



## Future water supply risk analysis using a joint drought management index in Nakdong river basin

Yu, Ji Soo<sup>a</sup> · Choi, Si-Jung<sup>b</sup> · Kwon, Hyun-Han<sup>c</sup> · Kim, Tae-Woong<sup>d\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

<sup>b</sup>Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>c</sup>Department of Civil Engineering, Chonbuk National University

<sup>d</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University (ERICA)

Paper number: 18-039

Received: 23 June 2018; Revised: 3 September 2018 / 7 November 2018; Accepted: 7 November 2018

### Abstract

Water supply system aims to meet the user's demand by securing water resources in a stable way. However, water supply failure sometimes happens because inflow decreases during drought period. Droughts induced by the lack of precipitation do not always lead to water supply failures. Thus, it is necessary to consider features of actual water shortage event when we evaluate a water supply risk. In this study, we developed a new drought index for drought management, i.e., Joint Drought Management Index (JDMI), using two water supply system performance indices such as reliability and vulnerability. Future data that were estimated from GCMs according to RCP 4.5 and 8.5 scenarios were used to estimate future water supply risk. After dividing the future period into three parts, the risk of water supply failure in the Nakdong River basin was analyzed using the JDMI. As a result, the risk was higher with the RCP 4.5 than the RCP 8.5. In case of RCP 4.5, W18 (Namgangdam) was identified as the most vulnerable area, whereas in case of RCP 8.5, W23 (Hyeongsangang) and W33 (Nakdonggangnamhae) were identified as the most vulnerable area.

**Keywords:** Climate change, Joint drought management index, Reliability, Vulnerability, Water supply risk

## 결합가뭄관리지수(JDMI)를 이용한 낙동강 유역의 미래 용수공급 위험도 분석

유지수<sup>a</sup> · 최시중<sup>b</sup> · 권현한<sup>c</sup> · 김태웅<sup>d\*</sup>

<sup>a</sup>한양대학교 대학원 건설환경공학과, <sup>b</sup>한국건설기술연구원 국토보전연구본부, <sup>c</sup>전북대학교 토목공학과, <sup>d</sup>한양대학교 공학대학 건설환경공학과

### 요 지

용수공급시스템은 용수를 안정적으로 확보하여 사용자의 수요량을 충족시키는 것을 목표로 하지만, 평년보다 적은 유입량으로 인해 정상공급에 실패하는 경우가 발생한다. 그러나 강수의 부족으로 발생하는 가뭄 상황이 언제나 용수공급 실패를 유발하는 것은 아니기 때문에, 용수공급에 대한 안전도를 산정할 때 실질적인 용수 부족 사상의 특성을 고려할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 이수안전도 평가 지표로 주로 사용되는 신뢰도와 취약도를 이용하여 결합가뭄관리지수(JDMI)를 개발하였으며, 이를 바탕으로 미래 용수공급 위험도를 산정하였다. 미래에 대한 분석을 위해 RCP 4.5 및 8.5 시나리오에 대하여 GCM으로부터 생산된 기후변화 시나리오 자료를 적용하고 미래 기간을 21세기 전기, 중기, 및 후기로 구분하였다. JDMI를 기반으로 낙동강 유역의 용수공급 위험도를 분석한 결과 RCP 4.5 시나리오에서 RCP 8.5 시나리오보다 위험도가 더 높은 것으로 분석되었다. 용수공급 취약지역은 RCP 4.5에서는 남강댐(W18)으로 나타났으며, RCP 8.5에서는 형산강(W23)과 낙동강남해(W33) 유역으로 분석되었다.

**핵심용어:** 결합가뭄관리지수, 기후변화, 신뢰도, 취약도, 용수공급 위험도

\*Corresponding Author. Tel: +82-31-400-5184  
E-mail: twkim72@hanyang.ac.kr (T.-W. Kim)

### 1. 서론

용수공급시스템은 사용자의 수요량을 충족시킬 수 있는 용수를 안정적으로 확보해야 하지만, 평년보다 적은 강수량 등의 원인으로 정상공급에 실패하는 경우가 발생한다. 기후변화의 영향에 따른 우리나라 강수 특성의 변화로 인해 미래 용수공급 안전도를 평가할 필요가 있으며, 선행연구에서는 기후변화 시나리오에 따른 강수량 자료를 이용하여 분석한 결과 태화강, 회야·수영강 및 형산강을 포함하는 낙동강 권역의 가뭄이 과거보다 극심해질 것이라고 전망하였다(Park *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2016). 그러나 강수의 부족이 언제나 용수공급 실패를 유발하는 것은 아니며, 용수공급 실패에 대한 위험도를 산정할 때 실질적인 용수 부족을 대변하는 변수를 고려할 필요가 있다.

용수공급 안전도 또는 이수안전도의 평가에는 Hashimoto *et al.* (1982)가 제안한 신뢰도(reliability), 회복도(resiliency) 및 취약도(vulnerability)의 세 가지 평가지표가 주로 사용된다. 이러한 평가지표는 각각 용수공급 실패가 평균적으로 얼마나 자주 발생하는지, 얼마나 오래 지속되는지, 또한 어느 정도의 규모로 발생하는지를 정량적으로 표현하는 것으로, 용수공급 실패 사상의 빈도, 지속기간 및 심도와 상응하는 것이라 할 수 있다. Maity *et al.* (2013)은 회복도와 취약도의 결합확률분포를 통해 DMI (Drought Management Index)를 산정하였으며, Goharian *et al.* (2018)은 신뢰도와 취약도를 결합하여 WSPI (Water System Performance Index)를 산정하고 이를 이수안전도 평가지표로 활용하여 가뭄 위험도를 정량화하였다.

두 가지 지표를 결합하여 결합가뭄지수를 산정할 때는 코플라(copula) 함수가 최근에 주로 적용된다. 코플라 함수는 이변량 수문빈도해석 및 위험도 분석에서 다양하게 적용되어 실

제 적용성이 입증되었다(Zhang *et al.*, 2013; AghaKouchak *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2015; Chang *et al.*, 2016). Kao and Govindaraju (2010)은 강수량과 하천유량을 코플라 함수로 결합했으며, Hao and AghaKouchak (2013)은 SPI (Standardized Precipitation Index)와 SSI (Standardized Soil moisture Index)를 결합하여 가뭄 위험도를 평가하였다. 또한 우리나라에서도 이와 유사한 연구가 수행된 바 있다(Kim *et al.*, 2012; So *et al.*, 2014, 2015). 결합가뭄지수는 여러 변수를 다양하게 고려할 수 있어 가뭄의 다방면 평가가 가능하다.

본 연구에서는 기후변화의 영향으로 인해 변화하는 미래의 용수공급 위험도를 전망하기 위해 결합가뭄관리지수 (Joint Drought Management Index, JDMI)를 개발하였다. JDMI는 유역의 이수안전도를 나타내는 신뢰도와 취약도의 확률분포를 코플라 함수로 결합하여 산정되며, 용수공급 실패 사상의 확률론적 발생 가능성에 대해 위험도를 평가할 수 있다. 이를 위해 GCM으로부터 생산된 기후변화 시나리오 자료를 이용하여, 미래 기간을 21세기 전기, 중기 및 후기의 3개 구간으로 구분하여 낙동강 유역의 용수공급 위험도를 분석하였다.

### 2. 연구 지역 및 자료

본 연구에서는 유역의 물부족 상황을 판단하기 위해 강수량이나 하천유량이 아닌 한국건설기술연구원과 스톡홀름 환경 연구소 보스턴 센터(Stockholm Environment Institute Boston Centre, SEI-B)가 공동 개발한 K-WEAP을 통해 산정된 용수 부족량 자료를 사용하였다(Choi *et al.*, 2012). K-WEAP 모형은 선형계획법에 따라 물 배분 모의를 수행한다. K-WEAP에서 구축하는 용수수급 네트워크는 공급원, 수요처, 합류점 등의 노드(node)와 하도, 도수로 등의 링크(link)

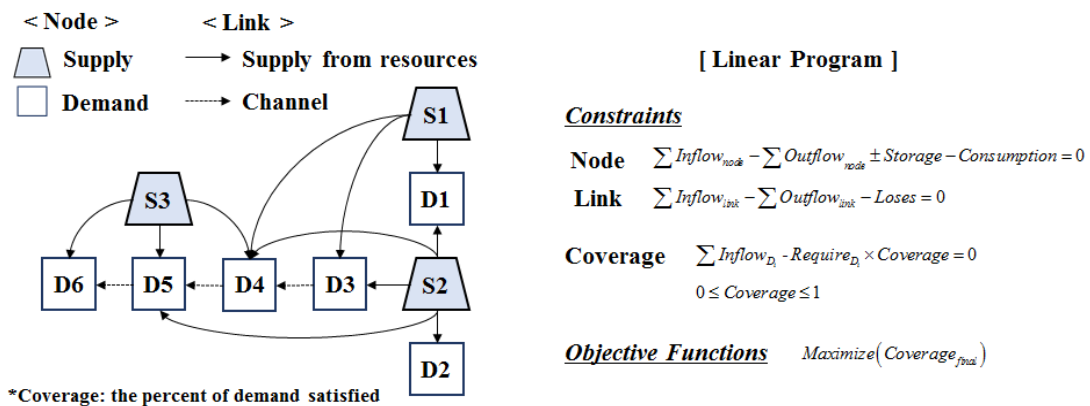


Fig. 1. The structure and functions of K-WEAP model

로 구성되어 있다(Fig. 1 참고). 각 노드와 링크는 물수지 원리에 의한 제약조건을 가진다. Fig. 1에 나타낸 것과 같이 최종 수요충족률을 최대화하는 목적함수를 통해 용수를 배분한다.

본 연구에서는 RCP (Representative Concentration Pathways) 기후변화 시나리오와 대기대순환모형(General Circulation Model, GCM)으로 산정된 수문기상 자료를 K-WEAP 모형에 적용하여 산정한 물 수급 전망 분석 결과를 활용하였다. 분석을 위해 사용된 기후변화 시나리오는 자료 자체의 불확실성을 포함하고 있으며, 이러한 불확실성이 K-WEAP 모형을 거쳐 더 커질 가능성이 있으나, 그 전이 과정을 정확하게 파악하는 것은 어려움이 있다. 분석 결과의 신뢰도를 확보하기 위해서는 이러한 불확실성을 정량적으로 분석할 필요가 있지만,

Table 1. GCM models used in this study

No.		GCMs	Institution	Resolution
RCP 4.5	RCP 8.5			
S1	S4	HadGEM-ES	Met Office Hadley Centre	1.875° × 1.250°
S2	S5	CMCC-CMS	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici	0.75° × 0.75°
S3	S6	IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre Simon Laplace	3.75° × 1.875°

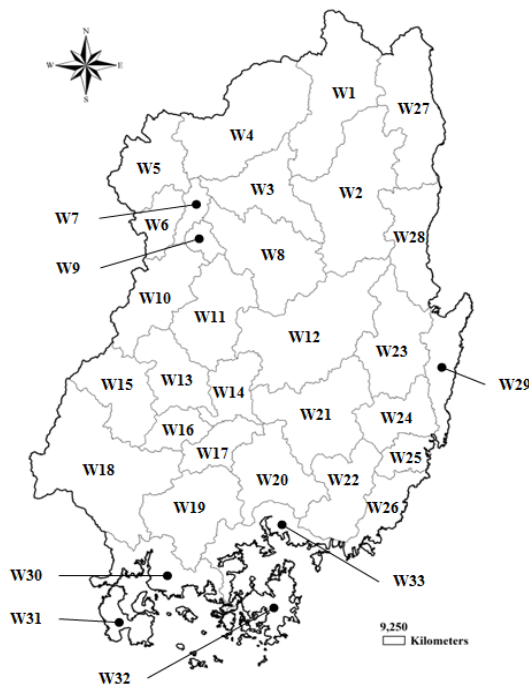


Fig. 2. Study area - Nakdong river basin

본 연구에서는 별도의 분석을 수행하지 않았다. 다만, 여러 기후변화 시나리오를 적용하여 가뭄위험도의 발생 가능 범위를 파악하였다. 본 연구에서는 총 6개의 기후변화 시나리오를 적용했으며, RCP와 GCM에 대한 정보는 Table 1과 같다. 분석은 낙동강 유역의 33개 중권역에 대하여 84년(2016년 10월 - 2099년 9월)의 기간 동안 월 단위로 수행되었다. 유역 정보는 Fig. 2에 나타낸 것과 같으며, 자세한 정보는 WAMIS (www.wamis.go.kr)에서 확인할 수 있다.

### 3. 연구 방법 및 적용

#### 3.1 이수안전도 평가지표

신뢰도( $\alpha$ )는 수자원 시스템이 특정 계획기간 동안 정상적으로 용수공급을 수행할 수 있는 확률을 의미한다. Eq. (1)과 같이 총 분석기간 동안 정상공급을 수행한 기간의 비율로써 산정된다. 회복도( $\gamma$ )는 용수공급 실패 사상이 발생했을 때 수자원 시스템이 실패로부터 얼마나 빠르게 회복하는 지를 나타내는 지표이다. Hashimoto *et al.* (1982)는 회복도를 실패 사상이 발생한 후 다음 달에 목표공급량을 달성하는 확률로 정의했으며 수학적 표현은 Eq. (2)와 같다. 취약도( $\nu$ )는 용수부족의 양적 위험도를 나타내는 지표로, Eq. (3)과 같이 용수공급 실패 사상의 평균 부족량으로 정의된다.

$$\alpha = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{T} \tag{1}$$

$$\gamma = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \right]^{-1} \tag{2}$$

$$\nu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i \tag{3}$$

여기서  $N$ 은 분석 기간 동안 발생한 용수공급 실패 사상의 개수이며,  $T$ 는 총 분석 월수이다.  $d_i$ 와  $s_i$ 는 각각  $i$ 번째 사상의 지속기간과 용수부족량을 나타낸다.

이수안전도 평가지표는 용수공급 시설의 일정 운영기간에 대하여 산정된다. 본 연구에서는 시간의 흐름에 따른 수자원 시스템의 용수공급 안전도를 파악하기 위해 5년 이동 자료구간(moving window)을 사용하여 2016-2099년 자료를 5년 간격으로 구분하여 신뢰도와 취약도를 산정하였다. 예를 들어,

첫 번째 자료구간은 2016-2020년이며, 그 다음은 2017-2021년, 2018-2022년 순이다. 이러한 방법을 적용하여 각 구역에서 동일하게 총 79개 구간에 대한 신뢰도-취약도 자료를 확보하였다.

**3.2 코플라와 Kendall 분포 함수**

코플라 함수는 다변량 결합확률분포를 산정할 때, 결합 가능한 주변확률분포 함수의 제한이 없고, 수문변수들 사이의 의존구조를 파악하기 용이하다는 장점이 있어 수자원 분야에서 다양하게 적용되고 있다. 본 연구에서는 용수공급 실패에 대한 위험도 분석을 위해 코플라 함수를 이용하여 지역의 용수공급 신뢰도와 취약도 지표의 결합확률분포를 산정하고, 실패 사상의 발생 특성을 파악하였다. 신뢰도는 높은 값을 가질수록 위험도가 낮고 취약도는 높은 값을 가질수록 위험도가 높음을 나타내므로, 계산의 편의를 위하여  $\alpha' = 1 - \alpha$ 와  $\nu$ 를 변수로 사용하였다. 특정 신뢰도 및 취약도의 값을 갖는 용수공급 실패 사상의 발생 위험도는 Eq. (4)와 같이 정의할 수 있으며, 코플라 함수를 이용하여 나타내면 Eq. (5)와 같다.

$$Risk = P[\alpha' < r_1, \nu < v_1] = F[F_X(x), F_Y(y)] \quad (4)$$

$$C_{UV}(u, v) = C[F_X(x), F_Y(y)] = q \quad (5)$$

여기서,  $r_1$ 과  $v_1$ 은 신뢰도와 취약도의 특정 값을 나타내며,  $F_X(x)$ 와  $F_Y(y)$ 는 각각  $\alpha'$ 과  $\nu$ 의 확률분포함수를 의미한다.

코플라 함수를 이용하여 산정한 누적확률(cumulative probability)  $C_{UV}(u, v) = q$ 에 해당하는 주변확률분포  $u, v$ 는 하나의 값으로 고정되지 않으며, 여러 가지 조합으로 인해 같은 값의  $q$ 가 산정될 수 있다. 만약 특정 신뢰도와 회복도를 갖는 용수공급 실패 사상의 발생확률을 위험도를 나타내는 지표로써 사용한다면, 결합확률분포 함수에서 특정 분위수(quantile)에 해당하는 무작위 사상의 발생확률을 파악하는 과정이 수행되어야 한다. Salvadori and De Michele (2011)은 Kendall 분

포함수를 이용하여 Eq. (6)과 같이 다차원 결합확률분포 함수의 정보를 1차원으로 축소하여 나타낼 수 있는 방법을 제시하였다.

$$K_c(q) = P[C_{UV}(u, v) \leq q] \quad (6)$$

여기서  $K_c$ 는 Kendall 분포함수를 나타내며,  $q$ 는 주변확률분포  $u$ 와  $v$ 를 통해 산정된 코플라 함수의 누적확률을 의미한다. 본 연구에서 적용한 코플라 함수와 Kendall 분포함수는 Table 2와 같다.

**3.3 JDMI (Joint Drought Management Index) 산정 방법**

Fig. 3은 시나리오 S1의 구역 W23 (형상강)에 해당하는 JCDF (Joint Cumulative Distribution Function)와 그에 따른 Kendall 분포의 값을 산정하여 나타낸 것이다. 여기서 주변확률분포  $U$ 와  $V$ 는 각각 신뢰도와 취약도를 이용하여 산정되었다. JCDF의 분위수에 따라 Kendall 분포함수의 구간을 나눌 수 있다. 본 연구에서는 A (0.00-0.25), B (0.25-0.50), C (0.50-0.75), D (0.75-1.00)의 4개 구간으로 구분하였다(Fig. 3). 4개의

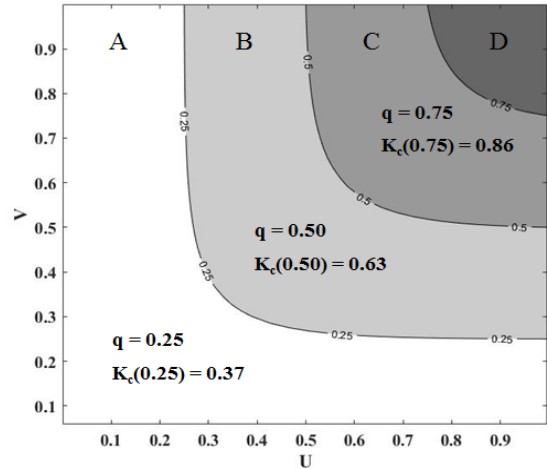


Fig. 3. Example of distribution function  $K_c$  of Frank Archimedean copula function estimated for W23 of S1

Table 2. Copula functions and Kendall distribution functions used in this study

Name	Copula function	Kendall distribution function
Clayton	$C(u, v; \theta) = (u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$	$K_c(t) = t + \frac{t^{-\theta} - 1}{\theta t^{-\theta} - 1}$
Frank	$C(u, v; \theta) = \frac{1}{\theta} \ln \left[ 1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right]$	$K_c(t) = t + \frac{\ln \left( \frac{e^{-\theta t} - 1}{e^{-\theta} - 1} \right) (1 - e^{-\theta t})}{\theta}$
Gumbel	$C(u, v; \theta) = \exp \{ - [ (-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta ]^{1/\theta} \}$	$K_c(t) = t - \frac{t \ln t}{\theta}$

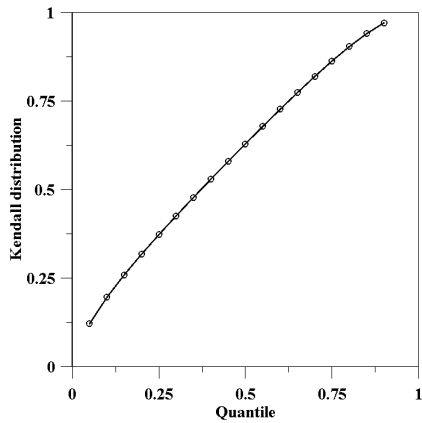
구역은 각각 신뢰도와 취약도의 다양한 조합에 따른 가뭄 상황을 나타낸다.

JDMI는 표준강수지수(SPI)와 같이 Kendall 분포에 대한 정규분포함수의 역함수를 통해 정의된다. JDMI의 산정 방법은 Eq. (7)과 같으며, 여기서  $\phi$ 는 정규분포함수를 나타낸다.

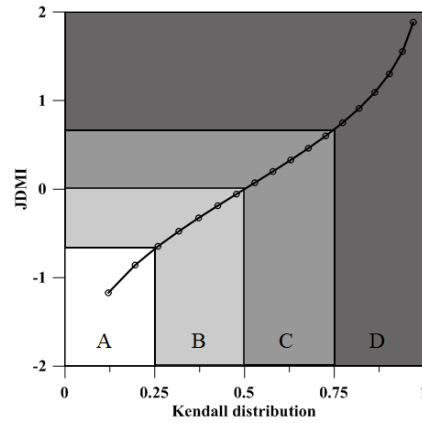
$$JMDI = \phi^{-1}(K_c(q)) = \phi^{-1}(P[C_{UV}(u, v) \leq q]) \quad (7)$$

Fig. 4(a)는 코플라 JCDF의 분위수와 그에 따라 산정된

Kendall 분포와의 관계를 나타내며, Fig. 4(b)는 Kendall 분포의 값과 그에 따라 산정된 JDMI의 관계를 나타낸다. Fig. 4 또한 Fig. 3과 같이 시나리오 S1의 유역 W23에서 산정된 결과이다. Fig. 4(a)에서 JCDF와 Kendall 분포는 정비례 관계를 갖고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 4(b)에 나타난 것과 같이  $K_c$ 가 0.5일 때 JDMI의 값이 0으로 산정된다. SPI와 같이 JDMI가 0일 때를 정상상태(normal)로 정의하면, JDMI가 0보다 작을 때가 과잉상태(surplus)이고 0보다 큰 값을 가질 때 부족상태(deficit)를 나타낸다. 따라서 A와 B 구간에 속하는 사상은 비



(a) Relationship between quantile and Kendall distribution



(b) Relationship between Kendall distribution and JDMI

Fig. 4. Relationships between copula quantile, Kendall distribution, and JDMI

Table 3. Drought event characteristics for P1 (2016-2040), P2 (2041-2070), and P3 (2071-2099)

Scenario	Char.	P1	P2	P3
S1	# of events	23.83	33.17	29.88
	Duration (month)	67.38	94.25	85.63
	Magnitude ( $10^6 \text{ m}^3$ )	375.85	440.98	447.26
S2	# of events	26.42	37.38	38.54
	Duration (month)	61.29	94.88	95.54
	Magnitude ( $10^6 \text{ m}^3$ )	291.01	453.38	465.33
S3	# of events	25.29	30.79	29.29
	Duration (month)	89.21	116.17	101.54
	Magnitude ( $10^6 \text{ m}^3$ )	742.78	1000.01	888.20
S4	# of events	23.25	31.83	29.13
	Duration (month)	52.08	98.42	83.54
	Magnitude ( $10^6 \text{ m}^3$ )	225.52	457.75	396.99
S5	# of events	26.25	34.29	33.04
	Duration (month)	76.33	112.75	105.08
	Magnitude ( $10^6 \text{ m}^3$ )	363.43	524.07	466.10
S6	# of events	32.50	42.46	41.17
	Duration (month)	84.50	120.79	127.83
	Magnitude ( $10^6 \text{ m}^3$ )	358.18	564.37	595.66

가뭄(non-drought) 상태이며, C와D 구간에 해당하는 사상을 물부족 상황으로 정의할 수 있다.

### 4. 결과 및 토의

#### 4.1 용수공급 실패 사상

용수공급 실패 사상은 K-WEAP 분석 결과를 통해 산정되었으며, 공급량이 유역의 용수 수요량을 충족시키지 못하여 용수 부족량이 발생한 때를 시작으로 정상공급 상태로 돌아오기까지의 일련의 상태를 하나의 사상으로 정의한다. 본 연구에서는 6개 시나리오(S1, S2, S3, S4, S5, S6)에 대해 3개 기간(P1 (2016-2040), P2 (2041-2070), P3 (2071-2099))으로 나누어 33개 중권역 유역의 실패 사상 개수, 지속기간 그리고 용수부족량을 산정하였다. 5년 이동 자료구간을 적용하지 않은 원자료의 분석 결과, 낙동강 유역 평균값은 Table 3과 같으며, 유역 평균을 산정할 때 용수공급 실패 사상이 관측되지 않은 유역은 제외하였다.

Table 3에 나타낸 것과 같이 모든 시나리오에서 공통적으

로 P1에서 실패 사상 개수, 지속기간 및 부족량이 가장 적게 나타났다. 또한 P1에서 보다 P2와 P3에서 특성 값이 모두 증가하는 결과를 나타냈으며, S3, S4 및 S5에서는 P3 보다 P2에서 사상 개수, 지속기간 및 부족량이 가장 큰 것으로 산정되었다. 6개 시나리오와 3개 분석기간에서 공통적으로 지속기간 및 부족량이 가장 높은 유역은 W23 (형산강)이다. 각 기간에 따른 지속기간의 시나리오 평균은 300개월 중 192.50개월, 360개월 중 266.33개월, 348개월 중 247.83개월로 분석되었다. 또한 총 부족량의 평균은 P1, P2, P3에서 각각 2621.73, 3617.23, 3516.84백만 m<sup>3</sup>이다.

#### 4.2 JDMI 산정

주변확률분포의 적합 분포형을 선택하기 위해 Normal, Exponential, Gamma, Gumbel, GEV, Weibull, Generalized Pareto, Log-normal의 총 8개 확률분포함수를 검토하였다. 이를 위해 KS 검정을 수행했으며, 그 결과 대부분의 유역에서 신뢰도와 취약도가 Gamma 분포를 가장 잘 따르는 것으로 분석되었다. Archimedean 집단의 Clayton, Gumbel, Frank의 3개 코플라 함수 중 최우도법을 이용하여 최적의 함수를 선택

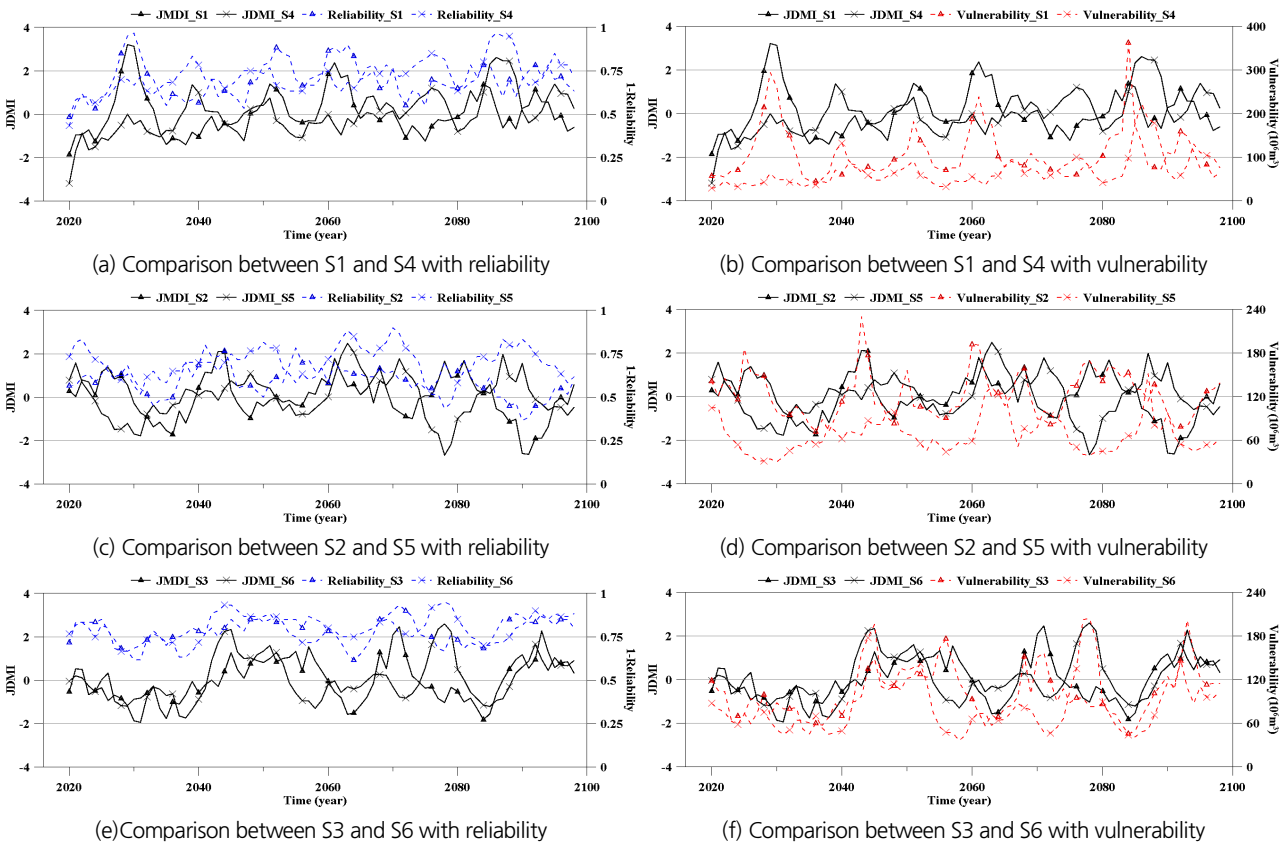


Fig. 5. Comparison between JDMI, reliability and vulnerability estimated with RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios for W23

한 결과, 전체 시나리오 대부분의 유역에서 Clayton 함수가 최적 분포형으로 가장 많이 선택되었다.

각 시나리오에 따라 산정된 JDMI 시계열과 이수안전도 평가지표의 비교 결과는 Fig. 5에 나타난 것과 같다. 비교된 한 쌍의 시나리오(S1, S4), (S2, S5), (S3, S6)는 같은 모형으로 산정된 RCP 4.5와 RCP 8.5를 비교하기 위해 함께 도시하였다. Fig. 5(a), (c), (e)는 신뢰도를 함께 나타냈으며, Fig. 5(b), (d), (f)에는 취약도 시계열을 포함하였다. JDMI와 신뢰도( $\alpha'$ ) 및 JDMI와 취약도( $\nu$ ) 사이의 Pearson 상관계수는 시나리오 평균 0.91과 0.89로 산정되어 JDMI는 매우 높은 수준으로 두 지표를 반영하고 있다는 것이 확인되었다. RCP 4.5와 RCP 8.5에 해당하는 시나리오는 일부 구간에 대하여 서로 상이한 전망을 나타내며, 따라서 각 시나리오마다 산정된 JDMI 또한 같은 유역임에도 불구하고 각 기간에서 다른 경향성을 나타냈다.

두 개 이상의 변수를 이용한 결합지수 산정에서 특히 고려해야 할 사항은 동일한 지수의 값에 대한 변수의 조합이 매우 다양하다는 점이다. 신뢰도, 회복도, 및 취약도를 기반으로 정의되는 결합지수에서도 같은 문제가 제기된다. 이수안전도 평가지표를 이용한 가뭄지수 중 가장 많이 사용되는 것은 DRI (Drought Risk Index)와 SI (Sustainable Index)이다(Loucks, 1997; Xu *et al.*, 1998). DRI와 SI는 이수안전도 평가지표의 가중평균합으로 산정되므로 시스템의 평가 결과가 평면적으로 제공된다. 반면 JDMI는 신뢰도와 취약도에 대한 결합확률 분포를 통해 산정되었으므로, 가뭄으로 인해 야기되는 시스템의 실패에 대한 발생 확률을 지속기간과 심도의 두 가지 측면에서 고려할 수 있다.

### 4.3 미래 용수공급 안전도 평가

미래 기간 동안 변화하는 용수공급 안전도를 평가하기 위해 총 3개 분석 구간에서 산정된 JDMI의 최댓값을 비교했으며, 그 결과는 Fig. 6 and Fig. 7에 나타난 것과 같다. JDMI의 범위에 따른 가뭄상태 구분은 SPI와 동일하며, Table 4에 나타내었다. Fig. 6 and Fig. 7에 따르면 JDMI에 의한 용수공급 위험도는 내륙 지역보다 해안 지역에서 더 높은 것으로 나타난다.

각 시나리오마다 분석기간 중 최대 극한 사상이 발생하는 기간이 다르게 분석된다. S1은 P1에서 2.00으로 유역의 평균값이 가장 높게 산정되었으며, S2, S4, S5는 P2에서 가장 높았으며 유역 평균은 각각 1.99, 1.77, 2.10이었다. 또한 S3와 S6는 P3에서 기간 최댓값의 유역 평균값이 1.99, 1.58로 분석되었다. 이 결과는 유역의 기간별 JDMI 평균값을 통해 산정된 결과와 동일하며, RCP 시나리오보다 GCM의 특성에 따른 결

과로 간주할 수 있다.

Fig. 6 and Fig. 7은 각각 RCP 4.5와 8.5 시나리오를 구분하여 나타낸 것으로, 두 그림을 비교하면 Fig. 6의 위험도 지도가 더 붉게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 각 시나리오마다 고위험 지역은 각각 다르게 산정되었으나, 공통적으로 RCP 4.5 (S1-3)에서는 W18 (남강댐), RCP 8.5 (S4-6)에서는 W23 (형산강) 및 W33 (낙동강남해)으로 나타났다. 전체 유역의 위험도를 비교할 때 RCP 4.5 시나리오에서 더 많은 'severe' 또는 'extreme' 상태가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히 P1 기간에서 두드러지는 차이점을 확인할 수 있다.

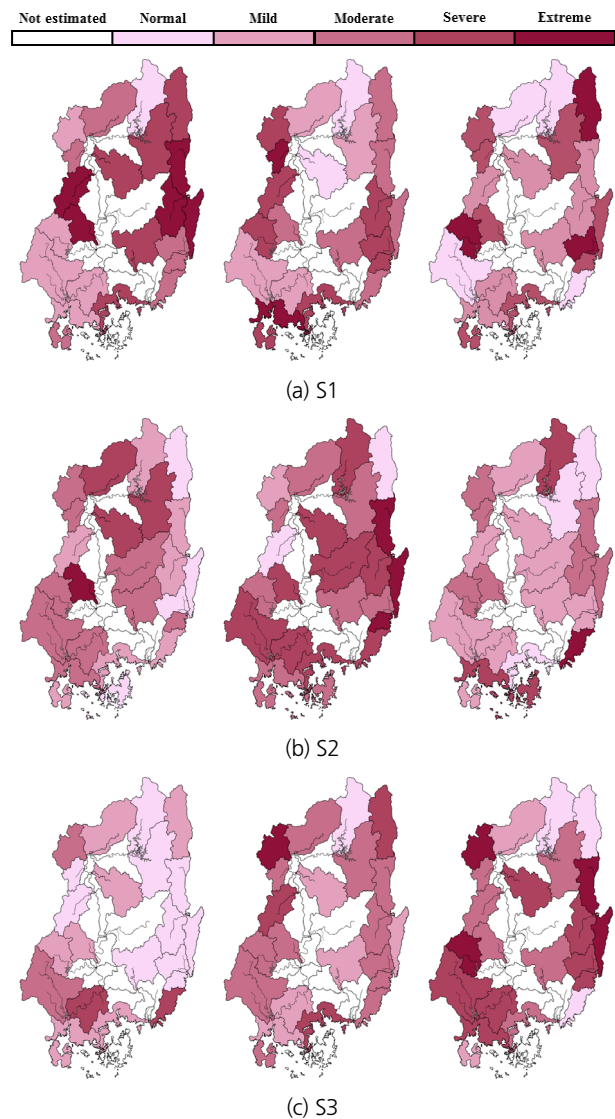
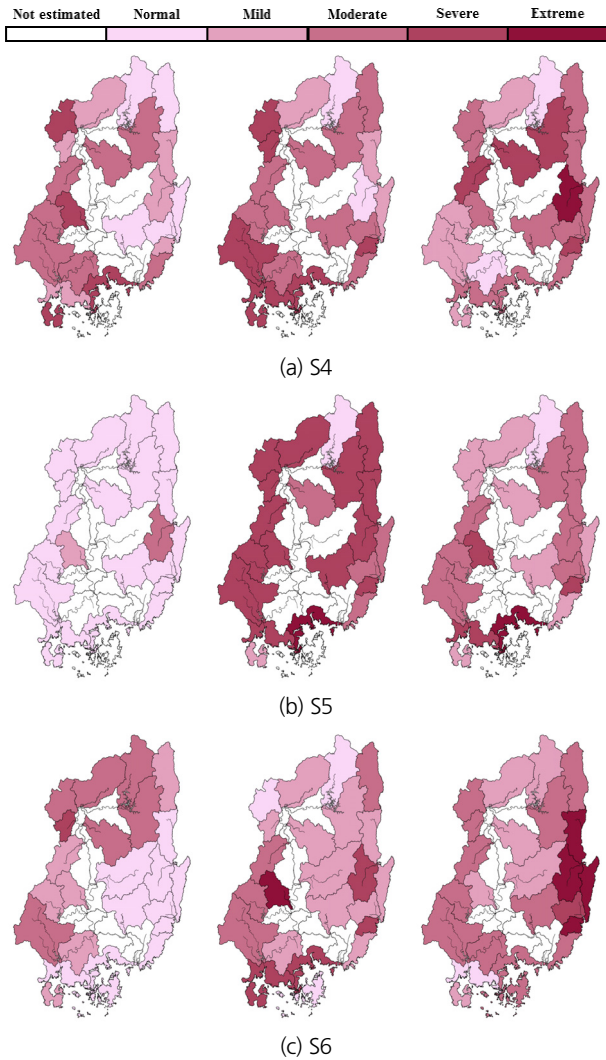


Fig. 6. Change of water supply failure risk of P1 (left), P2 (middle), and P3 (right) based on maximum JMDI estimated from RCP 4.5 scenario



**Fig. 7.** Change of water supply failure risk of P1 (left), P2 (middle), and P3 (right) based on maximum JMDI estimated from RCP 8.5 scenario

**Table 4.** Classification of risk based on JMDI

JMDI Range	State
<1.00	Normal
1.01-1.50	Mild
1.51-2.00	Moderate
2.01-2.50	Severe
>2.50	Extreme

이와 같이 기후변화 시나리오를 이용하여 미래의 용수공급 위험도를 산정한 결과는 다른 연구에서도 찾아볼 수 있다. Yu *et al.* (2018)에서는 과거자료와 기후변화 시나리오 자료를 병합하여 분석을 수행했으며, 미래기간은 period2 (2016-

2043), period3 (2044-2071), period4 (2072-2100)의 세 개의 구간으로 분류하였다. HMM\_DI (Hidden Markov Model based Drought Index)에 의해 분석된 낙동강 유역의 가뭄 위험도는 RCP 4.5 시나리오에서 RCP 8.5 시나리오 보다 높게 산정되었으며, 단기예측에서는 period4와 장기예측에서는 period3에서 위험도가 가장 높아 본 연구와 유사한 결과를 나타냈다.

반면, Lee *et al.* (2018)의 우리나라 전체 유역을 대상으로 HDRI (Hotspot Drought Risk Index)를 이용하여 위험도 분석을 수행한 결과에 따르면, 21세기 중기와 후기에 가뭄 위험도가 점차 감소하는 추세를 나타내어 본 연구와 상이한 결과를 도출하였다. 그러나 두 개의 시나리오를 비교한 결과에서 낙동강 유역은 RCP 4.5 시나리오가 RCP 8.5 시나리오 보다 가뭄 위험도가 높게 산정되었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 용수공급 실패 사상을 이용하여 신뢰도와 취약도를 정의하고, 코플라 함수와 Kendall 분포 함수를 이용하여 JMDI를 산정하였다. 분석기간을 21세기 초기(P1), 중기(P2) 및 후기(P3)로 구분하여 낙동강 유역에서 변화하는 용수공급 위험도를 분석하였다. 미래의 용수공급 실패 사상을 추출하기 위해 RCP 4.5와 8.5 시나리오에 대하여 각 3개의 GCM을 통해 산정된 기상자료가 적용되었다. 그 결과 각 시나리오와 GCM의 특성에 따라 각기 다른 결과가 도출되었다.

분석기간 중 가장 위험도가 높은 기간은 시나리오별로 각각 다르게 분석되었다. 시나리오 S1은 P1에서 가장 높은 위험도를 나타내고 평균 JMDI가 점차 감소하는 추세를 나타냈다. S2, S4 및 S5는 P1에서 가장 낮은 위험도를 나타냈으며, P2에서 최댓값을 갖고 P3에서 다소 감소하는 경향성을 보였다. S3과 S6은 전체 기간에 걸쳐 위험도가 지속적으로 증가하여 P3에서 가장 높은 위험도를 나타냈다.

또한 일반적으로 RCP 4.5 시나리오보다 RCP 8.5 시나리오에서 가뭄 위험도가 더 높은 것으로 알려져 있지만, 오히려 낙동강 유역은 RCP 4.5 시나리오에서 위험도가 더 높은 것으로 분석되었다. 용수공급 취약지역 또한 각 시나리오에서 다르게 산정되지만, 공통적으로 RCP 4.5에서는 남강댐으로 나타났다. RCP 8.5에서는 형산강과 낙동강남해 유역으로 분석되었다.

그러나 기후변화 시나리오는 불확실성을 포함하고 있다. 본 연구에서 제시한 결과는 K-WEAP 모형과 위험도 평가모



형을 거쳐 산정된 분석 결과이다. 따라서 원자료 보다 불확실성이 증가했을 것으로 예상되지만 정량화하여 나타내지 못하였다. 또한 총 6개의 기후변화 시나리오 자료를 이용하여 분석한 결과, 각각의 시나리오에서 서로 다른 평가 결과가 도출되었다. 따라서 미래의 용수공급 위험도는 가장 높은 위험도를 나타내는 시나리오와 가장 낮은 위험도를 나타내는 시나리오 사이의 일정 구간으로 범위를 좁힐 수 있으며, 이를 통해 미래의 불확실성을 정량화할 수 있을 것으로 기대된다.

JDMI는 다른 가뭄지수와 다르게 유역 또는 용수공급 시스템의 성능을 나타내는 지표를 사용함으로써 가뭄으로 인해 발생하는 용수공급 실패에 대한 위험도를 평가할 수 있다는 데에 의의가 있다. 각 유역의 사회·경제적 상황에 따라 특정 규모의 가뭄 사상이 반드시 용수의 부족을 야기하지 않는다. 따라서 가뭄 위험도를 평가할 때 유역의 이수안전도를 고려함으로써 보다 효율적인 가뭄관리가 수행될 수 있다.

다만 위험도 평가 기법의 개발은 단순히 방법론에서 그치는 것이 아니라 위험도 평가 결과가 가뭄 관리 및 대응 방안에 적용될 수 있도록 전체적인 프레임워크를 개발할 필요가 있다. JDMI를 통해 정의되는 각 가뭄 상태에 대한 신뢰도와 취약도를 역으로 산정하는 것이 가능하므로, JDMI를 활용하여 관리 기준을 마련하는 방법이 추가로 연구될 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 18AWMP-B083066-05).

## References

- AghaKouchak, A., Cheng, L., Mazdiyasi, O., and Farahmand, A. (2014). "Global warming and changes in risk of concurrent climate extremes: insights from the 2014 California drought." *Geophysical Research Letters*, Vol. 41, No. 24, pp. 847-852.
- Chang, J., Li, Y., Wang, Y., and Yuan, M. (2016). "Copula-based drought risk assessment combined with an integrated index in the Wei River Basin, China." *Journal of Hydrology*, Vol. 540, pp. 824-834.
- Choi, S.-J., Kim, J. H., and Lee, D.-R. (2012). "Decision of the water shortage mitigation policy using multi-criteria decision analysis." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 16, No.2, pp. 247-253.
- Goharian, E., Burian, S. J., and Karamouz, M. (2018). "Using joint probability distribution of reliability and vulnerability to develop a water system performance index." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 144, No. 2, pp. 04017081.
- Hao, Z., and AghaKouchak, A. (2013). "Multivariate standardized drought index: a parametric multi-index model." *Advances in Water Resources*, Vol. 57, pp. 12-18.
- Hashimoto, T., Stedinger, J. R., and Loucks, K. P. (1982). "Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water-resource system performance evaluation." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 14-20.
- Kao, S.-C., and Govindaraju, R. S. (2010). "A copula-based joint deficit index for drought." *Journal of Hydrology*, Vol. 380, No. 1-2, pp. 121-134.
- Kim, S. D., Ryu, J. S., Oh, K. R., and Jeong, S. M. (2012). "An application of copulas-based joint drought index for determining comprehensive drought conditions." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No.1, pp. 223-230.
- Lee, J.-H., Kwon, H.-H., Jang, H.-W., and Kim, T.-W. (2016). "Future changes in drought characteristics under extreme climate change over South Korea." *Advances in Meteorology*, Vol. 2016, pp. 1-19.
- Lee, J.-H., Park, S.-Y., Kim, J.-S., Sur, C., and Chen, J. (2018). "Extreme drought hotspot analysis for adaptation to a changing climate: assessment of applicability to the five major river basins of the Korean peninsula." *International Journal of Climatology*, Vol. 38, No. 10, pp. 4025-4032.
- Loucks, D. P. (1997). "Quantifying trends in system sustainability." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 42, No. 4, pp. 513 - 530.
- Maity, R., Sharma, A., Kumar, K. N., and Chanda, K. (2013). "Characterizing drought using reliability-resiliency-vulnerability concept." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 18, No. 7, pp. 859-869.
- Park, B.-S., Lee, J.-H., Kim, C.-J., and Jang, H.-W. (2013). "Projection of future drought of Korea based on probabilistic approach using multi-model and multi climate change scenarios." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 5, pp. 1871-1885.
- Salvadori, G., and De Michele, C. (2011). "Estimating strategies for multi-parameter multivariate extreme value copulas." *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, Vol. 7, No. 5, pp. 7563-7590.
- So, J. M., Sohn, K. H., and Bae, D. H. (2014). "Estimation and assessment of bivariate joint drought index based on copula functions." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 2, pp. 171-182.
- So, J. M., Sohn, K. H., and Bae, D. H. (2015). "Development and assessment of drought damage estimation technique using drought characteristic factors." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 2, pp. 93-101.
- Xu, K., Yang, D., Xu, X., and Lei, H. (2015). "Copula based drought frequency analysis considering the spatio-temporal variability in Southwest China." *Journal of Hydrology*, Vol. 527, pp. 630-640.
- Xu, Z., Jinno, K., Kawamura, A., Takesaki, S., and Ito, K. (1998). "Performance risk analysis for Fukuoka water supply system."

*Water Resources Management*, Vol. 12, No. 1, pp. 13-30.

- Yu, J., Park, Y. J., Kwon, H.-H., and Kim, T.-W. (2018). "Probabilistic assessment of meteorological drought over South Korea under RCP scenarios using a Hidden Markov Model." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 22, No. 1, pp. 365-372.

Zhang, Q., Xiao, M., Singh, V. P., and Chen, X. (2013). "Copula-based risk evaluation of hydrological droughts in the East River basin, China." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 27, No. 6, pp. 1397-1406.