



Effect and uncertainty analysis according to input components and their applicable probability distributions of the Modified Surface Water Supply Index

Jang, Suk Hwan^a · Lee, Jae-Kyoung^{b*} · Oh, Ji Hwan^a · Jo, Joon Won^a

^aDepartment of Civil Engineering, Daejin University

^bInnovation Center for Engineering Education, Daejin University

Paper number: 17-028

Received: 16 March 2017; Revised: 23 May 2017 / 31 May 2017; Accepted: 31 May 2017

Abstract

To simulate accurate drought, a drought index is needed to reflect the hydrometeorological phenomenon. Several studies have been conducted in Korea using the Modified Surface Water Supply Index (MSWSI) to simulate hydrological drought. This study analyzed the limitations of MSWSI and quantified the uncertainties of MSWSI. The influence of hydrometeorological components selected as the MSWSI components was analyzed. Although the previous MSWSI dealt with only one observation for each input component such as streamflow, ground water level, precipitation, and dam inflow, this study included dam storage level and dam release as suitable characteristics of the sub-basins, and used the areal-average precipitation obtained from several observations. From the MSWSI simulations of 2001 and 2006 drought events, MSWSI of this study successfully simulated drought because MSWSI of this study followed the trend of observing the hydrometeorological data and then the accuracy of the drought simulation results was affected by the selection of the input component on the MSWSI. The influence of the selection of the probability distributions to input components on the MSWSI was analyzed, including various criteria: the Gumbel and Generalized Extreme Value (GEV) distributions for precipitation data; normal and Gumbel distributions for streamflow data; 2-parameter log-normal and Gumbel distributions for dam inflow, storage level, and release discharge data; and 3-parameter log-normal distribution for groundwater. Then, the maximum 36 MSWSIs were calculated for each sub-basin, and the ranges of MSWSI differed significantly according to the selection of probability distributions. Therefore, it was confirmed that the MSWSI results may differ depending on the probability distribution. The uncertainty occurred due to the selection of MSWSI input components and the probability distributions were quantified using the maximum entropy. The uncertainty thus increased as the number of input components increased and the uncertainty of MSWSI also increased with the application of probability distributions of input components during the flood season.

Keywords: MSWSI, Uncertainty quantification, Maximum entropy

Modified Surface Water Supply Index의 입력인자와 적용 확률분포에 따른 영향과 불확실성 분석

장석환^a · 이재경^{b*} · 오지환^a · 조준원^a

^a대진대학교 건설시스템공학과, ^b대진대학교 공학교육혁신센터

요 지

정확히 가뭄을 모의하기 위해서는 수문기상학적 현상을 반영할 수 있는 가뭄지수가 필요하며, 국내에서 수문학적 가뭄을 모의하기 위해 MSWSI (Modified Surface Water Supply Index)를 활용한 여러 연구가 진행되었다. 본 연구에서는 MSWSI의 한계점을 분석하고 MSWSI의 불확실성을 정량화하였다. 우선 MSWSI 인자로서 활용 가능한 수문기상인자의 선정에 따른 영향을 분석하였다. 기존 MSWSI에 적용한 하천유량, 지하수위, 강수, 댐유입량의 4개 입력인자별로 하나의 관측소자료만을 이용하였으나 본 연구에서는 중권역별 특성에 맞도록 댐저수위와 댐방류량도 포함하였으며, 여러 관측소의 자료를 취득하여 면적평균자료를 사용하였다. 2001년과 2006년 가뭄사태에 대해 MSWSI 모의검증 결과, 본 연구의 MSWSI가 실측수문기상자료의 경향을 더 잘 반영하여 가뭄을 모의하였으며, MSWSI 인자의 선정이 가뭄모의 정확성에 영향을 주는 것으로 나타났다. 다음으로 MSWSI 인자에 적용하는 확률분포의 선정에 따른 영향을 분석하였다. 강수자료는 Gumbel과 GEV 분포, 하천자료는 정규분포와 Gumbel 분포, 댐자료는 2-매개변수 대수정규분포와 Gumbel, 지하수는 3-매개변수 대수정규분포를 따르는 것으로 나타났다. 이에 따라 중권역별로 최대 36개의 MSWSI를 산정하였으며, 확률분포의 선정에 따라 MSWSI 범위가 매우 다르게 나타나 어떠한 확률분포를 적용하느냐에 따라 MSWSI 결과는 매우 달라질 수 있음을 확인하였다. 마지막으로 maximum entropy를 이용하여 MSWSI 입력인자의 선정과 입력인자별 확률분포 선정의 영향에 따른 불확실성을 정량화하였다. 분석결과, 입력인자의 수가 많이 적용될수록 불확실성은 증가하는 것으로 나타났으며, 홍수기에 MSWSI 입력인자별 확률분포 적용에 따라 MSWSI의 불확실성이 증가하는 것으로 나타났다.

핵심용어: MSWSI, 불확실성 정량화, Maximum entropy

*Corresponding Author. Tel: +82-31-539-2357

E-mail: myroom1@daejin.ac.kr (J.-K. Lee)

1. 서론

2014년부터 강원, 경기, 충청 일부지역을 중심으로 평년대비 50~61% 수준의 강수량으로 인해 발생한 가뭄의 영향이 현재까지 이어지고 있다(KMA, 2016). 이러한 강수량의 부족은 가뭄으로 이어져 2015년 경기도 평균 저수율을 약 50%까지 급감하였으며, 농업용수 부족과 생활용수 제한급수로 이어져 경제적 피해가 크게 발생하였다. 기존에 가뭄에 따른 피해를 예방하고 극복하기 위해 가뭄을 효과적으로 모니터링하고 전망하기 위한 많은 연구들이 진행되어 왔다(Tsakiris and Vangelis, 2005; Matera et al., 2007; Shukla and Wood, 2008; Karamouz et al., 2009; Vasiliades et al., 2011; Dogan et al., 2012). 특히 가뭄을 실제와 가장 가깝게 모의하기 위해서는 기상·수문학적 현상을 잘 반영할 수 있는 가뭄지수가 필요하나, 현실적으로 매우 복잡한 환경요인들이 작용하여 가뭄이 발생하기 때문에 이를 모두 반영하는 가뭄지수의 개발은 한계가 있다.

기존 국내 가뭄연구에는 국내외에서 개발된 매우 다양한 가뭄지수들이 적용되었다(Kwon et al., 2006; Kwon and Kim, 2006; Seo et al., 2008; Ahn and Kim, 2010; Park et al., 2011; Lee et al., 2015; Won et al., 2016; Kim et al., 2016). 이 중 본 연구에서는 수문학적 가뭄에 초점을 맞추어 살펴보았으며, 수문학적 가뭄지수 중 대표적인 SWSI (Surface Water Supply Index)를 분석하였다. SWSI는 Shafer and Dezman (1982)이 개발하였으며, 기본적으로 강수, 강설, 하천유량, 저수지 인자가 적용되나 적용하는 지역의 수문·기상학적 특성에 따라 인자의 적용이 유연하다는 장점이 있어 우리나라에서도 다양하게 적용되어 왔다. 국내 연구를 살펴보면, Kwon et al. (2006)과 Kwon and Kim (2006)는 우리나라 계절특성 상 강설의 비중이 낮으므로 SWSI의 강설인자를 지하수인자로 대체하여 Modified SWSI (이하 MSWSI)를 제시하였으며, 이를 전국에 적용하여 MSWSI의 효용성을 보였다. Kim et al. (2012)는 가뭄전망을 위해 MSWSI를 이용하였는데, 주단위와 월단위 MSWSI를 구성하고 이를 이용하여 기상정보기반의 확률론적 가뭄전망 기법을 제안하였다. 최근 Jang et al. (2016)은 기존 적용된 MSWSI를 개선하고 검증하는 연구를 수행하였다. 기존 MSWSI는 첫 번째로 유역에 따라 직·간접적으로 영향을 주는 인자가 다를 수 있으므로 가용한 인자를 다양하게 반영해야 하나 4개 입력인자(하천유량, 지하수위, 강수, 댐유입량)만을 적용하여, 좀 더 다양한 수문기상인자를 반영하지 못하는 한계가 있었다. 두 번째로 입력인자들은 MSWSI 산정과정에서 초과확률값으로 반영되거나 모든 인자

의 확률분포를 정규분포(normal distribution)로 가정하였다. 이에 따라, 이 연구에서는 MSWSI의 두 가지 제약점을 분석하고 이를 개선하여 기존 MSWSI보다 개선된 MSWSI의 정확성이 더 우수함을 증명하였다. 하지만 Jang et al. (2016)의 개선된 MSWSI의 산정과정에서도 몇가지 한계점이 존재하였다. 첫 번째 한계점은 MSWSI를 이용하는 연구자가 각 중권역별로 어떠한 수문기상인자를 입력인자로 선정하고 활용하는 것이며, 두 번째 한계점은 선정된 입력인자에 대하여 어떠한 확률분포를 적용할 것인가이다. 이 한계점들이 중요한 이유는 입력인자와 확률분포의 선정에 있어서 연구자의 주관적 판단에 따라 최종 MSWSI 결과가 달라질 수 있기 때문이다. 이러한 주관적 판단이 반영된 MSWSI의 결과들은 MSWSI를 활용한 가뭄모니터링과 가뭄전망에 대한 불확실성(uncertainty)을 높이는 결과로 이어질 가능성이 높다. 즉, MSWSI를 활용하여 수문학적 가뭄을 정확하게 모니터링하고 전망하기 위해서는 앞서 언급한 한계점이 최종 MSWSI 결과에 미칠 수 있는 영향에 대한 연구가 필요한 시점이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 다음과 같은 목적으로 연구를 수행하였다. 첫 번째로 MSWSI에서 입력인자로서 활용가능한 수문기상인자의 선정 및 선정된 각 입력인자에 적용되는 확률분포 따른 영향을 분석하여 최종 MSWSI 결과에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보고자 한다. 두 번째로 maximum entropy 기법을 이용하여 MSWSI 입력인자 및 인자별 적용되는 확률분포 선정의 영향에 대한 불확실성을 정량화하고 이를 분석하고자 한다.

2. 수문학적 가뭄지수 제약점 분석 및 영향분석

2.1 적용유역 및 기간

본 연구에서는 금강수계를 적용지역으로 선정하여 수문학적 가뭄지수의 분석과 불확실성 정량화 연구를 수행하였다(Fig. 1). 금강수계는 금강유역은 유로연장 401 km, 유역면적은 9,810 km²로서 총 21개 중권역(국가수자원관리종합정보시스템 제공)으로 구성되어 있으며, 다목적댐으로 용담댐(전주권 생공용수 담당)과 대청댐(대전과 충청권 용수담당)이 위치하고 있다. 금강수계는 하천구성이 복잡하지 않으나 2000년 이후 발생한 대부분의 큰 가뭄영향을 받은 지역이며, 이에 기존 국내 가뭄관련 연구의 적용지역으로 많이 활용되었다. 본 연구는 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr) 기준으로 금강수계내 14개 중권역을 대상으로 선정하였다. 또한 적용기간은 사회경제적으로 가뭄피해가 심했던



Fig. 1. 14 sub-basins in Geum river basin for case study

2001년, 2006년, 2014년을 대상으로 하였다. 2001년의 경우에는 경기, 충청, 영남북부 지역은 예년 강수량의 20~30% 수준밖에 되지 않았으며, 2006년에는 충남, 전라남북도, 경상남도를 중심으로 8~10월 강수량이 평년대비 30% 수준밖에 되지 않았다(NEMA, 2009). 2014년에는 강원, 경기, 충청 일부 지역의 강수량은 평년대비 50~61% 수준이었으며, 특히 일부 지역에는 생활용수 제한급수까지 실시하였다(KMA, 2016).

2.2 Modified Surface Water Supply Index의 제약점 분석

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 대표적 수문학적 가뭄지수이며, 국내외 가뭄연구에서 활발하게 이용된 MSWSI을 선정하였다. MSWSI의 가뭄심도는 7단계(-4.2~4.2; 극한가뭄(단계: 7), 강한가뭄(단계: 6), 약한가뭄(단계: 5), 보통상태(단계: 4), 약한습윤(단계: 3), 강한습윤(단계: 2), 극한습윤(단계: 1))로 구분되며, PDSI (Palmer Drought Severity Index)나 PHDI (Palmer Hydrological Drought Index)와 동일하다. MSWSI의 기본식은 다음과 같다.

$$MSWSI = \frac{[w_1 \times PN_{pcp} + w_2 \times PN_{gw} + w_3 \times PN_{sf} + w_4 \times PN_{rs}] - 50}{12} \tag{1}$$

여기서 PN 는 각 입력인자의 비초과확률(nonexceedance probability)이며, pcp 는 강수, gw 는 지하수위, sf 는 하천유량, rs 는 저수지, w 는 각 인자별 가중치를 의미한다.

MSWSI의 산정과정을 살펴보면, 첫 번째 단계로 MSWSI의 입력인자로 활용가능한 유역별 수문기상인자 분석 및 선정, 두 번째 단계로 MSWSI 입력인자의 가중치 산정, 세 번째로 각 입력인자의 확률분포 추정, 마지막 단계로 Eq. (1)의 MSWSI식을 이용하여 가뭄지수를 산정한다. 하지만 산정과정의 각 단계별로 MSWSI 산정에 미치는 중요한 요인들이 존재하며, 각 단계별 중요인자를 살펴보면 다음과 같다(Table 1).

- 첫 번째 단계: MSWSI에 활용가능한 유역별 수문기상인자 분석 및 선정
 - ① 중요인자는 적용가능한 입력인자의 수
 - ② 관련인자는 각 입력인자의 자료길이와 자료품질
- 두 번째 단계: MSWSI 입력인자별 가중치 산정
 - ① 중요인자는 각 입력인자별 가중치
 - ② 관련인자는 각 입력인자의 자료길이와 자료품질
- 세 번째 단계: 입력인자별 확률분포 선정 및 비초과확률값 산정
 - ① 중요인자는 각 입력인자별 비초과확률값
 - ② 관련인자는 적합한 확률분포의 선정과 각 입력인자의 자료길이 및 자료품질

첫 번째 단계에서는 활용가능한 다양한 수문기상인자를 선정하고 각 인자의 자료품질을 확보함으로써 MSWSI를 실제로 발생하는 가뭄에 가깝고 정확하게 모의할 수 있다. 두 번째 단계에서는 월별로 선정된 모든 입력인자 대비 각 인자의 비중을 비교하여 가중치를 잘 산정하여야 한다. 본 연구에서는 Doesken *et al.* (1991)이 제안한 가중치 산정방법을 이용하였다. 이 방법은 (1) 각 인자별로 월별값(monthly value)을 연총합(annual total value)으로 나누어 무차원화하여 초기 가중

Table 1. Important components for calculating MSWSI in each step

Step	Important component	Related component
Investigation of hydrometeorological components	Numbers of available components	• Data record period & quality of components
Calculation of weights	Weights	• Data record period & quality of components
Estimation of probability distributions	Probability values of non-exceedance	• Selection of proper probability distribution • Data record period & quality of components

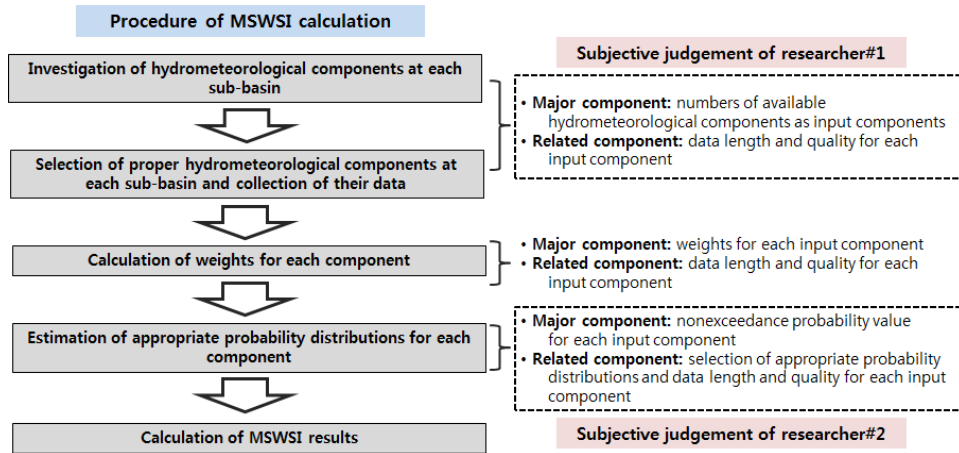


Fig. 2. Procedure of MSWSI calculation and corresponding steps to subjective judgement of researchers

치 산정; (2) 각 월별로 무차원화된 초기 가중치를 합하여 각 인자별 2차 가중치 산정; (3) 단계(2)에서의 12개월의 2차 가중치를 합산; (4) 각 인자의 월별 2차 가중치를 단계(3)의 총합으로 나누어 최종 가중치를 산정하는 단계로 수행된다. 해당 유역에서 각 입력인자별로 월별 가중치를 산정함에 따라 어떤 월이나 계절에 어떤 수문기상인자의 영향을 많이 받는지 분석이 가능하다. 마지막 단계에서는 각 입력인자에 적합한 확률분포를 선정하고 이를 이용하여 Eq. (1)에서 필요한 각 입력인자의 비초과확률값을 산정하게 된다. 하지만 앞서 언급한 단계 중 첫 번째 단계와 세 번째 단계에서는 연구자의 경험과 주관적 판단이 개입할 여지가 매우 크며, 이는 MSWSI의 모의결과가 달라질 수 있음을 의미한다. MSWSI 모의단계별 연구자의 주관적 판단이 미치는 사항을 나타내면 다음과 같다(Fig. 2).

- 첫 번째 단계: MSWSI에 활용가능한 중권역별 수문기상인자 분석 및 선정
 - ① 활용가능한 수문기상인자의 선정
 - ② 수문기상인자의 자료품질 검증
 - ③ 수문기상인자의 자료를 취득할 기상·수문관측소의 선정
- 세 번째 단계: MSWSI의 입력인자별 확률분포 선정 및 비초과확률값 산정
 - ① 입력인자별 확률분포 추정
 - ② 확률분포의 선정

2.3 Modified Surface Water Supply Index의 입력인자에 따른 영향분석

앞서 언급한 바와 같이 MSWSI 산정과정에서 단계별로 연구자의 주관적 경험과 판단에 따라 MSWSI 결과가 달라질 수

있으므로, 본 연구에서는 주관적 경험과 판단 개입의 가능성이 가장 높은 첫 번째와 세 번째 단계에서 적용하는 입력인자에 따른 영향분석을 다음과 같이 수행하였다.

2.3.1 MSWSI 입력인자로 활용가능한 수문기상인자의 선정에 따른 영향

본 연구에서는 우선 적용대상인 금강유역을 대상으로 중권역별로 활용가능한 모든 수문기상인자를 9가지(기상자료, 우량자료, 수위자료, 국가하천, 지방하천 1급과 2급, 광역상수도, 지방상수도, 지하수위)로 구분하고 조사하였다. 이 실질적으로 MSWSI 입력인자로 적용가능한 수문기상인자로서 기상자료, 수위-우량자료, 댐자료(유입량, 방류량, 수위), 지하수자료를 우선 선정하였다. 또한 각 수문기상인자에 대해 취득이 가능한 각 관측소별로 자료를 수집하였으며, 이를 바탕으로 최종적으로 유역별로 선정된 수문기상인자는 Table 2와 같다. 추가적으로 각 중권역에 대해 가장 지배적인(가중치가 가장 큰) 수문기상인자에 따라 해당 중권역을 댐상류, 댐하류, 하천, 지하수, 강수, 상수도 유역으로 분류하였다. 이를 바탕으로 본 연구에서 조사한 내용을 기존 MSWSI 연구(K-water, 2005)와 비교하였으며, 그 결과는 Table 3과 같다. Table 3을 살펴보면, 첫 번째로 기존 MSWSI 연구에서는 입력인자별로 하나의 관측소자료만을 이용하였으나 본 연구에서는 여러 관측소의 자료를 평균하여 사용하였으며, 특히 강수의 경우에는 지점자료보다 면적평균자료를 이용하였다. 두 번째로 기존 MSWSI 연구에서는 댐자료 반영을 대청댐 유입량자료만을 반영하였다. 이는 해당 연구가 수행되는 시기에 용담댐의 자료길이 충분치 않기 때문으로 판단된다. 본 연구에서는 ① 용담댐의 영향을 받는 유역과 대청댐 영향을 받는 중권역을 구분하여 댐자료를 적용하였으며, ② 댐자료는

기존 적용한 댐유입량 뿐만 아니라 댐상·하류를 구분하여 상류에는 댐유입량과 저수위자료, 댐하류에는 방류량자료를 적용하였다. 다만 본 연구에서는 자료간의 다중공선성(multicollinearity)에 대해서는 고려하지 않았다. 종합적으로 살펴보면, 기존 MSWSI 연구에서는 강수, 하천, 댐유입량, 지하수 위만을 입력인자로 반영하였으며, 입력인자 자료를 취득하기 위해 강수는 6개 관측소(면적평균강수, 전국 대상), 하천은 10개 관측소, 지하수는 3개 관측소를 이용하였다. 본 연구에서는 강수, 하천, 댐유입량, 댐저수위, 댐방류량, 지하수위로 입력인자의 수를 늘렸으며, 강수는 42개 관측소(면적평균강수, 금강유역 대상), 하천은 28개 관측소, 지하수는 7개 관측소로 확장하여 자료를 취득하였다.

다음으로 수문기상인자 선정의 변화에 따른 영향을 살펴보기 위해 Tables 2 and 3의 입력인자 자료를 이용하여 2001년과 2006년에 발생한 가뭄을 대상으로 MSWSI를 모의하였다. 기존 MSWSI 연구(K-water, 2005)와 동일하게 수행하기 위해 모든 입력인자의 확률분포를 정규분포(normal distribution)로 가정하여 적용하였다. Table 4는 2001년과 2006년 7월의 금강수계에 대한 기존과 본 연구에서의 MSWSI 결과를 나타내고 있다. 2001년에는 기존과 본 연구에서의 MSWSI 모두 전 중권역에 대하여 가뭄이 발생한 것으로 나타내고 있다. 동일한 MSWSI 값을 나타내는 중권역도 있으나 대부분의 중권역에서 1~2단계의 차이를 나타내고 있다. 특히, 기존 MSWSI에서는 중권역 3001부터 중권역 3004까지 동일한 가뭄인자

Table 2. Selected hydrometeorological components and stations at each sub-basin

Sub-basin	Sub-basin name	Hydrometeorological components			
		Precipitation	Streamflow	Dam	Groundwater
3001	Yongdam dam	Jangsu, Daebul, Buksang, Jinan	Donghyang, Chunchun	Inflow & water-level in Yongdam dam	Jangsu-Jangsu
3002	Downstream of Yongdam dam	Muju (KW)	Anchun	Release discharge in Yongdam dam	
3003	Muju Namdaecheon	Muju (KW), Buksang, Muju (M)	Sulchun, Jangbaek		
3004	Youngdongcheon	Geumsan (K), Geumsan (KW), Youngdong	Sutong, Hotan		Geumsan-Geumsan, Geumsan-Boksu
3005	Chogang	Chupoongryung, Hwanggan, Buhang2	Songchun, Simchun		
3006	Upstream of Daecheong dam	Iwon	Okchun		
3007	Bocheongcheon	Boeun (K), Boeun (KW), Neungwol	Gidaeyo, Chungsung		
3008	Daecheong dam	Gunbuk, Annae	Okgakgyo, Daechung dam, Hyundo	Inflow & water-level in Daechung dam	
3009	Gapcheon	Daecheon	Bangdong, Sindae		Daejeon-Moonpyung, Daejeon-Taepyung
3010	Downstream of Daecheong dam	Bugang	Bugang, Maepo	Release discharge in Daechung dam	
3011	Mihocheon	Cheongju, Chunan, Gaduk, Sunghwan, Byungcheon, Jeungpyung, Jinchun, Oryu	Chungju, Hapgang, Mihogyo		Chungwon-Gaduk, Jinchun-Jinchun
3012	Geum river Gongju	Buyeo, Chungyang, Jungsan, Banpo, Bokryong, Gongju, Hongsan, Jungan	Guryong, Gyum		
3013	Nonsancheon	Yeonsan, Jangsun, Ganggyung	Hangwol, Nonsan		
3014	Geum river estuary bank	Gunsan, Hameol, Ganggyung	Ippo, Okpo		

Table 3. Comparison of hydrometeorological components in each sub-basin between the previous and this MSWSI study

Sub-basin	Previous MSWSI study	This MSWSI study	Sub-basin classification
3001	D_DF, SF (1 OB), Pcp (1 OB)	Y_DF & Y_DWL, SF (2 OBs), Pcp (4 OBs), GW (1 OB)	Upstream of dam
3002	D_DF, SF (1 OB), Pcp (1 OB)	Y_DRD, SF (2 OBs), Pcp (4 OBs)	Downstream of dam
3003	D_DF, SF (1 OB), Pcp (1 OB)	SF (2 OBs), Pcp (3 OBs)	Precipitation, Streamflow
3004	D_DF, SF (1 OB), Pcp (1 OB)	SF (3 OBs), Pcp (2 OBs), GW (2 OBs)	Precipitation, Streamflow
3005	D_DF, SF (1 OB), Pcp (1 OB)	SF (2 OBs), Pcp (3 OBs)	Precipitation, Streamflow
3006	D_DF, SF (1 OB), Pcp (1 OB)	SF (1 OB), Pcp (1 OB)	Precipitation, Streamflow
3007	D_DF, SF (1 OB), Pcp (1 OB)	SF (2 OBs), Pcp (3 OBs)	Precipitation, Streamflow
3008	D_DF, Pcp (1 OB)	D_DF & D_DWL, SF (3 OBs), Pcp (2 OBs)	Upstream of dam
3009	SF (1 OB), Pcp (1 OB), GW (1 OB)	SF (2 OBs), Pcp (1 OB), GW (2 OBs)	Downstream of dam
3010	Pcp (1 OB)	D_DRD, SF (2 OBs), Pcp (1 OB)	Precipitation, Streamflow
3011	SF (1 OB), Pcp (1 OB), GW (1 OB)	SF (3 OBs), Pcp (8 OBs), GW (2 OBs)	Precipitation, Groundwater
3012	SF (1 OB), Pcp (1 OB)	SF (2 OBs), Pcp (8 OBs)	Precipitation, Streamflow
3013	Pcp (1 OB)	SF (2 OBs), Pcp (3 OBs)	Precipitation, Streamflow
3014	Pcp (1 OB)	SF (2 OBs), Pcp (3 OBs)	Precipitation, Streamflow

*Y : Yongdam dam, D : Daechong dam, DF: Dam Inflow, DWL: Dam WaterLevel, DRD: Dam Release Discharge, Pcp: Precipitation, SF: StreamFlow, WL: WaterLevel, GW: GroundWater, OB: Observed station

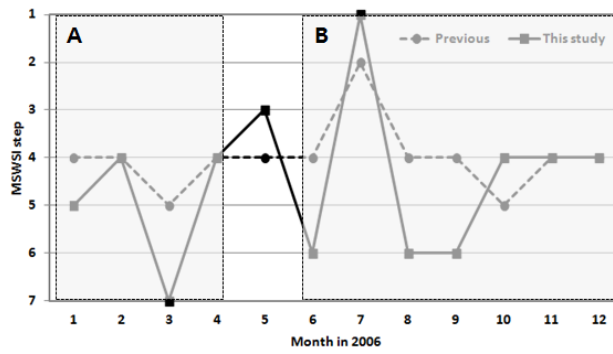
Table 4. Comparison of the previous and this MSWSI results in July in each sub-basin

Sub-basin	Previous MSWSI result (step)		This MSWSI result (step)	
	2001	2006	2001	2006
3001	-1.95 (5)	2.91 (2)	-0.49 (4)	3.48 (1)
3002	-1.95 (5)	2.91 (2)	-0.41 (4)	0.98 (4)
3003	-1.95 (5)	2.91 (2)	-2.08 (6)	4.03 (1)
3004	-1.95 (5)	2.91 (2)	-1.09 (5)	3.68 (1)
3005	-2.76 (6)	0.739 (4)	0.87 (4)	3.80 (1)
3006	-0.91 (4)	2.01 (2)	-2.46 (6)	3.74 (1)
3007	-2.66 (6)	1.45 (3)	-3.55 (7)	3.50 (1)
3008	-2.80 (6)	2.69 (2)	-2.47 (6)	3.69 (1)
3009	-3.16 (7)	1.89 (3)	-3.21 (7)	1.41 (3)
3010	-2.49 (6)	2.39 (2)	-2.41 (6)	3.36 (1)
3011	-2.14 (6)	1.65 (3)	-1.94 (5)	3.35 (1)
3012	0.53 (4)	0.40 (4)	-1.76 (5)	2.51 (2)
3013	-1.45 (5)	2.70 (2)	-3.20 (7)	3.49 (1)
3014	-0.77 (4)	2.70 (2)	-1.92 (5)	3.23 (1)

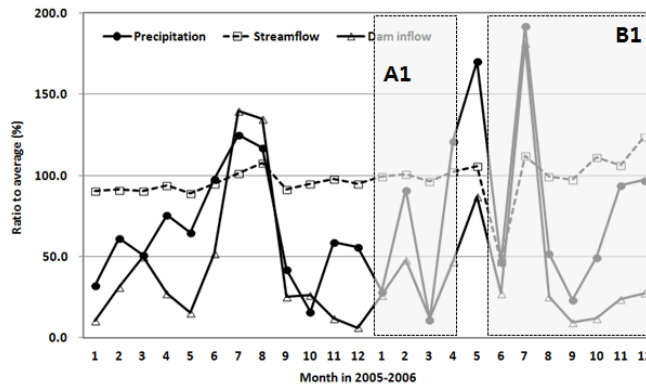
를 적용하여 동일한 MSWSI 값을 나타내고 있으나 본 연구의 MSWSI에서는 조금씩 다른 MSWSI 값을 나타내고 있다. 2006년은 2001년과 다르게 기존 MSWSI에서는 금강수계 전체에서 물부족이 발생하지 않는 정도의 상태를 나타냈으며, 본 연구의 MSWSI는 수자원이 기존보다 풍부한 것으로 모의 되었다. 이에 따라 기존과 본 연구의 MSWSI를 검증하기 위해 실측강수, 실측하천유량, 실측댐유입량과 방류량을 이용하여 MSWSI 결과와 다음과 같이 비교하였다.

(1) 중권역 3001(용담댐 유역)

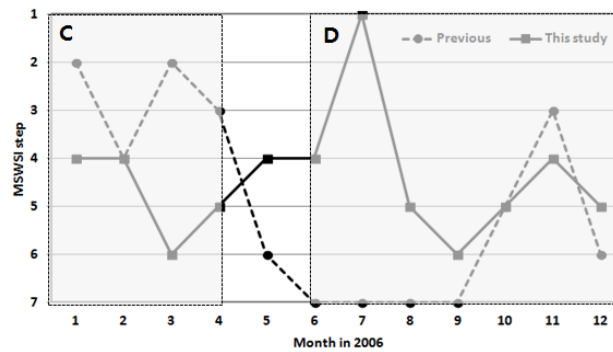
Fig. 3(a)는 중권역 3001에 대해 2006년 기존 MSWSI와 본 연구의 MSWSI에 대한 시계열을 나타내고 있다. 기존 MSWSI와 본 연구의 MSWSI 모두 2006년 초반에는 가뭄이 발생하였다가 홍수기가 지나면서 가뭄이 다소 해소되는 경향을 나타내고 있으나 본 연구의 MSWSI가 조금 더 가뭄강도가 강하게 나타내고 있다. 이에 대해 중권역 3001의 수문기상자료인 강수, 하천유량, 댐유입량의 평년 평균대비 비율을 살펴보았



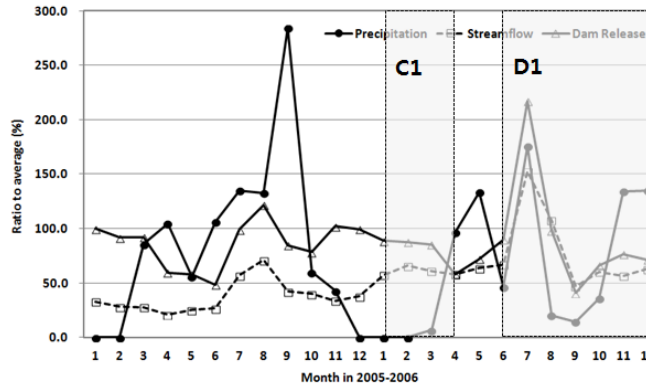
(a) Time series of the previous and this monthly MSWSI results in 2006 at 3001



(b) Time series of monthly precipitation, streamflow, and dam inflow in 2005-2006 at 3001



(c) Time series of the previous and this monthly MSWSI results in 2006 at 3010



(d) Time series of monthly precipitation, streamflow, and dam release in 2005-2006 at 3010

Fig. 3. Verification of the previous and this MSWSI results in sub-basin 3001 and 3010: (a) & (b) at 3001 and (c) & (d) at 3010

며, Fig. 3(b)와 같다. Fig. 3(a)의 기간 A에 해당하는 Fig. 3(b)의 기간 A1에서 강수와 댐유입량은 2005년 1~4월까지 평균보다 낮으며, 하천유량은 평년과 거의 비슷하게 나타났다. 또한 기간 Fig. 3(a)의 기간 B에 해당하는 Fig. 3(b)의 기간 B1에서는 2006년 7월 평균대비 매우 큰 강수가 발생하여 댐유입량과 하천유량 모두 상승하였으나 8월 이후 다시 평균대비 매우 작게 발생하여 댐유입량도 감소한 것으로 나타났다. 2006년 3월, 6월, 8월 이후의 관측자료를 살펴보면, 하천유량은 어느 정도 유지되나 강수나 댐유입량의 발생이 작기 때문에 수문학 적 가뭄이 어느 정도 발생하는 것이 더 타당할 것으로 판단된다. 또한 입력인자의 가중치가 홍수기에는 하천유량, 댐자료, 강수, 갈수기에는 지하수위 등의 영향이 큰 것으로 나타났으며(Jang *et al.*, 2016), 더 많은 입력변수와 이에 대한 가중치까지 반영한 본 연구의 MSWSI가 기존보다 모의정확성이 높다고 판단된다.

(2) 중권역 3010(대청댐하류 유역)

Fig. 3(c)는 중권역 3010에 대해 2006년 기존 MSWSI와 본 연구의 MSWSI에 대한 시계열이며, 매우 다른 경향을 나타내고 있다. 기존 MSWSI는 2006년 초반에는 가뭄이 발생하지 않았으나 홍수기에 극심한 가뭄이 발생한 것으로 나타났으나 본 연구의 MSWSI는 2006년 초반에는 다소 물부족이 발생하였으나 7월에는 매우 수자원이 풍부하다가 8월 이후 다시 물부족이 발생하는 것으로 나타났다. 이에 대해 중권역 3010의 수문기상자료인 강수, 하천유량, 댐방류량의 평년 평균대비 비율을 살펴보았으며, Fig. 3(d)와 같다. Fig. 3(c)의 기간 C에 해당하는 Fig. 3(d)의 기간 C1에서 강수는 거의 발생하지 않았으며, 댐방류량과 하천유량은 평균보다 낮았다. 이 기간동안 기존 MSWSI는 수자원이 풍부한 것으로 나타났으나 실제적으로 다소 물부족이 발생하였으며, 강수의 영향이 매우 큰 계절이므로 본 연구의 MSWSI의 모의정확성이 더 나은 것으로 판단된다. 또한 기간 Fig. 3(c)의 기간 D에 해당하는 Fig. 3(d)의 기간 D1에서는 2006년 7월 평균대비 매우 큰 강수가 발생하여 댐방류량과 하천유량 모두 상승하여 물부족이 해결되었으며, 8월 이후 다시 평균대비 매우 작게 발생하여 댐방류량과 하천유량 모두 감소한 것으로 나타났다. 기존 MSWSI는 강수, 하천유량, 댐방류량이 평균대비 큰 7월에도 물부족이 발생하는 것으로 나타나고 있으나 본 연구의 MSWSI는 수자원이 매우 풍부한 것으로 나타내고 있다. 또한 2006년 갈수기에 하천유량과 댐방류량은 평균보다 작으며 변동이 크지 않으며, 강수의 발생이 크게 나타나고 있다. 하지만 기존 MSWSI 값의 변동이 매우 크게 나타나고 있으며, 본 연구의 MSWSI는

강수발생으로 물부족이 다소 해소되나 전반적으로 물부족이 발생하는 것으로 나타났다. 이에 따라 본 연구의 MSWSI 결과가 관측자료의 경향을 상대적으로 더 잘 모의하고 있는 것으로 판단된다.

앞서 살펴본 바와 같이, MSWSI 입력인자로 어떠한 수문기상인자를 사용하는지, 어떠한 관측소의 자료를 취득하는지, 얼마만큼의 관측소 자료를 이용하는지에 따라 실제 발생하는 가뭄을 정확하게 모의하는지에 영향을 줄 수 있음을 확인하였다.

2.3.2 MSWSI 입력인자별 확률분포에 따른 영향 분석

다음으로 본 연구에서는 MSWSI 입력인자에 대한 확률분포의 선정이 MSWSI 결과에 미치는 영향을 분석하였으며, 이를 위해 각 수문기상인자에 적합한 확률분포를 추정하였다. 앞서 언급한 바와 같이, 기존 MSWSI 연구(K-water, 2005)에서는 모든 수문기상인자가 정규분포를 따르는 것으로 가정하여 비초과확률을 추정하였다. 본 연구에서는 각 수문기상인자별로 적용가능한 확률분포(GEV, 정규분포, 2-매개변수 대수정규분포, 3-매개변수 대수정규분포)를 선정하였으며, 매개변수 추정방법으로는 최우도법(maximum likelihood method), 확률가중모멘트법(probability weighted moment method), 모멘트법(method of moment)을 이용하였다. 또한 적합도 검정(goodness of fit test)을 위해 log-likelihood 검정을 이용하였다. 추정결과, 강수자료는 Gumbel와 GEV (Generalized Extreme Value) 분포를 따르는 것으로 나타났으며, 하천자료는 정규분포와 Gumbel 분포가 적합하였다. 댐자료(유입량, 방류량, 저수위)는 2-매개변수 대수정규분포(2-parameter log-normal distribution)와 Gumbel, 지하수위 자료는 3-매개변수 대수정규분포를 따르는 것으로 나타났다.

이와 같이 적용가능한 확률분포는 입력인자와 중권역별로 조금씩 다르며, 동일한 중권역에서도 여러 개의 확률분포가 적용이 가능하므로 어떤 확률분포를 선정하느냐에 따라 MSWSI 모의결과가 달라질 가능성이 존재한다. 이에 따라 본 연구에서는 기존 MSWSI 연구에서 적용한 정규분포부터 본 연구에서 적합하다고 나타난 확률분포 모두를 적용하여 MSWSI를 모의하여 그 결과가 얼마나 달라질 수 있는지를 분석하였으며, Table 5는 수문기상인자별 적용가능한 확률분포를 나타낸다. 적용과정을 살펴보면, 중권역별로 입력인자의 수가 다르나 중권역별로 정규분포와 앞서 추정된 확률분포의 수를 포함하여 최대 36개(= 강수 3개 × 하천유량 2개 × 댐자료 3개 × 지하수 2개)의 MSWSI를 모의하였으며, 이 중 최대

Table 5. Available probability distributions to each hydrometeorological component at each sub-basin

Sub-basin	MSWSI components			
	Precipitation	Streamflow	Dam	Groundwater
3001	• Gumbel • GEV • Normal	• Gumbel • Normal	• 2-Log-Normal • Gumbel • Normal	• 3-Log-Normal • Normal
3002	• Gumbel • GEV • Normal	• Gumbel • Normal	• 2-Log-Normal • Gumbel • Normal	
3003	• Gumbel • GEV • Normal	• Gumbel • Normal		
3004	• Gumbel • GEV • Normal	• Gumbel • Normal		• 3-Log-Normal • Normal
3005	• Gumbel • GEV • Normal	• Gumbel • Normal		
3006	• Gumbel • GEV • Normal	• Gumbel • Normal		
3007	• Gumbel • GEV • Normal	• Gumbel • Normal		
3008	• Gumbel • GEV • Normal	• Gumbel • Normal	• 2-Log-Normal • Gumbel • Normal	
3009	• Gumbel • GEV • Normal	• Gumbel • Normal		• 3-Log-Normal • Normal
3010	• Gumbel • GEV • Normal	• Gumbel • Normal	• 2-Log-Normal • Gumbel • Normal	
3011	• Gumbel • GEV • Normal	• Gumbel • Normal		• 3-Log-Normal • Normal
3012	• Gumbel • GEV • Normal	• Gumbel • Normal		
3013	• Gumbel • GEV • Normal	• Gumbel • Normal		
3014	• Gumbel • GEV • Normal	• Gumbel • Normal		

와 최소값의 범위로서 나타내었다. 또한 입력인자 자료는 앞서 본 연구에서 나타낸 Table 2의 수문기상인자들을 적용하였으며, 그 결과는 Fig. 4와 같다.

우선 중권역 3001의 MSWSI 결과를 살펴보면, Fig. 4(a)의 2006년 가뭄사례에서 최대와 최소 MSWSI는 비슷한 경향을

나타내고 있으나 최대와 최고 MSWSI 범위는 2~3단계 차이가 발생하였다. 최대 MSWSI에서는 대부분 물부족이 발생하지 않는 것으로 나타났으나 최소 MSWSI는 7월을 제외하고 대부분 물부족에 의한 가뭄이 발생하는 것으로 나타났다. 정규분포만을 적용한 MSWSI는 최대와 최소 MSWSI의 평균값과

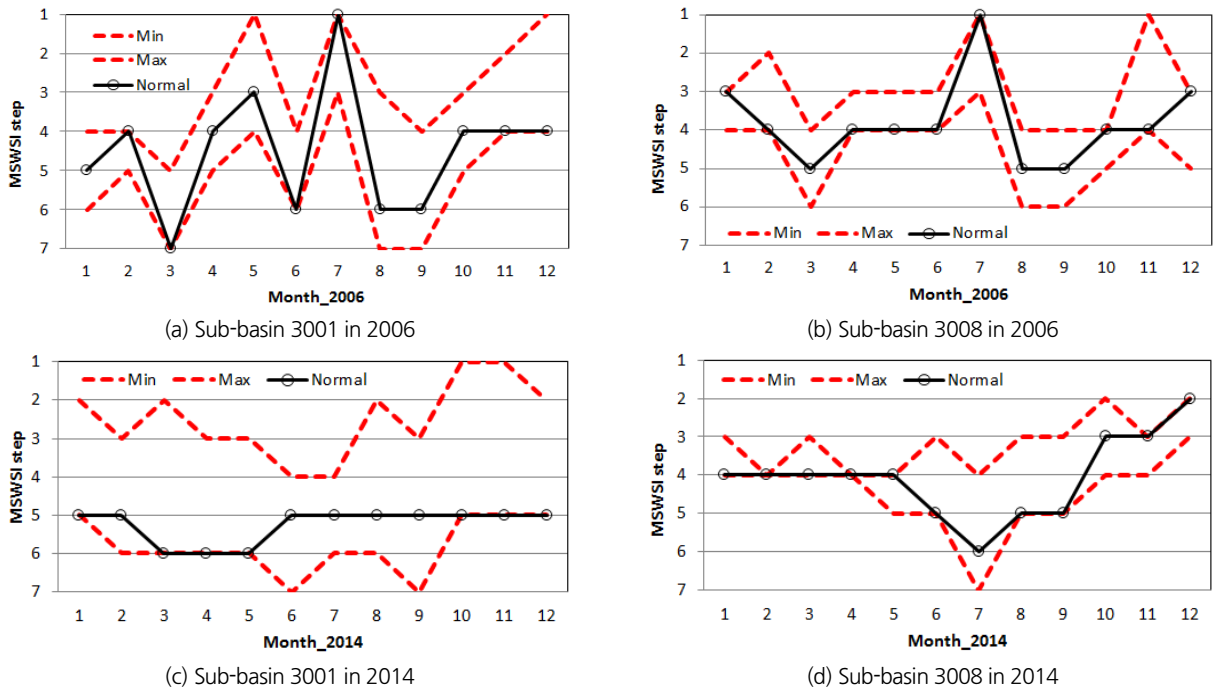


Fig. 4. Comparison of the previous and this MSWSI results in July in each sub-basin 3001 and 3008 in 2006 and 2014: (a) & (b) at 3001 & 3008 in 2006 and (c) & (d) at 3001 & 3008 in 2014

비슷하게 나타났다. 2006년과 반대로 Fig. 4(b)의 2014년 가뭄 사례에서는 최대와 최소 MSWSI 모의결과가 매우 다르게 나타났다. 최대 MSWSI는 4단계(보통상태)이상으로서 2014년 동안 수자원이 매우 풍부한 것으로 나타났으나 최소 MSWSI에서는 극심한 가뭄이 지속적으로 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 정규분포만을 적용한 MSWSI에서도 비슷한 결과를 보였다. 또한 최대와 최소 MSWSI의 차이가 매우 크게(최대 5단계) 발생하였다. 다음으로 중권역 3008(대청댐 유역)의 MSWSI 모의결과를 살펴보면, Fig. 4(c)의 2006년 가뭄사례에서 최대와 최소 MSWSI는 비슷한 경향을 나타내고 있으며, 최대와 최고 MSWSI 범위도 1~2단계 차이만 발생하였으나 최대 MSWSI에서는 대부분 물부족이 발생하지 않는 것으로, 최소 MSWSI는 3월, 8월, 9월에 가뭄이 발생하는 것으로 나타났다. 정규분포만을 적용한 MSWSI는 최대와 최소 MSWSI의 평균값과 비슷하게 나타났다. Fig. 4(d)의 2014년 가뭄사례에서는 1~5월까지는 최대와 최소 MSWSI가 거의 비슷하게 나타났으나 홍수기에 모의결과 범위가 큰 것으로 나타났다. 앞서 살펴본 바와 같이, 확률분포의 선정에 따라 MSWSI 모의범위가 매우 크므로 어떠한 확률분포를 적용하느냐에 따라 그 가뭄모의 결과는 매우 달라질 수 있음을 확인하였다. 이에 따라 확률분포의 선정이 실제 발생하는 가뭄모의 정확성에 영향을 줄 수 있음을 확인하였다.

3. 개선된 가뭄지수의 불확실성 정량화

3.1 불확실성 정량화 방법

Shannon (1948)은 정보량(information context)을 주어진 정보의 확률로부터 주어지는 것이라 정의하고 이에 대한 불확실성(uncertainty)을 정량적으로 추정할 수 있는 방법인 entropy를 제안하였다. 주어진 정보가 발생할 확률이 크다면 정보량은 작고, 정보의 발생확률이 작다면 정보량은 크게 된다. 즉, 주어진 정보의 정보량이 클수록 그 정보의 불확실성 또한 크다고 할 수 있다. 정보 X 는 확률 p 를 가지는 무작위 변수(random variable)라 정의하고 정보량 $I(X)$ 에 평균적인 개념을 도입하여 정리하면, entropy의 기본식은 다음과 같다(Shannon, 1948).

$$I(X) = -\ln p_X(x) \tag{2}$$

$$H(X) = -\sum p_X(x) \ln p_X(x) = \sum p_X(x) I(X) = E[I(X)] \tag{3}$$

여기서 H 는 X 의 entropy, X 는 확률 p 를 가지는 무작위 변수, x 는 변수 X 의 값, $p_X(\cdot)$ 는 X 의 확률질량함수(probability mass function)이다. 주어진 정보량의 평균적인 불확실성을 정량

적으로 추정하면 entropy가 되며, 대표적인 기본특징은 다음과 같다(Gay and Estrada, 2010).

- ① Entropy는 모든 상황이 동일한 확률 p 를 가질 때, 가장 큰 값을 가진다.
- ② 동일한 확률 p 를 가지는 상황의 수가 늘어날수록 불확실성(entropy)은 점점 커진다.

Maximum Entropy (이하 ME)는 Shannon (1948)이 제시한 entropy 이론을 바탕으로 Jaynes (1957)이 발표한 이론이며, 어떤 정보가 주어졌을 때 이를 바탕으로 불확실성을 최대화 하는 확률밀도함수를 제공한다. 만약 어떤 구간(최소값 a 와 최대값 b)이 주어진다면 maximum entropy distribution은 uniform distribution ($f(x) = 1/(b-a)$)이며, $[a, b]$ 구간 내에서 모든 사건의 발생확률은 동일하게 나타난다. 이를 entropy $H(X)$ 로 나타내면 아래와 같다(Gay and Estrada, 2010).

$$H(X) = - \int_a^b f_X(x) \ln f_X(x) dx \quad (4)$$

subject to normalization constraint: $\int_a^b f(x) dx = 1$

$$H(X) = - \int_a^b f_X(x) \ln f_X(x) dx \quad (5)$$

$$= - \int_a^b \frac{1}{b-a} \ln \frac{1}{b-a} dx = - \ln(b-a)$$

여기서 $f_X(\cdot)$ 는 X 의 확률밀도함수(probability density function)이다. 본 연구에서는 MSWSI 모의결과값이 a 와 b 의 값으로 사용된다.

3.2 가뭄지수의 불확실성 정량화

본 장에서는 2.3장의 MSWSI 입력인자와 이에 따른 확률 분포의 선정에 따른 결과들을 Eq. (5)에 적용하여 입력인자에 따른 MSWSI의 불확실성을 분석하였으며, 그 결과는 Table 6 및 Fig. 5와 같다. 우선 Table 6(a)의 각 중권역별 ME를 살펴 보면, 2001년 가뭄사례에서는 중권역 3001이 가장 큰 ME값(1.002), 중권역 3006이 가장 작은 ME값(0.521)을 나타냈으며, 2006년 사례는 중권역 3002 (ME = 1.210)이 가장 크며, 중권역 3012 (ME = 0.578)이 가장 작았다. 2014년 사례도 중권역 3001 (ME = 1.503)이 가장 크며, 중권역 3012 (ME = 0.363)이 가장 작았으며, 평균적으로 중권역 3001이 가장 크고, 중권역 3012의 ME가 가장 작았다. 특이한 사항은 각 중권역 ME값이 조금씩 차이가 있으나 가뭄사례가 달라도 동일한 중권역에서 ME는 비슷한 경향을 나타냈다. 즉, 입력인자의 수가 많이 적용된 중권역의 ME값은 크게 나타나며, 상대적으로 가뭄인

Table 6. Maximum entropy results for each sub-basin and month in each drought event

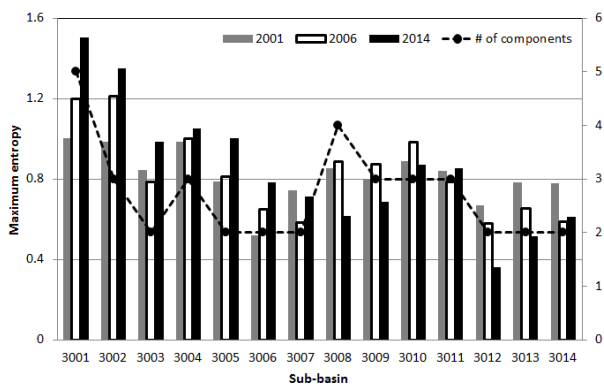
(a) For each sub-basin

Sub-basin	Maximum entropy			Average
	2001	2006	2014	
3001	1.002	1.198	1.503	1.234
3002	0.985	1.210	1.352	1.182
3003	0.845	0.785	0.985	0.872
3004	0.985	1.002	1.052	1.013
3005	0.789	0.812	1.005	0.869
3006	0.521	0.651	0.785	0.652
3007	0.742	0.584	0.712	0.679
3008	0.854	0.888	0.616	0.786
3009	0.795	0.875	0.687	0.786
3010	0.891	0.985	0.871	0.916
3011	0.841	0.784	0.852	0.826
3012	0.668	0.578	0.363	0.537
3013	0.784	0.652	0.514	0.650
3014	0.781	0.587	0.612	0.660

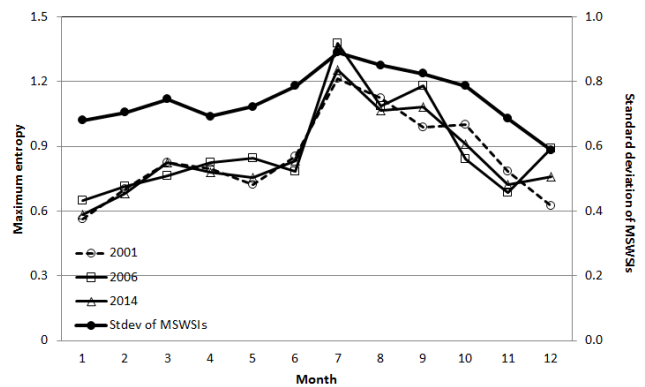
Table 6. Maximum entropy results for each sub-basin and month in each drought event (Continue)

(b) For each month

Month	Maximum entropy			Average	Season	Averaged ME
	2001	2006	2014			
1	0.562	0.650	0.541	0.584	Spring	0.787
2	0.701	0.716	0.629	0.682		
3	0.825	0.765	0.882	0.824		
4	0.795	0.827	0.722	0.781	Summer	1.053
5	0.721	0.847	0.697	0.755		
6	0.854	0.785	0.865	0.835		
7	1.215	1.379	1.174	1.256	Autumn	0.904
8	1.125	1.087	0.992	1.068		
9	0.987	1.182	1.077	1.082		
10	1.002	0.843	0.883	0.909	Winter	0.676
11	0.785	0.686	0.695	0.722		
12	0.625	0.889	0.768	0.761		



(a) For each sub-basin



(b) For each month

Fig. 5. Comparison of maximum entropy results between sub-basins and months for each drought event

자의 수가 적게 사용된 중권역의 ME값은 낮게 나타났다(Fig. 5(a)). MSWSI 입력인자의 수와 ME와의 상관계수를 살펴보면, 2001년에는 0.81, 2006년에는 0.75, 2014년에는 0.68로 나타나 어느 정도 상관성이 있는 것으로 나타났다. 특히, 입력인자의 수에 따른 전체평균 ME값을 살펴보면, 2개 입력변수의 전체평균 ME값은 0.703, 3개 입력변수는 0.944, 4개 입력변수는 0.812, 5개 입력변수는 1.234로서 4개 입력변수를 제외하고는 입력변수의 수가 증가할수록 ME값이 증가하는 것으로 나타났다. 중권역별 입력인자의 차이는 댐유입량, 댐방류량, 지하수위의 정보이며, 강수와 하천유량 정보는 모든 중권역에서 사용되었다. 중권역마다 다른 관측소의 정보가 사용되었기 때문에 중권역별 ME값의 차이가 강수와 하천유량보다 댐과 지하수에 의한 영향이라 단정할 수는 없으며, 이에

대해 영향 여부에 대해서는 더 연구가 필요할 것으로 사료된다. 하지만 보편적인 결과는 아니나 앞선 결과에서 유추할 수 있는 것은 입력인자를 많이 사용하는 것이 반드시 정확한 가뭄모의로 이어지는 것은 아니라는 것이다. 즉, ME가 높다는 것은 MSWSI의 불확실성이 크다는 것이므로 중권역별 수문기상학적 특징을 잘 나타낼 수 있는 인자만을 선정하여 적용할 필요성이 있음을 나타낸다고 할 수 있다. 또한 평균적으로 2001년 가뭄사례의 평균 ME는 0.820, 2006년 가뭄사례는 0.828, 2014년 가뭄사례는 0.851로서 거의 비슷한 ME값을 보였다.

다음으로 Table 6(b)의 가뭄사례의 월별 ME를 살펴보면, 2001년 가뭄사례에서는 7월의 ME값이 1.215로서 가장 크고 1월의 ME값이 0.562로 가장 작았으며, 2006년 사례도 7월

(ME = 1.379)이 가장 크며, 1월(ME = 0.650)이 가장 작았다. 2014년 사례 또한 7월(ME = 1.174)이 가장 크며, 1월(ME = 0.541)이 가장 작았으며, 계절별 ME값도 홍수기인 여름철이 1.053으로서 가장 높게 나타났다. 이러한 경향은 가뭄사례별 ME값이 조금씩 차이가 있으나 월별 ME가 비슷하게 나타났다. 즉, 갈수기에는 ME값이 작으나 홍수기에는 ME값이 상대적으로 증가하였다. Fig. 5(b)에서도 동일한 결과를 확인할 수 있는데, 각 가뭄사례의 월별 ME값 경향을 살펴보면 갈수기보다 홍수기의 ME값이 상대적으로 높으며, 가뭄사례별로 조금 상이하나 월별 경향이 거의 비슷한 것으로 나타났다. 이러한 원인을 살펴보고자 2.3절의 확률분포 선정에 따라 모의된 MSWSI 결과들에 대한 표준편차를 Fig. 5(b)에 같이 도시하였으며, MSWSI의 표준편차 경향과 각 가뭄사례의 월별 ME값이 홍수기에는 크게, 갈수기에는 작게 나타나는 경향이 비슷하였다. MSWSI 모의값의 표준편차가 크다는 것은 확률분포의 선정에 따른 모의결과 변화가 크다는 것을 의미하며, 이는 곧 MSWSI 결과의 불확실성에 영향을 주는 것을 뜻한다. 즉, 홍수기에 상대적으로 ME가 높다는 것은 그 시기의 MSWSI의 불확실성이 크다는 것을 의미하므로, 홍수기에 MSWSI 입력인자별 확률분포의 선정이 매우 중요함을 의미한다고 할 수 있다. 또한 각 입력인자의 분산이 홍수기에 가장 크므로 이 특징을 잘 반영할 수 있는 확률분포를 선정하여야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 국내에서 개선되고 적용된 바 있는 MSWSI의 문제점을 분석하였으며, 이러한 문제점들로 인해 발생하는 MSWSI의 불확실성을 정량화하여 제시하였다. 본 연구에서 수행한 세부 연구를 살펴보면, 첫 번째로 MSWSI의 입력인자로서 활용가능한 수문기상인자의 선정과 각 입력인자에 적용하는 확률분포의 선정이 최종 MSWSI에 어떤 영향을 주는지 분석하였다. 기존 MSWSI 연구에서는 하천유량, 지하수위, 강수, 댐유입량의 4개 입력인자별로 하나의 관측소자료만을 이용하였으나 본 연구에서는 기존 4개 입력인자뿐만 아니라 중권역별 특성에 맞도록 댐저수위와 댐방류량도 포함하였으며, 강수의 경우에는 여러 관측소의 자료를 취득하여 면적 평균자료를 사용하였다. 기존과 본 연구에서 제안한 수문기상자료를 이용하여 2001년과 2006년 가뭄사례에 적용하였으며, MSWSI 검증결과, 본 연구의 MSWSI가 실측수문기상자료의 경향을 더 잘 반영하여 가뭄을 모의하는 것으로 나타

났다. 이는 어떠한 수문기상인자를 선정할 것인가, 어떤 관측소의 자료를 어느정도 취득할 것인가 등이 MSWSI 입력인자의 선정에 많은 영향을 주며, 실제 발생하는 가뭄의 정확한 모의에도 영향을 주는 것을 의미한다. 다음으로 MSWSI 입력인자에 대한 확률분포의 선정에 따라 MSWSI가 어떻게 달라지는지 그 영향을 분석하였다. 각 입력인자별로 적합한 확률분포를 추정하였으며, 강수자료는 Gumbel와 GEV 분포, 하천자료는 정규분포와 Gumbel 분포, 댐자료는 2-매개변수 대수정규분포와 Gumbel, 지하수는 3-매개변수 대수정규분포를 따르는 것으로 나타났다. 이에 따라 중권역별로 최대 36개(= 강수 3개 × 하천유량 2개 × 댐자료 3개 × 지하수 2개)의 MSWSI를 산정하였으며, 확률분포의 선정에 따라 MSWSI 범위가 매우 다르게 나타나 어떠한 확률분포를 적용하느냐에 따라 그 가뭄모의 결과는 매우 달라질 수 있음을 확인하였다.

두 번째로 MSWSI 입력인자의 선정과 입력인자별 확률분포 선정의 영향에 따른 불확실성을 정량화할 수 있는 방법을 제안하였으며, 이를 이용하여 최종 가뭄지수의 불확실성을 정량화하고 분석하였다. 불확실성을 정량화하기 위해 maximum entropy 이론과 식을 이용하였으며, 입력인자와 확률분포의 선정에 따른 결과들을 ME식에 적용하여 입력인자에 따른 MSWSI의 불확실성을 분석하였다. 분석결과, 입력인자의 수가 많이 적용된 중권역의 ME값은 크게 나타났고 상대적으로 입력인자의 수가 적게 사용된 중권역의 ME값은 낮게 나타났으며, 입력인자를 많이 사용하는 것이 반드시 정확한 가뭄을 모의하는 것은 아님을 확인하였다. 즉, MSWSI의 모의정확성 향상을 위해서는 적절한 수의 자료 품질이 좋은 입력변수를 활용하여야 한다. 또한 각 가뭄사례의 월별 ME값 경향을 살펴보면 갈수기보다 홍수기의 ME값이 상대적으로 높으며, 가뭄사례별로 월별 경향이 거의 비슷하였다. 즉, 홍수기에 ME가 크게 나타난 것은 그 시기의 MSWSI 모의결과의 불확실성이 크다는 것을 의미하므로, 홍수기에 입력인자별 확률분포 선정의 중요함을 확인하였다.

따라서 본 연구에서 MSWSI의 불확실성 분석결과를 MSWSI를 이용한 가뭄모니터링과 가뭄전망에 적용한다면, 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 기상산업진흥원의 기상 See-AT 기술개발 사업의 연구비지원(KMIPA2015-6190)에 의해 수행되었습니다.

References

- Ahn, K., and Kim, Y.-O. (2010). "A study on improving drought indices and developing their outlook technique for Korea." *Proceeding of Korea Water Resources Association*, pp. 6-12.
- Dogan, S., Berkday, A., and Singh, V. P. (2012). "Comparison of multi-monthly rainfallbased drought severity indices, with application to semi-arid Konya closed basin, Turkey." *Journal of Hydrology*, Vol. 470, pp. 255-268.
- Gay, C., and Estrada, F. (2010). "Objective probabilities about future climate are a matter of opinion." *Climatic Change*, Vol. 99, pp. 27-46.
- Jang, S. H., Lee, J.-K., Oh, J. H., and Jo, J. W. (2016). "The probabilistic drought forecast based on ensemble using improvement of the modified surface water supply index." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 10, pp. 835-849.
- Jaynes, E. T. (1957). "Information theory and statistical mechanics." *The Physical Review*, Vol. 106, pp. 620-630.
- Karamouz, M., Rasouli, K., and Nazif, S. (2009). "Development of a hybrid index for drought prediction: case study." *Journal of Hydrologic Engineering*, 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000022, pp. 617-627.
- Kim, J.-Y., So, B.-J., Kim, T.-W., and Kwon, H.-H. (2016). "A development of trivariate drought frequency analysis approach using copula function." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 10, pp. 823-833.
- Kim, Y.-O, Lee, J.-K., and Richard, N. P. (2012). "A drought outlook study in Korea." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 57, No. 6, pp. 1141-1153.
- KMA (2016). *2015 The abnormal climate report*. Korea Meteorological Administration.
- K-water (2005). *Development of the monitoring system for the drought management*.
- Kwon, H. J., and Kim, S. J. (2006). "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.
- Kwon, H. J., Park, H. J., Hong, D. O., and Kim, S. J. (2006). "A study on semi-distributed hydrologic drought assessment modifying SWSI." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 8, pp. 645-658.
- 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.
- Matera, A., Fontana, G., and Marletto, V. (2007). "Use of a new agricultural drought index within a regional drought observatory." *In Methods and Tools for Drought Analysis and Management*. Edited by G. Rossi. Springer, Dordrecht, The Netherlands. pp. 103-124.
- NEMA (2009). *Performance report for the progress to overcome drought*. National Emergency Management Agency.
- Park, M. J., Shin, H. J., Choi, Y. D., Park, J. Y., and Kim, S. J. (2011). "Developing of a hydrological drought index considering water availability." *Joournal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 35, No. 6, pp. 165-170.
- Seo, H. D., Jeong, S. M., Kim, S. J., and Lee, J. H. (2008). "A study on the optimal water supply using virtual drought exercise with hydrological drought index." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 10, pp. 1045-1058.
- Shannon, C. E., (1948). "A mathematical theory of communication." *Bell System Technical Journal*, Vol. 27, pp. 379-423.
- Shukla, S., and Wood, A. W. (2008). "Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought." *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, No. 2, L02405.
- Tsakiris, G., and Vangelis, H. (2005). "Establishing a drought index incorporating evapotranspiration." *European Water*, Vol. 9, No. 10, pp. 3-11.
- Vasiliades, L., Loukas, A., and Liberis, N. (2011). "A water balance derived drought index for Pinios River Basin, Greece." *Water Resources Management*, Vol. 25, No. 4, pp. 1087-1101.
- Won, K. J., Chung, E.-S., Lee, B.-R., and Sung, J.-H. (2016). "Characteristics of the Han river basin drought using SPEI and RDI." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 3, pp. 187-196.