ 2017.08	5yr
	2002	Uiseong	Imha	-	1999.01 ~ 2017.08	19yr
	2015	Geochang	Hapcheon	-	1999.01 ~ 2017.08	19yr
Geumgang	3001	Gumsan	Daecheong	Yangganggyo	2006.01 ~ 2017.08	12yr
	3005	Chupungryung	Daecheong	Songcheon	2004.01 ~ 2017.08	14yr
	3006	Gumsan	Daecheong	Okcheon	1997.01 ~ 2017.08	21yr
	3007	Boeun	Daecheong	Gidaegyo	2005.01 ~ 2017.08	13yr
	3008	Boeun	Daecheong	-	2005.01 ~ 2017.08	13yr
Somjin river	4001	Imsil	Namwon	Seomjingang	1975.01 ~ 2017.08	43yr

댐 유입량 자료의 수집 결과, Type I에서는 중권역별 보유 기간이 5년에서 22년까지 다소 차이가 큰 편차를 보였으며, 낙동강 수계 중권역 2001은 자료기간이 가장 적은 곳으로 2013년부터 5년 기간 자료를 보유하고 있다. Type II에서는 섬진강 수계의 중권역 4001은 43년의 가장 긴 기간치 자료를 갖는 반면에 금강수계의 3008은 13년 기간 자료를 가짐에 따라 중권역별 자료 보유 기간이 상이한 것으로 나타났다.

3.1.2 강수와 입력변수 간의 상관분석

수문학적 가뭄은 유역의 물 공급 역할을 하는 강수량을 매개로 수문순환 관계에 있는 댐 유입량 및 하천유량을 그 지역의 가용 수자원으로 하여 가뭄 평가가 이루어진다.

이러한 관계를 고려하여 강우를 중심으로 각 인자들 간의 유효성 검토 및 월별(M1)/이동평균별(Moving Average)로 2개월(M2)에서 9개월(M9) 범위에 대한 상관분석을 수행하였다.

댐 유역 구분에 따라 Type I에 해당하는 8개 지역은 하천유량을 인자로 가지며, 이에 따른 강수와 하천유량 상관분석 결과 Table 4로 나타내었다.

Table 4. Correlation between Precipitation and River Flow of Type I watershed (Moving Average (MA), M1~M9)

St	MA	Type I									mean :0.74
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	
1001	0.76	0.79	0.78	0.77	0.74	0.71	0.67	0.62	0.56	0.71	
1002	0.91	0.93	0.94	0.93	0.93	0.91	0.89	0.87	0.83	0.90	
1011	0.86	0.88	0.88	0.88	0.87	0.85	0.84	0.82	0.79	0.85	
2001	0.27	0.24	0.28	0.28	0.28	0.25	0.21	0.18	0.16	0.24	
3001	0.81	0.88	0.89	0.90	0.91	0.91	0.92	0.93	0.93	0.90	
3005	0.55	0.85	0.86	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.88	0.83	
3006	0.80	0.83	0.84	0.84	0.84	0.83	0.81	0.80	0.78	0.82	
3007	0.56	0.59	0.63	0.67	0.70	0.69	0.67	0.63	0.59	0.64	

분석 결과 대부분의 유역에서 평균 0.75의 높은 상관성을 보였으며, 유역별로는 중권역 1002, 3001에서 0.90으로 상관성이 높게 나타난 반면에 자료기간이 5년으로 가장 짧은 2001에서는 0.24로 상관성이 없는 것으로 나타났다. 또한 3001, 3005에서는 지체시간이 4개월 이상에서 높은 상관성을 보인 반면에 그 외 지역에서는 이동평균 3개월에서 5개월이 상관성이 높게 나타났다.

Type I과 II에 공통으로 해당하는 강수와 댐 유입량에

대한 상관분석 결과는 Table 5로 나타내었다. 분석 결과 중권역 2001을 포함하여 평균 0.91로 높은 상관성을 나타냈다. 유역별로는 동일 지점의 강우 및 댐 유입량을 사용하는 1011(Type I)과 1012(Type II)에서 평균 약 0.967로 높은 상관성을 보였다.

또한, 이동평균을 고려한 강수와 댐 유입량 및 강수와 하천유량에 대한 상관분석 결과 전체적으로 M3와 M6 사이에서 상관성이 높은 것으로 나타났다.

Table 5. Correlation between Precipitation and Dam Inflow of Type I, Type II watershed (Moving Average(MA), M1~M9)

St	MA	Type I									mean :0.92
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	
1001	0.82	0.86	0.87	0.87	0.86	0.85	0.83	0.81	0.78	0.84	
1002	0.91	0.94	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	
1011	0.94	0.96	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	
2001	0.91	0.92	0.94	0.95	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	
3001	0.89	0.93	0.93	0.94	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94	
3005	0.89	0.93	0.93	0.94	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.92	
3006	0.85	0.88	0.89	0.89	0.89	0.89	0.88	0.87	0.86	0.88	
3007	0.86	0.89	0.90	0.91	0.91	0.90	0.90	0.89	0.89	0.90	
St	MA	Type II									mean :0.91
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	
1003	0.91	0.93	0.94	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	
1012	0.94	0.96	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	
2002	0.85	0.88	0.88	0.88	0.88	0.87	0.87	0.86	0.86	0.87	
2015	0.80	0.86	0.86	0.86	0.86	0.84	0.83	0.81	0.80	0.83	
3008	0.86	0.89	0.90	0.91	0.91	0.90	0.90	0.89	0.89	0.90	
4001	0.92	0.94	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94	

3.2 St.ID 4001 유역 MSWSI 가뭄 분석

전체 댐 유역 분석에 앞서 43년의 충분한 자료기간을 갖는 섬진강 수계 4001 중권역에 대해 선행적으로 수문학적 가뭄 평가 및 분석을 수행하였다. 4001 지점은 댐 유역 Type II에 해당하는 강수량 및 댐 유입량을 입력변수 갖는다.

다음 Fig. 4는 4001 지점의 1개월 단위의 월별 SPI 및 MSWSI에 대한 산정 결과이다.

두 지수의 상관분석 결과 0.91에 높은 상관성을 나타냈으며, 도시적으로도 가뭄/수분 상태에 대한 의미 있는 패턴 변화 양상의 유사성을 보였다.

반면에 두 지수에 대한 1개월 단위의 가뭄 표현에서는 수분의 과잉과 부족 주기가 짧은 기간에 반복적으로 발생함에 따라 가뭄과 습윤 상태의 지속되는 범위 등의 판단에 있어 어려움을 갖는 것으로 나타났다.

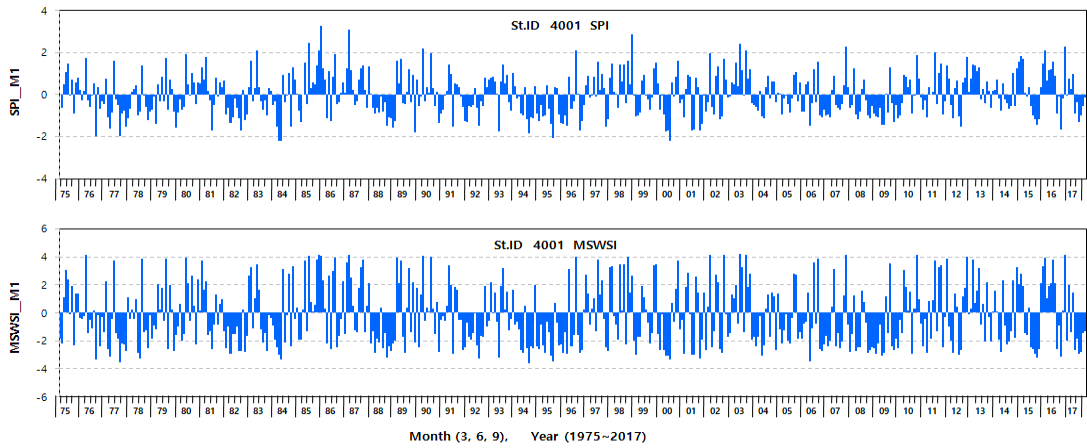


Fig. 4. Time Series plot of SPI(1) & MSWSI(1) Drought index at Station 4001

3.2.1 1개월 단위 가뭄발생유무에 따른 분석

두 지수의 시계열 도식 및 상관분석 외에 두 지수의 실제 가뭄 발생여부에 대한 비교·검토를 수행하였다. 분석은 각 지수의 범례 기준에 따라 가뭄 및 습윤 상태를 나타내었으며, 산정결과를 다음 Fig. 5와 같이 도식하였다. 또한, 기존에 알려진 가뭄 발생 해를 기준으로 두 지수의 가뭄발생과 비교 검토를 수행하고자 하였다. 기존에 알

려진 가뭄해의 검토 결과 가뭄 발생 해는 1994~1995, 2000, 2001, 2008, 2009, 2014, 2015년으로 상정하였다 [16].

도식 결과, 비가뭄해보다 가뭄해에서 두 지수 모두 보다 분명한 가뭄 양상을 보였으며, 두 지수의 가뭄 양상을 비교하는 경우, 수문학적 가뭄이 기상학적 가뭄보다 심한 가뭄 상태를 나타냈다.

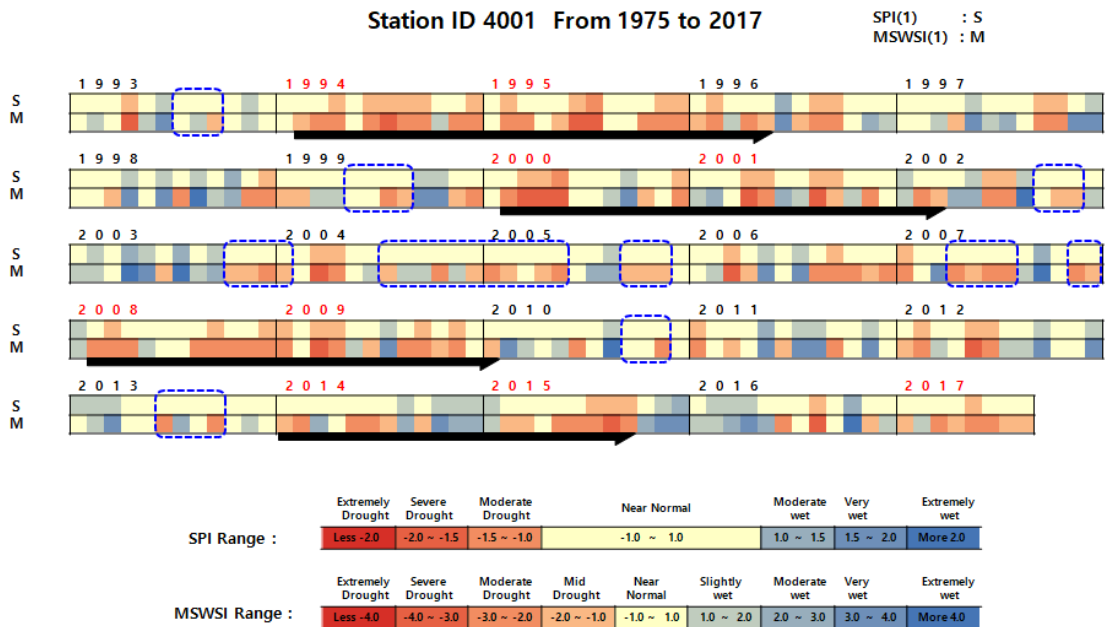


Fig. 5. Comparison of Drought Occurrence according to SPI(1) & MSWSI(1) Categories at Station 4001

가뭄해로 알려진 2014년에는 기상학적 가뭄은 발생하지 않고, 봄철에 정상상태(-1.0~1.0)가 이어지는 양상을 보였지만 같은 기간에 수문학적 가뭄은 봄철 가뭄 발생 양상을 나타내었다.

가뭄해인 2008, 2017의 경우에도 기상학적으로 가뭄이 2회 이하로 발생하였고 정상상태가 지속되는 양상을 나타냈지만 수문학적인 가뭄의 전반적인 발생 양상이 나타났다.

이와 달리 비가뭄해로 알려진 1999, 2004~2005, 2008년 등에서도 기상학적으로 정상상태가 지속되는 경우에도 수문학적 가뭄이 발생하는 양상을 보였다. 또한 계절적으로 여름을 포함하는 6~10월 사이에서 다수의 발생을 보임에 따라 기상학적 가뭄과는 달리 수문학적 가뭄은 계절적인 영향 및 가용수자원이 부족에 따른 발생 양상을 보이는 것으로 판단되었다.

가뭄 발생해에 연이은 해에는 기상학적 가뭄 상태에 따른 영향관계를 보였으며, 1995, 2001년의 경우 이듬해인 1996, 2002년 봄철에 가뭄 영향이 지속되는 것으로 나타난 반면에 2016년의 경우에는 겨울철 기상학적 가뭄이 습윤 상태가 지속됨에 따라 가뭄은 발생하지 않는

것으로 나타났다.

3.2.2 이동평균을 고려한 수문학적 가뭄 분석

수문학적인 가뭄 상태는 장기적인 수분 부족 상태와 수문순환에 영향을 고려하는 경우 단기간 강수 유입이 빠른 가뭄 회복을 의미하지는 않는다. 이러한 관점에서 가뭄/습윤 상태의 지속되는 범위에 대한 검토가 필요하며, 이를 위해 이동평균을 고려한 수문학적 가뭄 분석을 수행하였다.

다음 Fig. 6은 4001 지점의 월별(M1) 및 입력변수의 3개월 이동평균(M3), 6개월 이동평균(M6)에 대한 MSWSI 적용 결과를 나타내었다. 그림에서 -3.0은 보통가뭄과 심한가뭄 구분 기준이다.

산정결과, 1976, 1986, 1989, 2001, 2011년 등에서 M1과 달리 이동평균에서 가뭄/습윤 상태 구분이 명확해지는 것으로 나타났다. 특히, 2001년의 경우 M1에서는 가뭄과 습윤이 반복되어 상태판단이 어려운 반면에 M3, M6에서는 지속되는 가뭄 상태로 나타났다.

-3.0을 기준으로 구분되는 보통가뭄과 심한가뭄 심도 변화를 검토한 결과 M1에서는 단속적인 반면에 M3,

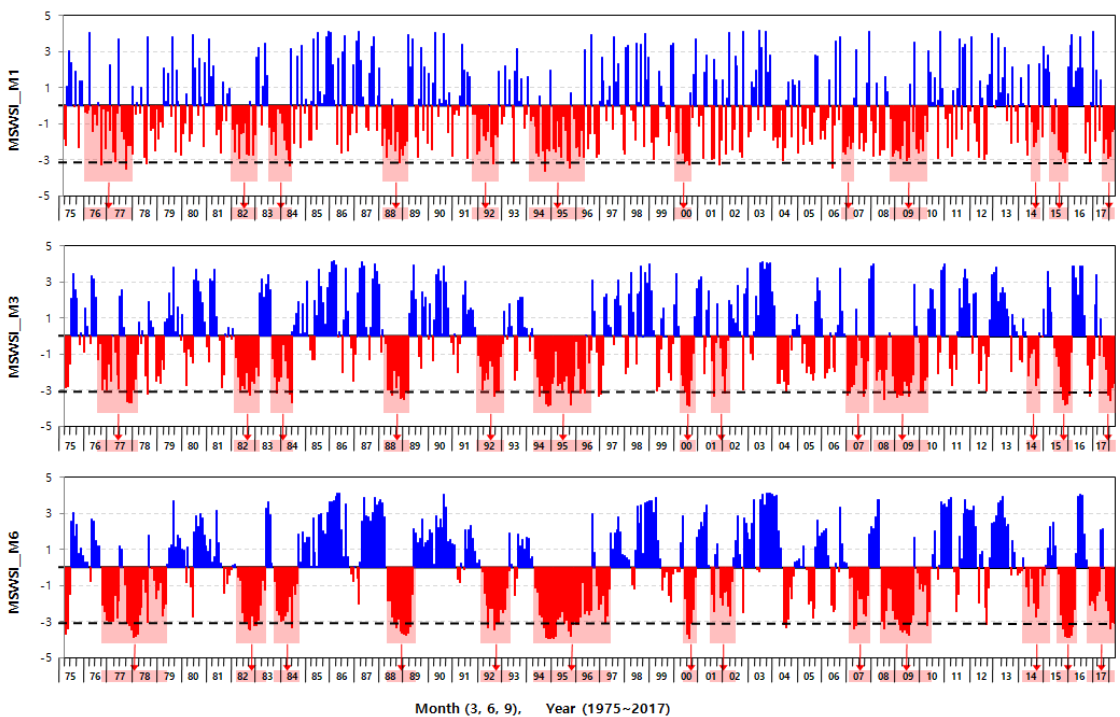


Fig. 6. Time Series plot of MSWSI Drought index according to M1 & Moving Window(M3, M6) at Station 4001

M6에서는 1994, 1995, 2000, 2001년에는 연속적인 심한가뭄을 보였다.

이동평균인 M3와 M6의 경우에는, M3는 계절적 특성을 반영한 물 사용 증가에 따른 일시적 가뭄 발생 등의 검토에 용이할 것으로 판단되며, 이와 달리 M6는 중장기 가뭄 발생 및 대책 등에 있어 활용성이 높을 것으로 판단되었다.

시간 지체를 고려한 이동평균을 적용하여 가뭄을 평가한 결과 M3 및 M6에서 다소의 가뭄심도 증가를 보임에 따라 범례별 발생 빈도에 대한 산정을 하였으며, 결과는 다음 Fig. 7과 같다.

M1, M3, M6의 범주별 가뭄/습윤 발생 개수를 비교 검토한 결과 지속시간이 늘어날수록 심한가뭄은 M1 보다 M3에서 심한가뭄은 확연한 증가를 보였고, 보통가뭄 및 약한 가뭄은 감소되는 결과를 보였으며, 습윤 상태는 상태유지 및 다소의 증가를 보이는 것으로 나타났다.

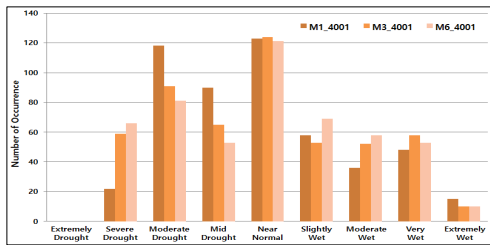


Fig. 7. Comparison of Drought & Wet count according to legend at Station 4001

3.2.3 4001 지점의 SPI 및 MSWSI 상관분석 및 회귀분석 산정 결과

4001 지점의 월별 및 이동평균별(M3, M6) 기상 및 수문학적 가뭄지수를 산정하였으며, 결과에 대한 월별/이동시간별 상관분석 및 회귀분석을 실시하였다.

Fig. 8은 월별/이동평균별 SPI 및 MSWSI에 대한 회귀분석 결과로 SPI는 x축, MSWSI는 y축으로 하여 도시하였다.

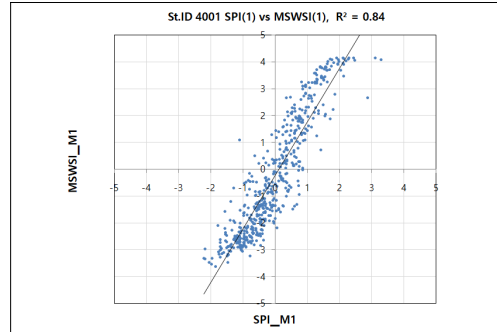
도시결과, 극치계열인 M1의 극한습윤, M3 및 M6의 극한가뭄/극한습윤에서 SPI에 대응되는 MSWSI가 심한 가뭄/심한습윤으로 추세가 다소 완화되는 경향을 보였다.

다음 Table 6은 두 지수의 상관계수 및 결정계수 (Coefficient of Determination)를 나타내었다.

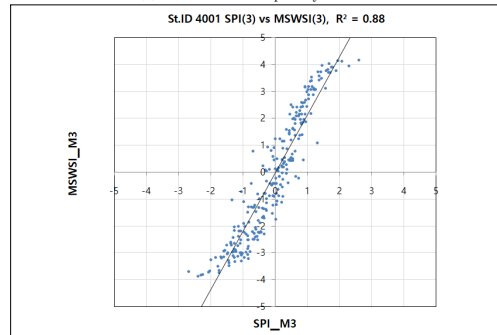
산정결과 M1에서는 상관성 0.91로 이동평균에 비해서는 작지만 높은 상관성을 보였으며, M6은 0.96 양의

상관성이 높게 나타났다.

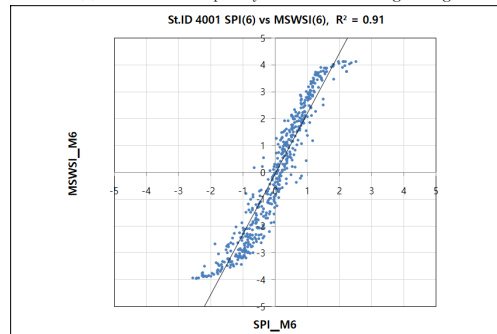
결정계수는 선형 모형을 통해 두 자료의 적합한 정도를 판단하는 것으로 0.84에서 0.91까지 높은 적합도를 갖는 것으로 나타났다.



(a) SPI vs MSWSI plot by one month



(b) SPI vs MSWSI plot by three month moving average



(c) SPI vs MSWSI plot by six month moving average

Fig. 8. Coefficient of Determination according to SPI(X-axis) vs. MSWSI(Y-axis) at Stationary 4001

Table 6. Correlation and Linear Regression between SPI and MSWSI according to M1, M3, M6 at Stationary 4001

St	MA	4001		
		M1	M3	M6
Correlation		0.91	0.95	0.96
Coeff. of Determination		0.84	0.88	0.91

3.3 전체 댐 유역 기상 및 수문학적 가뭄 분석

앞서 댐 유역 전체에 대한 강수와 입력변수 간의 분석 결과 높은 상관성을 갖는 것으로 분석되었다. 또한 4001 지점을 대상으로 기상 및 수문학적 가뭄지수에 대한 다양성 있는 분석결과 두 지수간의 의미 있는 결과를 보였다.

이러한 결과를 바탕으로 댐 유역 전체에 대한 기상학적 가뭄지수와 수문학적 가뭄지수에 대한 월별/이동평균별(M3, M6) 분석을 수행하였다.

다음 Table 7과 8은 댐 유역 전체에 대한 월별/이동평균별 SPI와 MSWSI에 대한 상관분석 및 결정계수 결과를 나타내었다.

Table 7. Correlation between SPI and MSWSI according to Moving Window by Dam Area Watershed (M1, M3, M6)

St	MA	Type I			Retention Period
		M1	M3	M6	
1001		0.81	0.86	0.87	22
1002		0.82	0.92	0.95	22
1011		0.79	0.88	0.93	22
2001		0.66	0.71	0.77	5
3001		0.81	0.85	0.89	12
3005		0.82	0.89	0.90	14
3006		0.81	0.89	0.91	21
3007		0.84	0.89	0.92	13
mean		0.80	0.86	0.89	

St	MA	Type II			Retention Period
		M1	M3	M6	
1003		0.64	0.73	0.77	20
1012		0.87	0.93	0.96	22
2002		0.88	0.92	0.94	19
2015		0.87	0.90	0.92	19
3008		0.91	0.94	0.94	13
4001		0.91	0.95	0.96	43
mean		0.85	0.90	0.92	

Table 8. Coefficient of Determination between SPI and MSWSI according to Moving Window by Dam Area Watershed (M1, M3, M6)

St	MA	Type I			Retention Period
		M1	M3	M6	
1001		0.65	0.73	0.76	22
1002		0.67	0.80	0.88	22
1011		0.63	0.73	0.85	22
2001		0.43	0.41	0.57	5
3001		0.65	0.70	0.78	12
3005		0.68	0.76	0.80	14
3006		0.66	0.76	0.83	21
3007		0.70	0.76	0.83	13
mean		0.66	0.72	0.80	

St	MA	Type II			Retention Period
		M1	M3	M6	
1003		0.41	0.49	0.57	20
1012		0.76	0.83	0.91	22
2002		0.77	0.80	0.87	19
2015		0.75	0.79	0.83	19
3008		0.82	0.85	0.89	13
4001		0.84	0.88	0.91	43
mean		0.70	0.75	0.81	

상관분석 결과, 전체적으로 Type II가 Type I보다 다소 높은 상관정도를 보였으며, Type II의 1003 지점과 자료 기간이 가장 짧은 Type I의 2001 지점을 제외하고는 대부분에서 0.8 이상의 높은 양의 상관성을 보였으며, 자료기간이 가장 긴 Type II의 4001지점에서 가장 높게 나타났다.

결정계수는 상관계수보다 다소 낮지만 평균 0.7 이상의 높은 적합도를 보였다. 또한 상관분석과 유사하게 Type II가 다소 높게 나타났다.

전체적으로 Type I의 평균은 M1 0.66, M3 0.72, M6 0.80, Type II는 M1 0.70, M2 0.75, M3 0.81로 이동평균이 길어질수록 적합도가 높게 나타났다. 또한 2001과 1003 지점은 기간별 0.6 이하의 낮은 적합도를 보인 반면에, 4001 지점에서 기간별 0.84 이상으로 가장 높은 적합도를 갖는 것으로 분석되었다.

가뭄심도의 증감을 고려한 댐 유역 전체에 대한 범례별 평균 발생 빈도를 산정하였으며, 결과는 Fig. 9와 같다.

산정결과, 4001 지점과 유사한 분포를 보였으며, 이동평균이 길어질수록 심한가뭄 발생은 증가하고, 보통가뭄 및 약한 가뭄은 감소되는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 이동평균이 길어질수록 평활화에 자료의 수렴성에 기인하는 것으로 판단되었다.

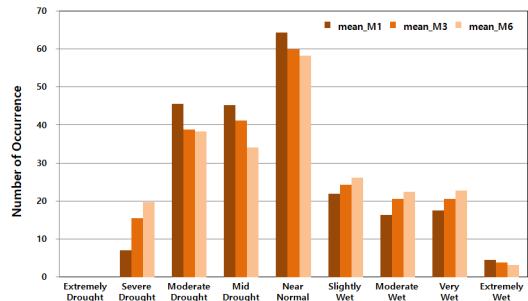


Fig. 9. Comparison of Drought & Wet average count according to Dam Area legend

3. 결론

본 연구에서는 강수량을 주요 인자로 하여 기상학적 가뭄 평가기법인 SPI 및 국내 유역특성을 반영한 수문학적 가뭄 평가기법인 MSWSI를 적용하여 국내 댐 유역에 대한 월별/이동평균별 가뭄평가를 수행하였다. 공간대상

은 댐 유역을 대상으로 입력인자에 따라 Type I과 Type II로 구분하여 적용하였다. 가뭄 평가에 앞서 강수와 입력변수간의 월별 M1 및 이동평균별 M2에서 M9까지의 상관분석을 수행한 결과 M3와 M6 사이 범위에서 양의 상관성이 높게 나타났다.

댐 유역 전체에 대한 분석에 앞서 자료기간이 가장 긴 중권역 4001 지점의 SPI 및 MSWSI를 산정하였고, 이에 따른 다양성 있는 분석을 수행하였다. 산정결과, 대상 지점의 두 가뭄지수에 대한 월별 시계열 도시 결과, 유의미한 패턴과 함께 0.91의 높은 양의 상관성을 보였다. 상관분석과 달리 가뭄 발생유무에 따른 비교·검토를 수행한 결과, SPI 지수는 대부분이 알려진 가뭄 발생해와 유사하였으나, MSWSI는 SPI 보다 가뭄심도가 높게 나타났고, 비가뭄해에서도 가뭄 발생 양상을 보였다. 이 경우 SPI는 연속적인 정상상태를 보였으며, 월별로 6~10월에 다수의 발생이 나타났다. 이는 수문학적 가뭄 발생의 계절적 영향 및 가용수자원의 부족 등과도 관련성을 보이는 것으로 판단되었다.

수문학적 가뭄은 유역의 수문순환과 연계된 가용수자원에 대한 가뭄 표현이며, 지속적인 가뭄상태인 경우 단기간 강수 유입이 가뭄극복을 의미하지는 않는다. 4001 지점을 대상으로 M1 및 M3, M6에 대한 MSWSI 산정 및 비교 검토 결과, 2001, 및 2011년에 M1의 가뭄/습윤상태의 변동이 심한 반면에 M3 및 M6에서는 2001년은 가뭄, 2011년은 습윤 상태의 지속적인 발생 양상을 보였다. 또한 M3, M6으로 갈수록 심한 가뭄이 연속적인 발생 및 발생횟수의 증가가 나타났다.

4001 지점 분석결과, 두 지수의 월별 및 이동평균별 의미 있는 연관성이 검토되었다. 이를 토대로 댐 유역 전체에 두 지수의 월별/이동시간별 가뭄지수를 산정하고 통계적 방법에 따른 검토를 수행한 결과 대부분에서 높은 양의 상관성을 보였고, 이동평균이 길어질수록 상관성 및 적합성도 다소 높아지는 것으로 분석되었다.

한편으로는 이동평균이 늘어날수록 상관성이 높아지는 것은 자료의 평활화(Smoothing)에 따른 수렴성에 기인하는 것으로 이해될 수 있으며, 이는 상관계수만으로 결과의 적합성 검토에는 한계가 있음을 보여준다. 본 연구의 시간단위 구분에 따라 M1, M3, M6에 대한 다양성 있는 검토 수행결과, M1은 월별 가뭄 심도의 상태에 대한 검토, M3는 적정한 가뭄 지속시간 및 계절 특성 반영 사항 등에 대한 검토, M6은 가뭄과 관련한 장기적인 정

책에 대한 활용성 검토 등 각각의 특성을 고려한 선택적인 활용성 고려가 필요한 것으로 사료되었다.

기상 및 수문학적 가뭄에 대한 산정 및 두 지수의 다양성 있는 분석결과, 가뭄 정의에 대한 차이와는 달리 두 지수의 연관성을 확인 할 수 있었으며, 수문순환을 고려한 가뭄평가에 있어 월별 및 이동평균별 산정결과와 특징을 확인하였다. 이러한 분석결과를 토대로 한반도 전역에 대한 공간적인 범위 및 보다 세밀한 시간적인 범위에 대한 검토를 통해 장래 수자원 이용에 활용성을 가질 것으로 판단되었다.

References

- [1] H. J. Kwon, H. J. Park, D. O. Hong, S. J. Kim, "A Study on Semi-distributed hydrologic assessment modifying SWSI," *J. Korea water Resour. Assoc.*, vol. 39, no. 8, pp. 645-658, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2006.39.8.645>
- [2] N. S. Kim, J. S. Kim, H. W. Jang, T. W. Kim, "Hydrologic Risk Analysis Based on Extreme Drought Over the Korean Peninsula Under Climate Change," *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, vol. 15, no. 4, pp. 45-52, 2015. DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2015.15.4.45>
- [3] M. Karamouz, "Evaluation of dry spans characteristics considering climate change effects," *Second International Conference on Earth Systems Modeling(ICESM)*, vol. 1, 2007.
- [4] K. J. Won, E. S. Chung, "Drought analysis of Cheongmicheon watershed using meteorological, agricultural, and hydrological drought indices," *J. Korea water Resour. Assoc.*, vol. 49, no. 6, pp. 509-518, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2016.49.6.509>
- [5] S. H. Kim, E. S. Chung, "Peak drought index analysis of cheongmicheon watershed using meteorological and hydrological drought index," *J. Korea water Resour. Assoc.*, vol. 50, no. 1, pp. 65-73, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2017.50.1.65>
- [6] L. Vasiliades, A. Loukas, "Hydrological response to meteorological drought using the Palmer drought indices in Thessaly, Greece," *Desalination*, vol. 237, no. 1, pp. 55-94, 2009.
- [7] A. Dai, "Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900-2008," *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*(1984-2012), vol. 116, 2011.
- [8] B. R. Lee, J. H. Sung, E. S. Chung, "Comparison of Meteorological Drought and Hydrological Index," *J. Korea water Resour. Assoc.*, vol. 48, no. 1:69-78, jan. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2015.48.1.69>
- [9] B. A. Shafer, L. E. Dezman, "Development of surface water supply index - A drought severity indicator for Colorado," *Proc. Western Snow Conference*, pp.

164-175, 1982.

- [10] J. H. Ryu, D. U. Hong, J. H. An, Y. N. Yoon, "A Comparative Study on the Drought indices for Drought Evaluation," *J. Korea water Resour. Assoc.*, vol. 35, no. 4, pp. 397-410, 2002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2002.35.4.397>
- [11] D. L. Lee, D. H. Lee, S. U. Kang, "Drought Triggers and Monitoring System," *J. Korea water Resour. Assoc.*, vol. 36, no. 3, pp. 375-384, 2003.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2003.36.3.375>
- [12] H. J. Kwon, J. Kim, "Evaluation of semi- distributed hydrological drought using SWSI(Surface Water Supply Index)" *Journal of the Korean society of Agricultural Engineers*, vol. 48, no. 2, pp. 37-43, 2006.
- [13] E. A. Heranadez, V. Uddameri, "Standardized precipitation evaporation index (SPEI) - based drought assessment in semi - arid south Texas," *Environmental Earth Sciences*, pp1-11, 2013.
- [14] T. B. Mckee, N. J. Doesken, J. Kleist, "The relationship of drought frequency and duration of time series," 8th. Conference on Applied Climatology, pp. 179-184, 1993
- [15] J. H. Lee, H. W. Jang, J. S. Kim, T. W. Kim, "Quantitative Characterization of Historical Drought Events in Korea - Focusing on Drought Frequency Analysis in the Five Major Basins," *J. Korea water Resour. Assoc.*, vol. 49, no. 10, pp. 877-885, 2016.
- [16] M. S. Jeong, J. S. Kim, H. W. Jang, J. H. Lee, "ROC evaluation for MLP ANN drought forecasting model," *J. Korea water Resour. Assoc.*, vol. 49, no. 10, pp. 877-885, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2016.49.10.877>
- [17] T. B. Mackee, N. J. Doeskin, J. Kleist, "Comparison of meteorological drought and hydrological drought index," Proceeding of 9th conference on applied Cimatology, American Meteorological Society, pp. 233-236, 2015.
- [18] S. H. Jang, J. K. Lee, J. H. Oh, J. W. Jo, "The probabilistic drought forecast based on ensemble using improvement of the modified water supply index," *J. Korea water Resour. Assoc.*, vol. 49, no. 10, pp. 835-849, 2016.

정 민 수(Min-Su Jeong)

[정회원]



- 2005년 2월 : 서울시립대학교 수공학 (석사)
- 2015년 2월 : 서울시립대학교 수공학 (박사)
- 2016년 5월 ~ 현재 : (사)방재 관리연구센터 책임연구원

<관심분야>

수공학, 방재, 기후변화

이 철 희(Chul-Hee Lee)

[정회원]



- 2014년 8월 : 인천대학교 건설환경공학과 (공학석사)
- 2014년 10월 ~ 2017년 1월 : 한국건설기술연구원 전임연구원
- 2017년 2월 ~ 현재 : (사)방재관리연구센터 전임연구원

<관심분야>

방재, 지반,

이 주 현(Joo-Heon Lee)

[정회원]



- 1998년 2월 : 경희대학교 수공학 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재: 중부대학교 토목공학과 교수
- 2016년 12월 ~ 현재: 중부대학교 산학기술협력단 가뭄연구센터 센터장

<관심분야>

수공학, 가뭄, 환경 수공학, 기후변화

홍 일 표(HI-Pyo Hong)

[정회원]



- 1997년 8월 :건국대학교 박사
- 1986년 10월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수자원하천연구소연구위원

<관심분야>

수자원 관리, 재해관리, 물정보시스템 등