J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 54, No. 4 (2021), pp. 241-254
doi: 10.3741/JKWRA.2021.54.4.241

pISSN 1226-6280
eISSN 2287-6138

Methodology for assessment and forecast of drought severity based on the water balance analysis

Jang, Ock-Jae[a] · Moon, Young-Il[b]* · Moon, Hyeon-Tae[c]

[a]Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, University of Seoul, Seoul, Korea
[b]Professor, Department of Civil Engineering, University of Seoul, Seoul, Korea
[c]Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, University of Seoul, Seoul, Korea

Paper number: 20-117
Received: 22 December 2020; Revised: 1 March 2021; Accepted: 1 March 2021

Abstract

Drought is a natural disaster which is hard to recognize its onset and termination and to estimate the damage from the events which occurred in the past and are expected in near future. While the drought indices or their frequencies are widely applied to explain the severity of each event in the existing studies, decision-makers and stakeholders (the public) may have trouble in understanding the results due to the unfamiliar expression with statistical values. In this study, therefore, the methodology for assessment and forecast of drought severity based on the amount of water shortage from the water balance analysis was be placed at the center of the discussion. Firstly, in order to improve the existing analysis for drought assessment adopted in the National Water Resources Plan, alternative methods have been suggested to estimate the amount of water demand in each sub-basin using the land use map, and in an aspect of water supply, reservoirs and underground water are included in the simulation of MODSIM-DSS. The relationship between drought severity from the simulated water shortage in the study area and the values of SPEIs (SPEI 6 = estimated for 6 months - winter and spring season, SPEI 3 = estimated for 3 months - summer season) has been analyzed by the Decision tree. Due to this achievement, at the end of the spring season, every year the forecast for the drought severity will be available with the quantitatively estimated water shortage, and it will be helpful to activate the drought mitigation measures before the disaster occurs.

Keywords: Drought severity, Water balance analysis, MODSIM-DSS, Decision tree

물수지 분석에 기반한 가뭄 심각도 평가 및 예측 방법

장옥재[a] · 문영일[b]* · 문현태[c]

[a]서울시립대학교 토목공학과 박사과정, [b]서울시립대학교 토목공학과 교수, [c]서울시립대학교 토목공학과 박사과정

요 지

가뭄은 발생시점과 종료시점을 명확하게 알기 어려우며, 과거에 발생한 피해도, 향후 예상되는 피해도 추산하기 어렵다는 특성을 가지는 자연재해이다. 그렇기 때문에 기존 연구에서는 가뭄지수나 가뭄의 빈도를 사용하여 매번 가뭄의 심각도를 표현하고 있으나 이는 의사결정자나 지역 주민들이 익숙하지 않은 통계적인 수치로 표현되기 때문에 이해하기 어려운 측면이 있다. 따라서 본 연구에서는 물수지 분석 결과로부터 정량적으로 산출된 물부족량을 바탕으로 가뭄 심각도를 평가하고, 예측하는 방안에 대해 중심적으로 기술하였다. 먼저 가뭄의 심각도 평가를 위해 기존 수자원장기종합계획에서 적용하는 물수지 분석 방법에서 중권역의 수요량을 산출하는 방법을 토지이용도를 적용하여 개선하였으며, 공급량 측면에서는 농업용 저수지와 지하수를 MODSIM-DSS모형에 포함하여 모의하는 것을 제시하였다. 다음으로 대상 유역에 적용하여 산출된 중권역별 물부족량과 겨울철~봄철의 6개월 동안의 SPEI, 그리고 여름철 3개월 동안의 SPEI의 상관관계를 Decision tree 방법을 적용하여 분석하였다. 이를 통해 매년 봄철이 끝날 때 가뭄 심각도를 물부족량과 함께 수치로 예측함으로써 가뭄 재해 발생 전에 대응 활동을 계획하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

핵심용어: 가뭄 심각도, 물수지 분석, MODSIM-DSS, 의사결정나무

***Corresponding Author.** Tel: +82-2-6490-5600
E-mail: ymoon@uos.ac.kr (Y.-I. Moon)

© 2021 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

1. 서 론

가뭄이란 장기간 동안 자연적인 강수량의 부족에 의해 파생되는 자연적 재해로, 그 형태(type), 강도(intensity), 지속기간(duration), 빈도(frequency), 공간적 범위(spatial extent)를 특정하기 어려운 특징을 가지고 있다(Quiring and Papakryiakou, 2003; Huang and Chou, 2008). 다른 자연재해와 비교하여 가뭄의 발생은 감지하기 더 어려운 측면이 있는데, 그 이유는 가뭄이란 재해가 천천히 발생한다는 점, 공용적으로 사용되는 정의가 부족하다는 점, 비구조적 피해를 동반한다는 점, 그리고 그 발생과 소멸을 결정하기 어렵다는 점과 같은 그 고유의 특성 때문이다(Hong and Wilhite, 2004; Mishra and Singh, 2010).

이러한 특성으로 인해 기존 연구에서는 가뭄의 발생을 결정함에 있어 임계수준(threshold) 개념을 적용하였는데 유황곡선(flow duration curve)에서 유량이나 특정 기간 동안의 강우량이 임계수준 이하로 되었을 때 가뭄사상이 시작되고, 임계수준 이상으로 회복되면 가뭄사상이 종료되는 것으로 판단하였다(Kim *et al*., 2020). 그래서 이 가뭄사상의 시작과 종료 시점의 간격을 가뭄의 지속기간이라 하며, 지속기간 동안 임계수준보다 적은 유량 또는 강우량의 합을 심도로 산정하는 것이다. 이러한 임계수준의 기준으로 Sung and Chung (2014)와 Razmkhah (2016)은 하천의 유황곡선에서 Q_{70}을 적용하였으며 Yu *et al*. (2016)은 월평균 강수량의 80%를 사용하여 가뭄사상을 추출하였을 때 강수 과부족량이 SPI (Standardized Precipitation Index)와 유사하게 나타난다는 것을 보여주었다. 이러한 가뭄사상을 정의하는 방식은 평년대비 하천의 유량이나 강우량이 어느 정도 부족하였는지 상대적인 개념에 기반을 하고 있다. 그렇기 때문에 만약 기후변화 등으로 극한의 가뭄사상이 몇 개 추가된다면 갱신되는 자료들로 인해 임계수준이 낮게 조정되어 과거 가뭄에 대한 평가가 변경될 수 있다는 단점이 있다.

NDIC (2016)에서는 가뭄 예·경보 발령을 기상가뭄은 6개월 누적 강우량을 기반으로 한 SPI 지수(SPI 6), 농업가뭄은 영농기 저수지의 저수율 또는 밭 토양의 유효수분율을 기준으로 하여 '주의-심함-매우심함' 단계로 발표하고 있다. 그러나 동일한 강수 부족이 발생하더라도 이에 대한 피해 양상은 유역 또는 행정구역별 광역 물 공급 체계나 저수지, 양수장 등과 같은 이수시설물의 규모 등에 따라 다르게 나타나고, 가뭄지수로 표현되는 가뭄의 심각도가 통계적인 개념에 기반하고 있기 때문에 이러한 예측결과를 받아들이는 의사결정자(decision-maker)나 지역 주민들(stakeholders)은 자신들이 직면할 가뭄의 심각성을 체감하기 어렵다는 문제가 있다. 그래서 Lee *et al*. (2012)는 갈수빈도분석이나 가뭄지수와 함께 경험적 지표(용수부족지표, 가뭄피해지수 등)를 복합하여 이수안전도 평가를 수행할 것을 제안하기도 하였다. 또한 Sim *et al*. (2013)은 실제적인 용수부족을 체감할 수 있는 방법으로 RDI (Realtime Drought Index)를 개발하였다. 그러나 이를 통해 산출되는 물부족량도 과거 SPI 3(3개월 누적 강우량을 기반으로 한 SPI지수)의 최솟값과 관측된 SPI 3을 비교하여 산출되는 수치이며 무엇보다 광역상수도, 저수지와 같은 인위적인 시설이 부족한 지역(자연용수공급지역)을 대상으로 하기 때문에 실제적인 물부족량을 기반으로 한 가뭄 심각도 평가는 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 물수지 분석을 기반으로 해당 유역에서 필요한 농업용수, 생활/공업용수, 하천유지용수를 공급하지 못하는 것을 가뭄으로 정의하고, 절대적인 수치로 표현되는 물부족량에 따라 가뭄의 심각도를 평가하는 방안을 제시하였다. 이를 통해 과거 가뭄 사상의 심각도는 이후에 발생되는 가뭄의 심각도와 상관없이 일정한 물부족량으로 항상 표현이 가능하다. 또한 물수지 분석에 광역상수도, 저수지, 지하수 등을 포함한 각 지역별 용수공급 체계를 모두 반영함으로써 실제로 물부족이 발생할 지역을 선별할 수 있게 되어 전문지식이 부족한 의사결정자나 대중들도 가뭄에 대한 심각도를 쉽게 이해할 수 있을 것으로 판단된다. 마지막으로 과거 강우상황과 물수지 분석으로부터 예측된 물부족량과의 상관관계를 분석함으로써 3개월 안에 발생할 가뭄의 심각성을 예측할 수 있는 방안을 제시하였다.

2. 가뭄 위험도 평가

물수지 분석은 대상 유역 및 하도구간에 대해 용도별 수요처에서 요구되는 수요와 공급 가능량을 특정 시간을 기준으로 비교 및 검토하여 수자원의 과부족을 평가하는 것(Choi *et al*., 2018)으로 중권역 또는 행정구역별 물부족량을 산출하여 가뭄 심각도를 평가하기 위해서는 먼저 물수지 분석 모형 구축이 필요하다. 본 연구에서는 수자원장기종합계획의 분석 방법 대비 개선방안을 설명하면서, 대상 유역에 적용한 결과를 함께 제시하였다.

2.1 대상 유역

본 연구의 대상 유역은 금강권역(Fig. 1)으로 유역면적은 17,924.8 km^{2}이며 하천의 총 길이는 36,142.3 km이다(WAMIS, 2020). 금강권역에는 4개의 대권역(금강, 삽교천, 금강서해, 만경·동진강)이 있으며 4개의 대권역은 21개 중권역으로 구

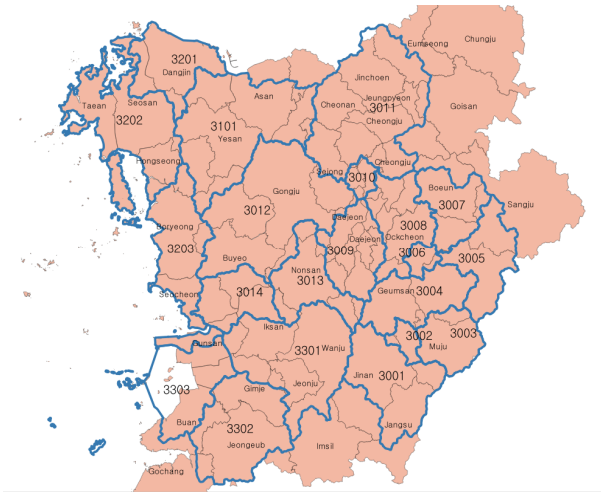


Fig. 1. Study area of the Geumgang-river

성된다. 금강권역에는 총 4개의 댐이 위치하고 있는데, 금강 대권역에 다목적댐인 용담댐(유효저수량 672.5 백만 m^3), 대청댐(유효저수량 790.0 백만 m^3)이 있고, 금강서해 중권역에 보령댐(유효저수량 108.7 백만 m^3), 새만금 중권역에 부안댐(유효저수량 35.6 백만 m^3)이 위치하고 있다. 농업용 저수지는 탑정, 예당, 대아 저수지 등을 포함하여 유효저수량이 5백만 m^3을 초과하는 대규모 저수지가 27개소 있으며 이보다 규모가 작은 2300여 개의 소규모 저수지가 농업용수를 공급하고 있다. 금강 본류의 최하류에는 금강하구둑, 삽교천에는 삽교천 방조제가 위치하여 공업용수와 농업용수를 공급하고 있으며 이외에 금강서해 대권역에는 대호호(유효저수량 46.5 백만 m^3), 간월호(유효저수량 50.7 백만 m^3), 보령호(유효저수량 17.3 백만 m^3), 석문호(유효저수량 9.1 백만 m^3) 등의 담수호에서 농업용수를 공급하고 있는 것으로 확인되었다. 행정구역으로 대전광역시와 세종특별자치시 전체가 포함되며 충청남도 15개, 전라북도 11개, 충청북도 8개, 그리고 경기도와 경상북도, 경상남도가 각각 1개의 시군이 금강권역에 포함된다. 용수 수요량 측면에서 대전, 청주, 전주, 천안·아산 등의 대도시에서 생활용수 수요량이 많으며, 군산국가산업단지, 아산산업단지, 서산·당진산업단지에서 공업용수 수요량이 많다. 농업용수 수요량은 충북, 충남 지역을 아우르는 넓은 호서평야 그리고, 만경강, 동진강 유역의 호남평야 지역에서 농작물의 생육시기에 따라 다르게 요구되고 있다.

2.2 기존 물수지 분석의 개선방안

우리나라 국가적인 차원으로 수행되는 물수지 분석인 수자원장기종합계획은 전국을 6개 권역 내 117개 중권역으로 구분하고, 하천유역의 미래 용수 수요(생활, 공업, 농업용수 및 하천유지용수)를 예측한 후 유역 내 공급 가능한 수자원(하천수, 댐 및 저수지, 지하수 등)과의 균형 분석을 수행하는 과정이다(MOLIT, 2016). 그러나 수요량 산정과 공급량 산정 측면에서 아래와 같은 문제점을 가지고 있으므로 실제 상황과 유사한 물수지 분석을 위해서 다음과 같은 개선방안의 적용이 필요하다고 판단된다.

2.2.1 수요량 산정의 문제점 및 개선방안

수자원장기종합계획의 수요량 산정 과정을 살펴보면 생활용수와 공업용수는 행정구역별로 예상되는 자연적 또는 유입/유출로 인한 인구의 증가, 산업단지의 면적 증감을 기준으로 산정되며 농업용수는 각 용수구역별로 예상되는 경지면적의 증감에 시기별로 작물에 필요한 물의 양을 고려하여 산정한다. 다음으로는 행정구역 단위로 산정된 용수의 수요량을 물수지 분석의 단위인 중권역의 용수 수요량으로 통합 또는 조정하는 것이 필요하다. 수자원장기종합계획에서는 생활, 공업, 농업용수의 수요가 같은 행정구역 내에서는 위치에 상관없이 수요처가 일정하게 분포할 것이라는 가정 하에 Eq. (1)과 같이 각 중권역에 필요한 용수 수요량을 중권역에 포함되는 행정구역별 유역면적비를 적용하여 일률적으로 할당하였다. 그러나 한 행정구역 내에서 도시계획에 의해 산지나 농업지대, 공업지대, 주거지역 등이 특정 지역에 집중되는 경향이 있기 때문에 중권역별 수요량 산정에 왜곡이 발생한다는 문제점이 있다.

$$D_i = \sum_{j=1}^{n} D_{\text{city j}} \times \frac{A^i_{\text{city j}}}{A_{\text{city j}}} \tag{1}$$

여기서 D_i는 중권역 i에서 필요한 전체 용수 수요량이고, $D_{\text{city j}}$는 행정구역 j에서 (생활, 공업, 농업)용수 수요량이며, $A_{\text{city j}}$는 행정구역 j의 전체 면적, $A^i_{\text{city j}}$는 행정구역 j에서 중권역 i에 포함되는 유역의 면적이다.

본 연구에서는 행정구역별로 각 중권역에 포함되는 생활용수, 공업용수, 농업용수 수요량을 실제 상황과 유사하게 산출하기 위해 통계청에서 조사한 2015년 행정구역별 인구총조사자료(읍면동 단위)와 GIS 행정구역 경계(읍면동), GIS 수자원단위지도, 그리고 각 시군 단위로 제공되는 GIS 토지이용현황도(1:25,000)를 적용하였다. 해당 자료들은 국가공간정보포털(NSDI, 2020)을 통해 획득하였다. 먼저 생활용수는 행정구역 경계(읍면동)자료와 수자원단위지도를 중첩하여 중권역별로 포함되는 읍면동을 확인하고, 여기에 인구총조사자료를 적용하여, 각 시군별로 중권역에 속하는 인구의 비

를 확인할 수 있었다. 다음으로 농업용수와 공업용수에 대해서는 토지이용현황도를 적용하였으며 제공되는 자료는 Table 1과 같다. 시군 단위로 제공되는 토지이용도에서 필요한 code의 데이터 추출이 필요하여, 농업용수 중 수리답(paddy field with irrigation facilities), 수리불안전답(paddy field without irrigation facilities)의 수요량 분배를 위해 해당 code의 데이터를 추출하였다. 관개전과 비관개전의 면적은 구분하여 제공하고 있지 않기 때문에 토지이용도에서 중분류(level 2)의 밭(farm field)으로 분류되는 곳의 면적을 추출하여 적용하였다. 다음으로 공업용수 수요량 분배를 위해 토지이용도에서 공업지역(industrial area) 면적을 추출하였다. GIS에서 선별된 데이터는 shp. 파일 형태로 각 중권역의 수자원단위지도와 중첩하여 행정구역별로 중권역에 포함되는 수리답, 수리불안전답, 밭(관개전/비관개전), 공업지역의 면적을 산정할 수 있었다. 이를 통해 기존 수자원장기종합계획에서 각 행정구역별 면적비로 수요량이 할당되던 것을 인구비와 해당 부분의 실제 면적비로 개선할 수 있었다. 이를 수식으로 나타내면 Eq. (2)와 같다.

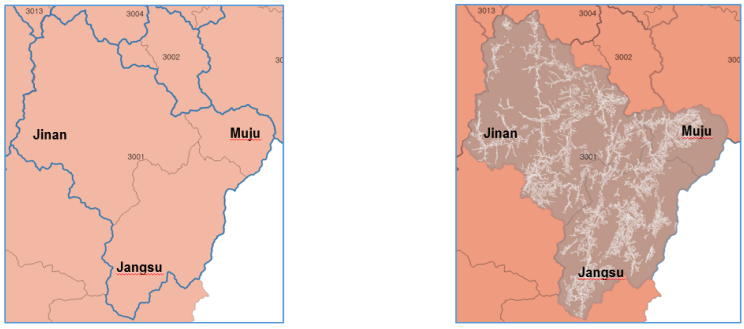
$$D_i = \sum_{j=1}^{n} D_{\text{city j}} \times \frac{W^i_{\text{city j}}}{W_{\text{city j}}} \tag{2}$$

여기서 D_i는 중권역 i에서 필요한 전체 용수 수요량이고, $D_{\text{city j}}$는 행정구역 j에서 (생활, 공업, 농업)용수 수요량이며, $W_{\text{city j}}$는 행정구역 j에서 특정 지역(공업지역, 수리답, 수리불안전답 등)의 전체 면적 또는 전체 인구의 수, $W^i_{\text{city j}}$는 행정구역 j에서 중권역 i에 포함되는 특정 지역(공업지역, 수리답, 수리불안전답 등)의 면적 또는 인구의 수이다.

Oh *et al.* (2019a)에서 기존 방법의 개선방안으로 생활용수는 행정구역별 인구비, 공업용수는 유역의 면적비, 농업용수는 농업용수구역과 유역 간 면적비를 적용한 사례는 있으나 본 연구에서는 농지의 종류(논, 밭)와 용수공급시스템 여부(수리답, 수리불안전답), 그리고 공업용수 수요처의 위치와

Table 1. Classification structure for land use map (GIS, 1:25,000)

Level 1	Level 2	Level 3	CODE
Agricultural area	Paddy field	Field with irrigation facilities	1110
		Field without irrigation facilities	1120
	Farm field	Orchard, dry field, etc.	1210, 1220
Forestry area	Grass and forest area		2110 to 2340
Urban residential area	Residential and commercial area		3110, 3120, 3130
	Transportation facility (road, railway, air-port/harbor, etc.)		3210 to 3240
	Industrial area		3310, 3320
	Public facility (school, church, administrative office, etc.)		3410 to 3440



(a) MOLIT(2016) (b) This Study

	Area Ratio
Muju	0.154
Jangsu	0.597
Jinan	0.651

	Residential	Industrial	Paddy field with irrigation	Paddy field without irrigation	Farm field with irrigation
Muju	0.219	0.372	0.470	0.313	0.155
Jangsu	0.653	0.682	0.586	0.705	0.784
Jinan	0.628	0.857	0.252	0.689	0.633

Fig. 2. Ratio for both studies to estimate the water demand in the sub-basin 3001

면적 정보를 포함하고 있는 토지이용도를 적용하여 유역별 용수 수요량을 할당했다는 것이 개선점이라 하겠다. 상기 Eqs.(1) and (2)에서 적용한 수요량 할당비의 차이를 중권역 3001에 적용한 결과는 Fig. 2와 같다.

기존의 수자원장기종합계획에서 적용한 방법과 금회 개선방안을 적용해 2025년에 각 행정구역별로 예상되는 기준 수요량에 적용하여 중권역별 용수 수요량을 산정한 결과를 Table 2를 통해 비교하였다. 여기에서는 비교의 편의상 수자원장기종합계획에서 산정한 방법과 ±10%차이까지는 '차이 없음'으로 판단하였으며, ±10%이상 차이가 나는 경우는 'moderately different (다소 차이)', ±20%이상 차이가 나는 경우를 'significantly different (상당한 차이)'로 판단하였다. 검토결과 대상 유역의 수요량이 유역 면적비를 적용했을 때와 비교하여 연간 약 84백만 m^3 증가하는 것으로 나타났으며 이는 유역의 경계부에 위치한 행정구역에서 수요량이 증가하였기 때문이다. 그리고 각 중권역별로 수요량을 비교하였을 때 6개 중권역에서 'moderately different'를 보였으며, 5개 중권역에서 'significantly different'를 나타내었다. 특히 3008(대청댐), 3011(미호천), 3201(대호방조제), 3302(동진강) 중권역의 수요량은 연간 50백만 m^3 차이가 발생하여, 이후의 물수지 분석에서 물부족 발생지역을 확인하는데 영향을 줄 수 있을 것으로 판단되었다.

Table 2. Comparison of amount of water demand in the study area (unit : 10^6 m^3/year)

Sub-basin	MOLIT (2016)	This Study	Difference	Comparison Result
3001	59.8	55.3	▽ 4.5 (7.5%)	-
3002	5.7	3.2	▽ 2.5 (43.9%)	Significantly
3003	22.1	15.0	▽ 7.1 (32.1%)	Significantly
3004	62.5	73.3	▲ 10.8 (17.3%)	Moderately
3005	69.3	72.1	▲ 2.8 (4.0%)	-
3006	15.4	21.6	▲ 6.2 (40.3%)	Significantly
3007	72.0	90.4	▲ 18.4 (25.6%)	Significantly
3008	153.1	80.1	▽ 73.0 (47.7%)	Significantly
3009	253.2	259.3	▲ 6.1 (2.4%)	-
3010	51.0	45.8	▽ 5.2 (10.2%)	Moderately
3011	613.9	688.8	▲ 74.9 (12.2%)	Moderately
3012	460.4	447.0	▽ 13.4 (2.9%)	-
3013	235.3	241.1	▲ 5.8 (2.5%)	-
3014	258.2	250.4	▽ 7.8 (3.0%)	-
3101	771.3	791.9	▲ 20.6 (2.7%)	-
3201	379.6	324.8	▽ 54.8 (14.4%)	Moderately
3202	464.0	483.7	▲ 19.7 (4.2%)	-
3203	342.6	377.5	▲ 34.9 (10.2%)	Moderately
3301	569.8	582.0	▲ 12.2 (2.1%)	-
3302	455.9	506.2	▲ 50.3 (11.0%)	Moderately
3303	450.8	440.2	▽ 10.6 (2.4%)	-
Total Sum	5,765.9	5,849.7	▲ 83.8 (1.5%)	Moderately (6) Significantly (5)

또한 산정방법에 따라 중권역 내에서 전체 수요량의 차이가 크게 발생하지 않는 지역도 물수지 분석에서 왜곡이 발생할 수 있는 요소가 있었는데 이를 중권역 3203(금강서해)을 대상으로 설명하면 Table 3과 같다. 중권역 3203의 연간 용수 수요량은 기존의 방법보다 개선된 방법을 적용하였을 때 '다소 증가'하는 것으로 나타났으나 행정구역별로 보면 군산시의 경우에는 기존대비 약 69%의 증가가 발생하였다. 이는 유역면적으로는 군산시 전체의 약 28%밖에 안 되는 면적이 중권역 3203에 위치하지만 해당 지역은 군산국가산업단지가 위치한 지역으로 군산시 전체 공업용지 중 약 92%가 해당 지역에 집중되어 있기 때문이다. 그래서 해당 중권역의 생활용수와 공업용수의 수요량은 약 71백만 m^3 늘었지만 농업용수 수요는 반대로 약 36백만 m^3 정도 감소하였다. 뒤에서 물수지 분석 결과로 다시 설명하겠지만 인구집중지역이나 대규모 공업단지의 생활용수와 공업용수는 대부분 해당 중권역 밖에 위치한 댐에서 광역상수도로 공급되고, 농업용수는 유역 내 유출량이나 저수지 등에서 공급된다는 점을 고려해 볼 때, 중권역 3203 내에서 공급해야 하는 유량은 오히려 감소하였으며, 군산시가 속해 있는 인근의 3014(금강하구언), 3301(만경강), 3303(새만금) 중권역의 공업용수 수요도 감소하게 되었다.

다음으로 기존 수자원장기종합계획에서는 중권역별로 각각 하나의 생공용수 수요처와 농업용수 수요처로 분석을 함으로써 행정구역별 물부족 산출이 어렵다는 문제점이 있다. 또한 물 공급량이 과다하다는 이유로 비관개전을 분석에서 제외하고 있으나 실제 비관개전에서도 유효강우를 제외하고, 부족한 수요량을 공급하는 것이 타당하다. 따라서 금회 분석에

Table 3. Comparison of amount of water demand in sub-basin 3203 (unit : 10^6 m^3/year)

Sub-basin	Administrative District	MOLIT (2016)	This Study	Difference
3203	Buyeo	18.1	9.6	▽ 8.5 (47.2%)
	Hongseong	23.1	23.3	▲ 0.5 (1.1%)
	Gunsan	86.0	145.3	▲ 59.3 (69.0%)
	Seocheon	77.6	60.1	▽ 17.6 (22.6%)
	Boryeong	137.8	139.2	▲ 1.4 (1.0%)
Total Sum		342.6	377.5	▲ 34.9 (10.2%)

서는 생활용수와 공업용수는 중권역 내에서 행정구역별로 모의를 수행하고, 농업용수는 중권역 단위로 모의하였다. 또한 중권역별로 비관개전 수요량을 추가하여 실제적인 물부족량을 산출하고자 하였다.

2.2.2 공급량 산정의 문제점 및 개선방안

공급량 산정 측면에서 수자원장기종합계획의 문제점은 먼저 지역공급원인 저수지와 지하수를 물수지 모형에서 같이 운영하지 않는다는 것이다. 즉, 모의 후에 농업용 저수지의 유효저수량과 암반지하수 이용량을 더함으로써 물부족이 발생하는 시기를 알 수 없고, 물부족량을 과소 추정할 수 있는 문제점을 내포하고 있다(K-water, 2008; Choi *et al*., 2018). 2006년의 수자원장기종합계획(MOCT, 2006)에서는 개별 중권역의 전체 물부족량에 지역공급원의 공급량을 더함으로써 물부족이 어떤 수요에서 발생하였는지 구분하기 어려운 문제가 있었다. 그러나 2016년 수자원장기종합계획(MOLIT, 2016)에서는 물부족량을 농업용수와 생활·공업용수로 구분하여 농업용수 부족량에는 저수지 유효저수량과 농업용 지하수 이용량만 가산하고, 생활·공업용수에는 생활용, 공업용 지하수 이용량만 물부족이 발생한 일자만큼 더함으로써 물부족량을 과소 추정하는 문제는 개선하였다. 그러나 여전히 연중 물부족이 발생하는 시기에 대해서는 알기 어렵기 때문에 본 연구에서는 각 행정구역별로 지하수(생활용, 공업용)를 공급할 수 있도록 모의하고, 각 중권역별로 저수지의 유효저수량 전체를 통합한 한 개의 농업용 저수지와 지하수 node를 분석에 포함하였다. 중권역별 농업용 저수지의 제원은 WAMIS (2020)을 통해 획득하였으며 지하수 이용량은 지하수조사연보(ME, 2019)를 통해 획득하였다. 지하수 사용량은 충적층 지하수는 사용한 만큼 하천수가 감소한다고 보고, 암반 지하수 사용량만 모의에 포함시켰다. K-water (2008)에서는 농업용 저수지를 유효저수량 5백만 m^3를 기준으로 대규모 저수지와 소규모 저수지로 구분하였다. 그래서 대규모 저수지는 중권역별로 독립적으로 운영하고, 소규모 저수지는 유효저수량을 모두 더하여 가상의 저수지를 운영하는 방안을 제시하였다. 그러나 저수지별로 용수를 공급하는 농지의 위치와 면적이 모의에 포함되지 않는 이상 저수지를 나누는 것은 의미가 없다고 판단되어 본 연구에서는 구분하지 않았다.

또한 기존의 수자원장기종합계획에서는 중권역별로 하나의 생활·공업용수 수요처를 운영함으로써 각 지자체의 지방상수도 취수원과 사용된 물이 정화되어 회귀되는 하수처리장의 위치를 고려하지 않고, 유역출구로 회귀한다고 모의한 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 지자체별 상수도 공급계통도와 하수처리장 제원을 WAMIS (2020)을 통해 획득하여 반영함으로써 중권역내 유수의 이동이나 중권역간 유수의 이동을 분석에 포함할 수 있었다.

2.3 물수지 분석 모형

현재 국내에서 주로 적용되는 물수지 분석 모형은 K-WEAP 모형과 MODSIM-DSS 모형이 있다. 먼저 K-WEAP (Korea-Water Evaluation And Planning System) 모형은 21세기 프론티어연구개발사업의 “수자원의 지속적 확보기술 개발사업”의 성과로 SEI-B (Stockholm Environment Institute-Boston Center)와 한국건설기술개발원이 공동 개발하였으며 현재 수자원장기종합계획에 적용되고 있다(Lee and Choi, 2011). 다음으로 MODSIM-DSS (MODified SIMyld-Decision Support System)모형은 미국 텍사스의 수자원 개발부가 개발했던 네트워크 모형인 SIMYLD를 미국 Colorado State University Labadie 교수가 수정하여 개발한 모형(K-water, 2007)으로 현재까지 Version 8.5.1까지 개발되었다. K-WEAP은 각 수요처의 용수공급 충족률을 최대로 하기 위해 수자원을 배분하는 반면 MODSIM-DSS은 공급처로부터 수요처까지 발생하는 비용이 최소가 되도록 최적화 한다는 차이가 있다. 그러나 Oh *et al*. (2019b)와 K-water (2008)에 따르면 MODSIM-DSS 모형에 수요처별 우선순위를 주어 K-WEAP과 비슷한 조건으로 모의하였을 때 두 모형의 계산결과에는 최대 5.3%의 오차를 보이며 매우 유사한 결과를 나타냈으나 그 분석 속도는 5~30배 정도 MODSIM-DSS이 빠른 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 다소 GUI가 떨어지지만 빠른 속도로 분석할 수 있는 MODSIM-DSS 모형을 적용하였다.

MODSIM-DSS 모형은 유역시스템의 물리적 특성을 모형에 유사하게 재현하기 쉽도록 background image 삽입을 지원하며 node (storage node, non-storage node, demand node, flowthru node)와 node들을 연결하는 link와 arc로 구성된다. 비록 node와 link만으로 유역의 물리적, 수문학적 특성을 똑같이 재현할 수 없지만, 사용자는 수자원 운영을 모형화하기 위해 이들을 가상적 혹은 개념적 요소로 상징화하여 사용할 수 있다. 네트워크 모의 시 완전 순환네트워크를 위해 사용자에 의해 정의된 node와 link는 모형 내에서 자동으로 생성되고 계산을 수행한다. MODSIM-DSS 모형은 계산시간(t = 1, 2, ⋯, T) 동안 모든 링크에서 발생하는 비용이 최소가 되도록 network flow를 최적화 시킨다. 이를 식으로 나타내면 Eq. (3)과 같다.

$$\text{minimize} \sum_{k \in A} c_k \cdot q_k \tag{3}$$

여기서, c_k는 link k에서의 비용, 가중치 또는 우선순위를 나타내며, q_k는 link k에서의 유량을 나타내고, A는 네트워크에 포함된 모든 링크를 나타낸다.

다음으로 node에서 제약조건은 Eqs. (4) and (5)과 같다.

$$\sum_{k \in O_i} q_k - \sum_{l \in I_i} q_l = b(\boldsymbol{q}) \text{ for all nodes } i \in N \tag{4}$$

$$l_{lt}(\boldsymbol{q}) \le q_l \le u_{lt}(\boldsymbol{q}) \text{ for all links } l \in A \tag{5}$$

여기서, O_i는 node i에서 시작되는 모든 유출 link, I_i는 node i에서 끝나는 모든 유입 link, b_{it}는 시간 t일 때 node i의 유입 또는 수요, l_{lt}와 u_{lt}는 시간 t일 때 link l에서의 하한값과 상한값을 의미한다. 여기서 Eq. (4)는 임의의 node에서 유입과 유출 총량은 같다는 제약조건으로 이는 물수지 방정식과 같고, Eq. (5)은 모든 link에서 흐름의 상한과 하한을 제한하는 물리적 조건이다.

상기 Eqs. (3) ~ (5)의 최적화 과정은 flow vector $\boldsymbol{q}$의 초기값을 가정하고, 이를 이용하여 종속변수인 b_{it}, l_{lt}, u_{lt}의 초기값을 계산한다. 다음으로 기존의 단순선형회귀법에 비해 매우 빠른 수렴속도를 보이는 lagrangian relaxation algorithm을 사용하여 상기 종속변수의 값이 수렴될 때까지 각 node와 link의 우선순위와 비용 등을 고려하여 반복 계산함으로써 최적의 수자원 배분에 도달할 수 있게 된다(Labadie and Larson, 2007).

2.4 물수지 분석 모형 구축

앞서 제시한 기존 물수지 분석 방법과 개선방법을 MODSIM-DSS모형에 각각 적용하여 분석 결과를 비교하기 위해 본 연구에서는 다음과 같이 4가지 Simulation CASE를 적용하였으며, 그 세부내용은 Table 4에 정리하였다.

(1) CASE 1: 기존 물수지 분석
기존 수자원장기종합계획(MOLIT, 2016)에서와 같이 중권역별로 통합된 생공용수 수요처와 농업용수 수요처를 구성하였다. 다만 농업용 저수지를 물수지 분석에 포함시킨 점은 기존 방법과 차이점이다. 지하수는 모의에 포함시키지 않고, 물수지 분석 이후에 농업용수와 생공용수 사용량만큼을 해당 물부족량에서 차감시켜주었기 때문에 연중 특정 시기 물부족량보다는 연간 물부족량만 산정이 가능하다.

(2) CASE 2: 개선안(수요량 산정 개선 - 중권역 내 수요량 산정 개선)
CASE 1 대비 생공용수 수요처는 행정구역 단위로 세분화하여 모의에 포함시키고, 중권역내에서 수요량을 Eq. (2)를 통해 산정하였다. 이를 통해 수요량 산정에서 중권역에 포함되는 행정구역별 인구비와 토지이용도를 반영한 결과를 확인 가능하다.

(3) CASE 3: 개선안(수요량 산정 개선 - 비관개전 수요 적용)
CASE 2의 개선방안에서 중권역별로 비관개전 수요처를 추가하여 증가하는 물부족량을 확인하였다.

(4) CASE 4: 개선안(공급량 산정 개선)
CASE 3 대비 각 행정구역별 상수도 계통도와 하수도처리장 현황을 반영하여 취수원과 회귀지점을 모의에 포함하였다. 또한 지하수를 물수지 분석에 포함시켜서 다른 분석 CASE들과 달리 연중 특정 시점에 발생하는 물부족량을 확인할 수 있었다.

Table 4. Water balance simulation cases in this study

		CASE 1(MOLIT, 2016)	CASE 2(alternative)	CASE 3(alternative)	CASE 4(alternative)
Water Demand	Demand estimation in the sub-basin	Eq. (1) adopted	Eq. (2) adopted	Eq. (2) adopted	Eq. (2) adopted
	Demand for household & industry	○ (one demand in each sub-basin)	○ (separate demands for each city)	○ (separate demands for each city)	○ (separate demands for each city)
	Demand for paddy field and farm field with irrigation	○	○	○	○
	Demand for farm field without irrigation	X	X	○	○
Water Supply	Underground water	X	X	X	○
	Location of intake facility and sewage treatment plant	X	X	X	○
Simulation Results		Annual water shortage	Annual water shortage	Annual water shortage	Water shortage in each simulation period

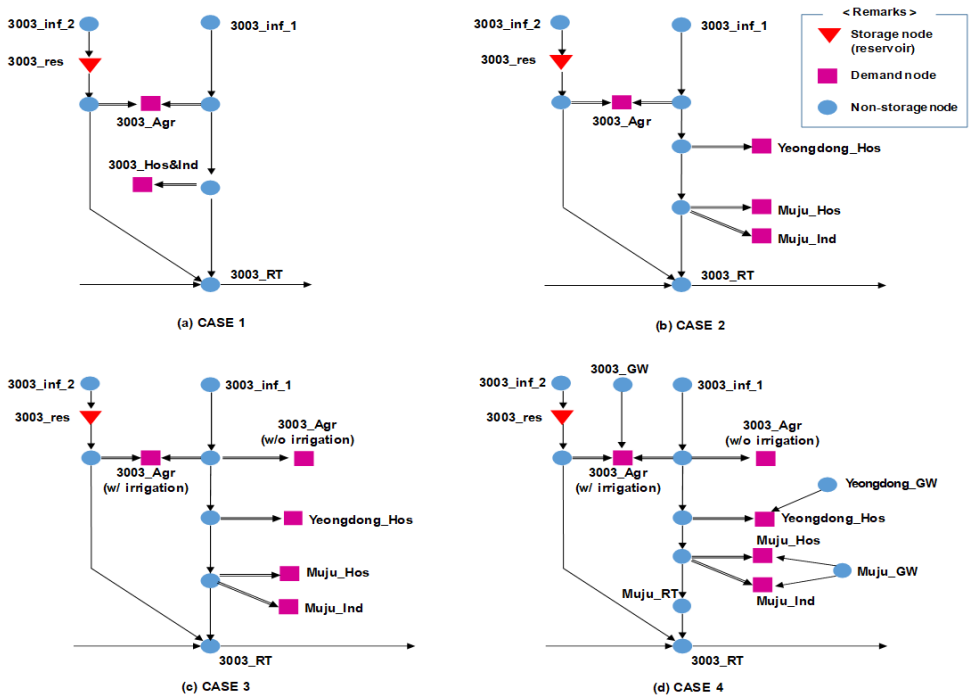


Fig. 3. Explanatory figures for each simulation case in this study

상기의 CASE를 각각 MODSIM-DSS모형에 적용하였을 때 모식도를 중권역 3003에 적용하면 Fig. 3과 같다. CASE 1에서는 중권역별로 하나의 생공용수 수요처와 농업용수 수요처가 포함되었지만, CASE 2에서는 각 행정구역별로 중권역에 포함되는 인구비와 토지이용도를 적용하여 산정한 수요량을 행정구역별(Yeongdong, Muju)로 모의에 포함시켰다. 특징적인 것은 영동군의 경우 전체 면적의 약 7%가 중권역 3003에 포함되지만 토지이용도를 확인했을 때 공업지역이 포함되지 않아 CASE 2에서 영동군의 공업용수 수요처는 포함되지 않았다. CASE 3에서는 중권역내 비관개전 수요량 - 3003_Agr (w/o irrigation)이 추가되었다. CASE 4에서는 영동군과 무주군의 취수원은 중권역 3003 내에 각각 위치하고 있는 것으로 반영하였으나 하수처리장 관련해서 무주군은 무주남대천 하류부에 위치한 하수처리장(Muju_RT)으로 회귀하는 것으로 모의한 반면, 영동군의 경우는 인근 중권역 3004(영동천)으로 회귀되는 것으로 모의하였다. 또한 지하수 공급을 위한 노드(Yeongdong_GW, Muju_GW, 3003_GW)를 반영하였다.

2.5 물수지 분석 결과

앞서 논의된 물수지 분석 모형을 대상 유역 전체에 적용하여 물부족량을 중권역별로 산출한 결과는 Table 5와 같다. 물수지 분석은 1966년부터 2015년까지 과거 중권역별 강우량을 강우-유출모형인 토양수분 저류구조 4단 탱크모형에 입력하여 산출된 유출량과 2025년 기준수요일 때 예상되는 수요량을 기반으로 수행되었다. 1966년부터 1967년까지는 분석모형의 안정화 단계로 보고, 1968년부터 물부족량을 산정하였으며, 전년도의 10월부터 금년도의 9월까지를 1년으로 보았다. Table 5의 물부족량은 금강권역에서 가장 심각한 가뭄이 발생한 1995년을 기준으로 작성하였다. 표에는 나타나지 않았지만 2번째로 가장 큰 가뭄이 발생한 2015년도 1995년 가뭄과 거의 비슷한 양상을 가지며 비슷한 수준의 물부족이 발생한 것을 알 수 있었다.

Table 5에서 먼저 CASE 1과 2를 비교하면, Table 2에서 나타난 것과 같이 CASE 2가 CASE 1과 비교하여 총 수요량이 연간 84백만 m^3 더 많음에도 CASE 2에서 물부족량은 12백만 m^3 감소하였다. 물부족이 발생할 것으로 예측된 중권역은 CASE 1에서는 중권역 3013, 3203, 3302이지만, CASE 2에서는 중권역 3011, 3203, 3302, 3303 이었다. 이 중, 물부족량이 증가한 중권역 3011과 3302는 Table 2에서 나타난 것과 같이 인구비와 토지이용도를 적용하였을 때 기존 방법 대비 첫 번째, 두 번째로 수요량이 많이 증가한 영향으로 판단된다. 또한 중권역 3203의 경우 기존 연구에서는 25백만 m^3의 물부족이 발생하는 것으로 모의되었으나 Table 3에서 설명한 것과 같이 대청댐과 금강하구둑 등에서 광역상수도로 공급되는 공업용수의 수요량은 늘었으나 유역 내에서 발생한 유수로 공급해야 하는 농업용수의 수요량은 감소하였기 때문에 기존 방법보다

Table 5. Water shortage in the worst year (1995) for each simulation case (unit : 10^6 m^3/year)

Sub-basin	CASE 1		CASE 2		CASE 3			CASE 4		
	Hos+Ins	Agr	Hos+Ins	Agr	Hos+Ins	Agr1	Agr2	Hos+Ins	Agr1	Agr2
3001 ~ 3010 3012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3011	-	-	2	-	3	-	10	-	-	2
3013	-	4	-	-	-	2	1	-	2	1
3014	-	-	-	-	-	-	2	-	-	2
3101	-	-	-	-	2	-	21	-	-	17
3201	-	-	-	-	-	-	9	-	-	9
3202	-	-	-	-	1	-	28	-	-	28
3203	-	25	-	2	1	-	10	-	-	9
3301		-	-	-	1	-	4	-	-	-
3302	-	41	-	53	-	50	17	-	50	16
3303	-	-	-	1	-	-	16	-	-	-
Sum	-	70	2	56	8	52	118	-	52	84

Remark) Hos+Ins = water shortage not to meet the household and industrial demand
Agr = water shortage not to meet the agricultural demand
Agr1 = water shortage not to meet the agricultural (with irrigation facilities) demand
Agr2 = water shortage not to meet the agricultural (without irrigation facilities) demand

물부족량이 훨씬 줄어든 것을 볼 수 있다. 이러한 결과들을 볼 때 개선된 방법이 기존 방법에 대비하여 각 중권역별 가뭄발생 여부와 물부족량 산정에 있어 유의미한 차이를 보여준다고 판단된다.

다음으로 CASE 2와 CASE 3을 비교하면 유역 전체에서 생활용수와 공업용수의 부족량이 2백만 m^3에서 8백만 m^3으로 증가하였으며, 농업용수의 부족량은 114백만 m^3 증가한 것을 알 수 있다. 이는 대상 유역 전체에 비관개전의 수요가 증가함에 따라 생공용수의 물부족량도 증가하게 되었기 때문이다.

마지막으로 CASE 4의 모의결과를 살펴보면, CASE 3과 비교하여 생공용수의 부족량은 없는 것으로 나타났으며, 수리안전답과 관개전에서 물부족량(Agr1)은 같지만, 수리불안전답과 비관개전에서의 물부족량(Agr2)의 물부족량은 34백만 m^3 감소한 것을 알 수 있다. 이는 다른 모의 CASE와 다르게 생활용수와 공업용수가 중권역 내에서 회귀가 발생함으로써 가용한 수자원량이 증가하였기 때문으로 판단된다. 특히 하천을 따라 행정구역들이 길게 배치되는 3011(미호천), 3301(만경강), 3303(새만금)의 물부족 감소량이 컸으며, 서해안을 따라 배치되어 있는 3201(대호방조제), 3202(부남방조제), 3203(금강서해) 등에서는 물부족 감소가 거의 없었다.

CASE 4의 모의결과를 좀 더 살펴보면, 중권역 3013(논산천)과 3302(동진강)에서는 수리안전답과 관개전에서 물부족이 발생하는 것으로 나타났다. 특히 중권역 3302의 농업용수 수요량은 481백만 m^3으로 중권역 3301(만경강)의 농업용수 수요량 405백만 m^3에 비해 약 20% 많지만, 농업용 저수지의 유효저수량은 중권역 3301의 40% 수준만 확보하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 중권역 3302는 지하수나 농업용 저수지를 추가적으로 확보할 필요가 있는 것으로 판단된다. 나머지 물부족은 대부분 중권역 3101, 3201, 3202, 3203에서 수리불안전답과 비관개전에서 발생하는 물부족으로 해당 지역에서 생공용수는 대부분 광역상수도로 공급되기 때문에 물부족이 발생하지 않지만, 가뭄 상황에서 수리불안전답과 비관개전에 가뭄 피해를 줄이기 위한 대책이 필요할 것으로 보인다.

2.6 가뭄 심각도 기준 설정 및 평가

NDIC (2016)의 '가뭄대응가이드북'에서는 가뭄의 예·경보 발령의 단계를 주의(cautious)-심함(severe)-매우심함(very severe)로 구분하고, 그 발령 기준을 Table 6과 같이 SPI 6를 적용하고 있다. 이를 Mckee *et al*. (1993)이 미국 Colorado의 여러 관측소를 분석하여 결정한 가뭄의 단계와 비교하면 NDIC (2016)의 가뭄 예·경보 발령 기준이 다소 높은 것을 알 수 있다. 특히 20년 빈도 이상 가뭄이 발생하기 전까지는 경보를 발령하지 않기 때문에 가뭄경보가 발령되었을 때에는 이미 상당한 가뭄이 발생한 후일 것으로 판단된다. 또한 가뭄에 취약한 지역(광역상수도 미공급, 농업용수 수요 대비 저수지 유효저수량 부족)과 가뭄에 덜 취약한 지역(광역상수도 공급, 농업용수 수요 대비 저수지 유효저수량 풍부)에 일률적으로 같은 기준을 적용하여 가뭄 예·경보가 발령된다는 문제점도 안

Table 6. Comparison of drought warning criteria between NDIC (2016) and Mckee *et al.* (1993)

SPI	NDIC (2016)	Mckee *et al*. (1993)	
	Category	Category	Severity of event
0 to -0.99	-	Mild dryness	1 in 3 years
-1.00 to -1.49	-	Moderate dryness	1 in 10 years
-1.50 to -1.99	Cautious	Severe dryness	1 in 20 years
over -2.00	Severe dryness	Extreme dryness	1 in 50 years
over -2.00 (lasting for 20 days)	Very severe dryness		

Table 7. Simulated water shortage under the Case 4 condition

Sub-basin ID	3201	3202	3203	3302
Number of dry years	48 years	48 years	48 years	21 years
Range of annual water shortage (10^6 m^3/year)	0.1 ~ 9.9	1.1 ~ 30.7	0.7 ~ 31.1	0 ~ 72.6

Table 8. Drought warning criteria depending on the annual water shortage

Category	Minor dryness	Moderate dryness	Severe dryness	Extreme dryness
Annual water shortage	0 to 5×10^6 m^3/year	5 to 10×10^6 m^3/year	10 to 30×10^6 m^3/year	over 30×10^6 m^3/year

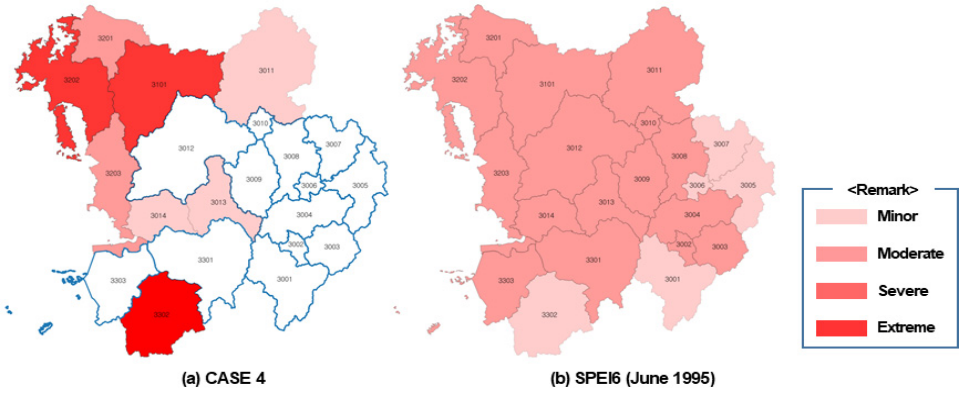


Fig. 4. Comparison of drought severity based on the water shortage and SPEI 6

고 있다. 따라서 본 연구에서는 앞에서 검토한 물수지 분석 결과를 적용하여 지역별로 가뭄의 심각도를 평가 할 수 있는 기준을 제시하였다.

먼저 대상 유역을 기준으로 수행한 물수지 분석 결과를 볼 때 금강본류에 위치한 중권역들은 모의 기간(1968 ~ 2015, 48년) 동안 물부족이 발생하지 않거나 드물게 물부족이 발생하였으며 물부족량도 크지 않은 것을 알 수 있었다. 대상 유역에서 가뭄에 취약한 지역은 Tables 5 and 7과 같이 금강 본류에서 떨어진 금강서해 권역과 만경·동진강 권역으로 중권역 3201(대호방조제), 3202(부남방조제), 3203(금강서해), 3302(동진강)에 대한 가뭄 심각도에 대해 상시적인 monitoring이 필요한 것으로 판단된다. 4개 중권역의 48개년 물부족량을 k-Nearest Neighbor 군집분석 알고리즘을 적용하여 각 군집별 중심값을 확인하고, Table 8과 같이 각 중권역별로 연간 물부족량을 기준으로 해당 년의 가뭄상태를 결정할 수 있는 기준을 마련하였다. 각 중권역별로 수요량 규모의 차이는 있으나 절대적인 물부족이 일정량 이상 발생하면 어느 지역이든 가뭄해결을 위해 행정역량을 집중하여야 하기 때문에 절대적인 물부족량을 적용하는 것이 적절하다고 판단된다.

여기서 결정된 가뭄 심각도 기준을 최대갈수년(1995년)에 대해 수행한 CASE 4의 결과에 적용하고, 이를 1995년 6월의 SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index; Vicente-Serrano *et al*., 2010) 값과 비교하면 Fig. 4와 같다. SPEI지수는 SPI지수보다 증발산량을 추가적으로 고려할 수 있어 가뭄의 상태를 실제 상황에 맞게 분석할 수 있을 것으로 판단되어 적용하였으며, 강수량 감소가 하천유량 감소, 저수

지 저류량 감소 등에 미치는 영향이 고려될 수 있도록 6개월 동안의 누적 강우량과 증발산량을 기반으로 산정된 SPEI 6를 적용하였다. Fig. 4(b)를 보면, 1995년 6월 금강의 대부분 중권역이 심한 가뭄(severe dryness) 상태로 예측되나, 물부족량을 기반으로 평가된 가뭄 심각도는 금강서해 권역에서 심한 가뭄(severe dryness), 동진강 중권역에서 매우 심한 가뭄(extreme dryness)이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 앞에서도 언급된 것과 같이 금강 대권역에 위치한 중권역(3001 ~ 3014)은 금강 인근에 위치하고 있어 최대갈수년에도 큰 가뭄이 예상되지 않지만, 하천 발달이 취약한 금강 서해권역이나 농업용수에 비해 저수지가 부족한 동진강에서는 비슷한 수준의 가뭄에서도 큰 가뭄 피해가 예상되었다. 이렇게 자연적인 강수의 부족에만 기반하여 가뭄의 심각도를 평가하는 것보다 각 지역별로 특정 기간의 물수요나 수자원 공급의 취약성까지 고려하여 물부족량을 기반으로 평가하는 것이 평상시나 가뭄 예상시 가뭄취약지역을 선별하여 구조적/비구조적 가뭄 대책을 수립하고, 이행하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

3. 가뭄 심각도 예측

앞서 제시한 물수지 분석 방법을 기반으로 한 가뭄 심각도 평가 방법은 과거 가뭄의 심각도 평가에는 적합하지만 미래의 가뭄을 예측할 때에는 향후에 발생할 강우를 최소 반순 단위 이상으로 추정하는 것이 어렵기 때문에 적용이 제한된다. 또한 실제 의사결정 과정에서는 복잡한 물수지 분석보다는 일단 접근이 용이한 가뭄지수들로부터 향후에 발생할 가뭄을 신속하게 예측하는 것이 필요할 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 앞에서 수행한 중권역별 가뭄 심각도 평가 결과와 해당 연도의 기상학적 가뭄지수의 상관관계를 분석하였다. 이를 통해 미래에도 특정시점에 과거와 유사한 수준의 기상학적 가뭄이 발생한다면 이를 기반으로 해당 지역에 어느 정도 수준의 물부족이 발생할 수 있는지 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

먼저, 앞서 대상 유역에서 수행한 물수지 분석 결과를 살펴보면, 모의기간 동안 가끔 2월에 봄 가뭄이 발생하기도 하지만 대부분의 물부족은 5월에서 9월까지 벼농사의 모내기와 작물의 생육에 필요한 농업용수를 공급하면서 발생하는 것을 알 수 있었다. 따라서 해당 영농기간 약 5개월 기간 동안 발생하는 물부족량을 Table 8의 기준을 적용하여 가뭄의 심각도로 변환한 값(minor, moderate, severe, extreme)이 본 연구에서 예측의 목적변수이다. 또한 금회 검토에서 해당 목적변수에 영향을 미치는 중요한 변수로 작년 12월부터 금년 5월까지 6개월 동안을 농업용수 공급을 위한 저수지 담수기간의 강수량, 그리고 금년 6월부터 8월까지 3개월 동안 농작물 생육 기간의 강수량을 선정하였다. 매년 5월 앞선 6개월 동안의 누계 강수량과 잠재증발산량, 그리고 8월에 앞선 3개월 동안의 누계 강수량과 잠재증발산량을 통해 SPEI 6와 SPEI 3를 산정하였으며, 2개의 가뭄지수를 목적변수에 대한 설명변수로 설정하였다. 목적변수와 설명변수의 상관관계를 파악하게 되면, 매년 5월에 앞선 6개월 동안의 기상학적 가뭄과 앞으로 3개월 동안 예상되는 기상학적 가뭄을 토대로 금년 영농기간에 예상되는 물부족량을 예측할 수 있게 된다. 즉, 5월말에 금년 9월말까지 발생할 수 있는 용수부족을 약 3 ~ 4개월 선행하여 예측할 수 있게 되는 것이다.

우리나라 가뭄정보포털(NDIP, 2020)에서는 과거 6개월의 가뭄지수로 현재의 가뭄상황을 판단하고, 향후 1개월, 2개월, 3개월의 생활 및 공업용수 가뭄, 농업용수 가뭄을 예측하고 있다. 또한 우리나라 기상청에서는 영국으로부터 도입한 대기와 해양-해빙 접합모델인 GloSea5의 장기예보를 활용하여 월(1개월) ~ 계절(3개월) 가뭄예측을 위한 기상학적 가뭄지수를 생산하고 있다(So *et al*., 2017). 따라서 본 연구에서 제시하는 과거 SPEI 6와 향후 3개월 동안의 SPEI 3 전망값을 기반으로 한 가뭄 심각도 예측은 현재 실무적으로 수행하고 있는 가뭄의 평가와 예측 수준에 기반하고 있으므로, 충분히 실제 의사결정 과정에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

중권역별로 설명변수(SPEI 6, SPEI 3)와 목적변수(영농기간 동안 예상되는 가뭄의 심각도)의 상관관계를 파악하기 위해 본 연구에서는 의사결정나무(decision tree) 분석 방법을 적용하였다. 의사결정나무 분석은 대표적인 Machine Learning의 지도학습(supervised learning)방법의 하나로 분류와 회귀분석 문제에 모두 적용이 가능하다. 의사결정나무 분석 방법은 신경망 구조분석(neural network analysis)과 달리 white box 구조로 자료들의 분류 구조를 이해하기 쉽고, 많은 설명 변수들 중에 어떤 변수가 영향력 있는 변수인지 구분하고, 해당 설명변수가 어느 정도 수준일 때 결과(목적변수)에 영향을 미치는지 쉽게 파악할 수 있다는 장점이 있다(Lee *et al*., 2020; Scikit-learn, 2020). 이러한 이점 때문에 국내에서도 필댐의 관리기준 설정과 기상상태가 서울시 대중교통 이용에 일으키는 변화에 적용된 사례가 있다(Lee *et al*., 2020; Won *et al*., 2019).

의사결정나무 분석은 Fig. 5와 같이 root node부터 시작하여, 각 가지의 끝마디(leaf node)에 도달할 때까지 internal node를 추가하며 형성된다. root node에는 설명변수 중 반응변수에 가장 영향력이 높은 변수가 위치하며, 해당 변수의 조건에 따라 하단에 이진가지와 node를 구성하게 된다. Leaf node에 도달할 때까지 root node와 internal node에서 분할변수와 분할점을 결정하는 분할기준(splitting rule), 분할을 멈

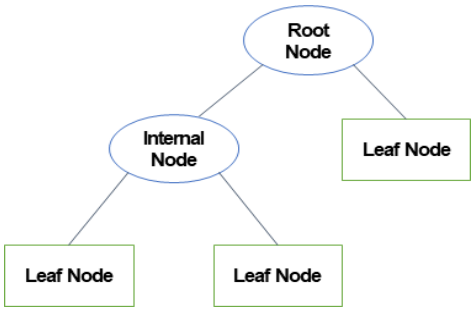


Fig. 5. Basic structure of the decision tree

추기 위한 정지기준(stopping rule), 가지 확장(prunning) 방법 등을 결정해야 한다. 본 연구에서는 Python 프로그래밍의 Scikit-learn 라이브러리에서 제공하는 CART (Classification and Regression Trees) 알고리즘을 적용하였다.

본 연구에서 의사결정나무 분석에 적용한 입력값은 다음과 같다.

- 대상유역 = 금강서해 권역과 동진·만경강 권역의 중권역(3201, 3202, 3203, 3302)
- 데이터수 = 각 중권역의 48개년치 자료(1968년~2015년)
- 설명변수 = 각 중권역의 SPEI 6(전년 12월~금년 5월), SPEI 3(금년 6월~8월)
- 반응변수 = 각 중권역의 매년 영농기간(5월~9월) 동안 발생 예상되는 가뭄의 심각도(minor, moderate, severe, extreme)

중권역 3203(금강서해), 3302(동진강)에 대해 의사결정나무분석을 적용하여 가뭄 심각도를 예측한 결과를 Table 9와 같이 정리하였다. 두 중권역 모두 심한 가뭄(severe dryness)을 일으킬 수 있는 경우는 SPEI 6(전년 12월부터 금년 5월까지)가 -0.4 미만인 경우이고, 다음 SPEI 3(금년 6월에서 8월까지)에 따라 약한 가뭄(minor dryness)에서 심한 가뭄(severe dryness)까지 발생할 수 있는 것을 알 수 있다. 또한 중권역 3302의 경우 SPEI가 -1.0이하인 경우에는 SPEI 3에 따라 극한 가뭄(extreme dryness)도 발생할 수 있는 것을 알 수 있다. 따라서 두 중권역 모두 어떤 해의 5월에 앞선 6개월 동안의 SPEI가 -0.4 미만인 경우에는 가뭄 예·경보를 발령하는 것이 필요한 것을 알 수 있으며 Table 6에 나타낸 우리나라 '가뭄대응가이드북'의 예·경보 기준은 지역적으로 이런 특성을 고려할 필요가 있는 것으로 판단된다. 또한 조건부 확률의 개념으로 SPEI 6가 특정값일 때 과거의 가뭄상황을 봤을 때 가장 많이 발생할 수 있는 상황을 예측함으로써 가뭄대응에도 도움이 될 것으로 판단된다. 예를 들면 중권역 3203에서 SPEI 6가 -0.4 미만일 때 다소 심한 가뭄(moderate dryness)이 발생할 확률이 가장 높기 때문에 이에 대한 대비를 가뭄 피해 발생 전에 수행할 필요가 있겠다.

앞에서 의사결정나무분석 방법을 토대로 금강서해 권역과 동진강 중권역에서 결정된 가뭄 심각도 예측을 물수지 분석에서 추정된 가뭄 심각도 평가 결과와 비교하여 그 정확도(accuracy)을 검증하였다. 정확도는 Eq. (6)과 같이 분석에 적용된 전체 데이터 수(48개) 대비 물수지 분석을 통해 결정된 가뭄 심각도와 의사결정나무분석을 통해 예측된 가뭄의 심각도가 일치하는 데이터의 수로 산정하였다.

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{Number of years whose drought severities are accurately forcasted}}{\text{Total number of simulation years}} \tag{6}$$

산정결과 중권역 3201이 87.5%의 정확도 가장 높게 나타났으며, 나머지 3개 중권역은 75 ~ 77%의 정확도를 나타냈다. 의사결정나무분석의 트리구조를 좀 더 복잡하게 만든다면 정

Table 9. Drought severity simulated by the decision tree depending on SPEI 6 and SPEI 3

Sub-basin 3203				Sub-basin 3302			
SPEI 6	SPEI 3	Simulated Drought	Number of Years	SPEI 6	SPEI 3	Simulated Drought	Number of Years
below-0.4	below-1.8	Severe	1	below-1.0	below-0.4	Extreme	6
	-1.8 to -0.6	Moderate	11		-0.4 to 1.1	Severe	2
	over -0.6	Minor	4		over 1.5	No drought	2
-0.4 to 1.7	below-0.3	Moderate	6	-1.0 to-0.4	below-0.4	Severe	1
	over -0.3	Minor	23		over -0.2	Minor	6
over 1.7	-	Minor	3	over -0.4	-	No drought	31
Sum			48	Sum			48

Remark) SPEI 6 = SPEI index for 6 months (Dec. to May), SPEI 3 = SPEI index for 3 months (July to Aug.)

확도를 훨씬 더 높일 수도 있으나 이는 오히려 과적합(over-fitting) 문제를 발생시켜서 새로운 데이터에 대해서는 오차를 더 늘릴 수 있을 것으로 판단하였다. 그래서 기본적으로 SPEI 지수가 낮은 경우에 가뭄 심각도를 증가시킬 수 있다는 가정을 적용하여 이를 만족시키지 못하는 가지(link)는 제거함으로써 80% 정도 수준의 정확도를 나타내게 되었다. 이 정도도 가뭄의 심각도를 예측하기에 나쁘지 않은 정확도로 판단되지만, 이를 좀 더 개선하기 위해서는 더 많은 강우 사상을 적용하여 Table 9의 가뭄의 심각도 예측 방법을 정교하게 만드는 것이 필요할 것으로 판단된다. 특히, 가뭄의 심각도를 올바르게 예측하지 못한 경우의 대부분이 SPEI 6와 SPEI 3 둘 중 하나는 심각한 가뭄 수준이고, 다른 하나는 충분한 강우가 발생한 경우로 둘 중 어느 지수가 가뭄에 대해 큰 가중치를 가지는지 향후 연구에서는 논의해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 정량적으로 산출된 물부족량에 기반하여 가뭄의 심각도를 평가하고 예측할 수 있는 방안을 대상 유역인 금강권역에 적용하여 설명하였다. 먼저 가뭄의 심각도 평가에 있어서 물부족량 산출의 신뢰성을 높이기 위해 기존 수자원장기종합계획에서 사용하고 있는 물수지 분석 방법의 문제점과 개선방안을 수요량 산정과 공급량 산정 측면으로 나누어 설명하였다.

수요량 산정 측면에서 가장 중요한 개선점은 행정구역별로 산출된 수요량을 각 중권역에 포함된 행정구역의 면적비를 곱하여 중권역의 수요량을 산출하던 것을 행정구역별로 중권역에 포함된 인구비와 농업용지 및 공업용지 면적을 GIS를 통해 산출하고 이를 적용한 것이다. 또한 비관개전의 수요량을 포함한 것도 중요한 개선점이라 할 수 있다. 공급량 산정 측면은 기존 방법에서는 지역공급원(농업용 저수지, 지하수)을 모의에 포함시키지 않고, 물부족 계산 후 저수지의 유효저수량, 지하수 사용량만큼 물부족량에서 감해주는 방법을 적용하였다. 개선방법을 적용하여 물부족량을 산정한 결과 기존 방법에는 물부족 지역으로 분류되었으나 개선방법을 적용하였을 때에는 수요량이 감소되어 물부족이 발생하지 않는 지역으로 분류되는 경우도 있었고, 군산지역은 공업단지가 특정 중권역에 집중되어 물부족량이 현격히 줄어든 것도 확인할 수 있었다.

다음으로 본 연구에서는 예상 물부족량을 기반으로 가뭄의 심각도를 minor-moderate-severe-extreme 수준으로 구분하여 평가할 수 있는 방안을 제시하였다. 가뭄의 심각도 예측에 있어서, 본 연구에서는 앞서 산정된 물부족량으로부터 산출된 가뭄의 심각도와 SPEI 6(전년 12월부터 금년 5월), 향후 예상되는 SPEI 3(금년 6월에서 8월)를 비교하여 가뭄의 심각도를 예측할 수 있는 방안을 제시하였다. 검토결과 국내 '가뭄대응가이드북'에서 제시하고 있는 것과 같이 SPI 6가 -1.5 이하일 때 가뭄 예·경보를 발령하는 것은 다소 낮은 기준으로 판단되며, 특정 지역의 경우 이보다 높은 SPEI -0.4일 때 예·경보 발령이 필요한 것으로 나타났다.

본 연구의 결과로 제시된 것과 같이 정량적인 물부족량을 기반으로 가뭄 심각도를 평가함으로써 강우량이 예년 대비 부족하더라도 광역 상수도가 연결되어 있고, 농업용 저수지의 유효저수량이 농업용수 수요량에 비해 충분한 지역(가뭄의 취약도가 낮은 지역)을 선별해내고, 실제로 가뭄에 대한 인프라가 취약한 지역에서 발생할 수 있는 가뭄의 심각도를 예측 할 수 있게 되었다. 그 가뭄의 예측이 기존 연구결과와 같이 일반인이 알기 어려운 통계적인 수치가 아니고, 물부족량이라는 수치로 표현되기 때문에 지역 거주민이나 의사결정자들이 추가 용수 수급계획이나 절수 캠페인을 수행할 때 도움이 될 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 SPI/SPEI뿐만 아니라 다양한 가뭄지수들을 대상으로 물부족량과의 상관관계를 확인하고, 해당 상관관계로부터 확률적인 물부족량을 산출해 냄으로써 가뭄위험도 지도를 작성하는 방안으로 보완될 필요가 있다.

References

Choi, S.J., Kang, S.K., Lee, D.R., and Kim, J.H. (2018). "A study on water supply and demand prospects for water resources planning." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 7, pp. 589-593.

Hong, W., and Wilhite, D.A. (2004). "An operational agricultural drought risk assessment model for Nebraska, USA." *Natural Hazards*, Vol. 33, pp. 1-21.

Huang, W.C., and Chou, C.C. (2008). "Risk-based drought early warning system in reservoir operation." *Advances in Water Resources*, Vol. 31, pp. 649-660.

Kim, T.W., Park, J.Y., and Shin, J.Y. (2020). "Determining proper threshold levels for hydrological drought analysis based on independent tests." *Journal of Korea Water Resource Associate*, Vol. 53, No. 3, pp. 193-200.

K-water (2007). *K-MODSIM manual Ver 1.1*. pp. 1-40.

K-water (2008). *A study on the basic plan for water management*. Publication No. 11-B500001-000091-01, pp. 233-287.

Labadie, J.W., and Larson, R. (2007). *MODSIM 8.1: River basin management decision support system. User manual and documen-*

tation. pp. 19-20.

Lee, D.R., and Choi, S.J. (2011). "Introduction of integrated water resources assessment planning Model-K-WEAP (Korea-water evaluation and planning system)." *Water for Future*, Vol. 44, No. 9, pp. 117-123.

Lee, J.E., Lee, K.M., and Cha, G.W. (2012). "Idea on the improvement of water yield evaluation methodology." *Water for Future*, Vol. 45, No. 12, pp. 51-57.

Lee, J.E., Yoon, S.M., Im, E.S., and Kang, G.C. (2020). "A study on management criteria on seepage for fill dams considering rainfall effect." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 36, No. 5, pp. 5-16.

Mckee, T.B., Doesken, N.J., and John, K. (1993). "The relationship of drought frequency and duration of time scales." *8th Conference on Applied Climatology*, Anaheim, CA, U.S., pp. 179-184.

Ministry of Construction and Transportation (MOCT) (2006). *National water resources plan (2006 ~ 2020)*. Publication No. 11-B50 0001-000083-13, pp. 438-440.

Ministry of Environment (ME) (2019). *2019 Groundwater annual report*. Publication No. 11-1480000-001551-10, pp. 223-330.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2016). *National water resources plan (2001 ~ 2020) (3rd rev.)*. Publication No. 11-1613000-001716-13, pp. 198-233.

Mishra, A.K., and Singh, V.P. (2010). "A review of drought concepts." *Journal of Hydrology*, Vol. 391, pp. 202-216.

National Drought Information-Analysis Center (NDIC) (2016). *Response guidebook for drought disaster*. p. 117.

National Drought Information Portal (NDIP) (2020). Korea, accessed 14 November 2020, <http://www.drought.go.kr>.

National Spatial Data Infrastructure (NSDI) (2020). Korea, accessed 14 August 2020, <http://www.nsdi.go.kr>.

Oh, J.H., Kim, Y.S., Ryu, K.S., and Bae, Y.D. (2019a). "Comparison and discussion of water supply and demand forecasts considering spatial resolution in the Han-river basin." *Journal of Korea Water Resource Associate*, Vol. 52, No. 7, pp. 505-514.

Oh, J.H., Kim, Y.S., Ryu, K.S., and Jo, Y.S. (2019b). "Comparison and discussion of MODSM and K-WEAP model considering water supply priority." *Journal of Korea Water Resource Associate*, Vol. 52, No. 7, pp. 463-473.

Quiring, A.M., and Papakryiakou, T.N. (2003). "An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 118, pp. 49-62.

Razmkhah, H. (2016). "Preparing stream flow drought severity duration-frequency curves using threshold level method." *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 9, No. 7, p. 513.

Scikit-learn (2020). Decision Trees, accessed 14 November 2020, <https://scikit-learn.org/stable/modules/tree.html>.

Sim, H.J., Ryu, J.S., Ahn, J., Kim, J., and Kim, S. (2013). "Real time drought index for determining drought conditions in natural water supply system communities." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 5, pp. 363-373.

So, J.M., Oh, T.S., and Bae, D.H. (2017). "Estimation and assessment of long-term drought outlook information using the long-term forecasting data." *Journal of Korea Water Resource Associate*, Vol. 50, No. 10, pp. 691-701.

Sung, J.H., and Chung, E.S. (2014). "Application of streamflow drought index using threshold level method." *Journal of Korea Water Resource Associate*, Vol. 47, No. 5, pp. 491-500.

Vicente-Serrano, S.M., Begueria, S., and Lopez-Moreno, J.I. (2010). "A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index." *Journal of Climate*, Vol. 23, pp. 1696-1718.

Water Resources Management Information System (WAMIS) (2020). Korea, accessed 22 October 2020, <http://www.wamis.go.kr>.

Won, M.S., Cheon, S.H., Shin, S.I., and Lee, S.Y. (2019). "Analysis of public transport ridership during a heavy snowfall in Seoul." *Journal of the Korean Society of Civil Engineerings*, Vol. 39, No. 6, pp. 859-867.

Yu, J.S., Yoo, J.Y., Lee, J.H., and Kim, T.W. (2016). "Estimation of drought risk through the bivariate drought frequency analysis using copula functions." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 49, No. 3, pp. 217-225.