소규모 행정구역의 일단위 농업가뭄 평가를 위한 농업용수 수급 가뭄지수 개발

Development of the Agricultural Water Demand and Supply Drought Index (AWDSDI) in Evaluating Daily Agricultural Drought in Small Administrative Districts

이상권* · 오국열** · 정상만*** · 정태성****

Lee, Sangkwon*, Oh, Kukryul**, Jeong, Sangman***, and Cheong, Tae Sung****

Abstract

Drought is caused by a long period of lack of rainfall and water resources, and has a great impact on the life and ecosystem of both humans and animals. It is particularly important for the agricultural sector, which is closely related to food security. Global warming, urbanization, and industrialization have led to a gradually increasing demand for agricultural water. In response, Korea has steadily developed its agricultural water sources to reduce rising damage to the agricultural sector due to climate change. The severity of drought is evaluated by using meteorological, agricultural, hydrological, and socioeconomic drought indexes. The agricultural drought index is evaluated using soil moisture and crop dryness, and the hydrological drought index is evaluated based on water shortage by comparing demands with water resources available for supply, such as rivers and groundwater, reservoirs and dams. However, these methods were found to over- or under-estimate the relatively low sensitivity of agricultural water as they assess the shortage of water for life, industry, and agriculture. Therefore, in this study, we developed the Agricultural Water Demand and Supply Drought Index (AWDSDI), which evaluates agricultural drought by analyzing water supply systems such as agricultural reservoirs, pumping stations and drainage, groundwater systems, and demands for agricultural water. In order to review the applicability of the developed drought index, AWDSDI was applied to 32 Eps and Myuns in three cities, including Jincheongun, Changnyeonggun, and Jangseonggun in the period June-August 2017, when drought damage was significant. It was found that AWDSDI reproduced the daily agricultural drought well in small administrative districts such as Eps and Myuns. In addition, in order to verify the developed drought index, the evaluation results of AWDSDI, the previously developed agricultural drought index and the hydrological drought index were compared together. The comparison found that the AWDSDI reproduced the drought period and drought depth in 32 Eps and Myuns in three cities better than previously developed drought indices.

Key words : Drought Index, Agricultural Resources, Global Warming, Food Security, Agricultural Water Demand and Supply Drought Index

요 지

가뭄은 장기간의 강수량 부족과 수자원 부족으로 인해 발생하는 것으로서 인간과 동물 모두의 생명과 생태계에 큰 영향을 미친다. 특히 농업분야는 식량안보와도 밀접한 관련성이 있어 그 중요성이 크다고 할 수 있다. 전 지구적으로 지구온난화, 도시화 및 산업화로 인해 농업용수 수요는 꾸준히 증가하고 있으며, 한국 또한 기후변화로 인해 증가추세에 있는 농업분야 피해경감을 위해 농업용수 공급원을 꾸준히 개발해오고 있다. 가뭄은 기상학적, 농업, 수문학적, 사회경제학적 가뭄지수를 이용하여 그 심각정도를 평가하는데, 농업가뭄지수는 토양수분과 농작물 마름 정도를 이용하여 가뭄을 평가하고 수문학적 가뭄지수는 저수지, 댐, 하천, 지하수 등 공급 가능한 수자원과 수요를 비교하여 용수 부족량으로 가뭄을 평가하는 방법이다. 그러나 이들 방법들은 생활, 공업, 농업 전체용수의 부족량을 평가함에 따라 상대적으로 민감도가 낮은 농업용수를 과대 혹은 과소평가하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 농업용저수지, 관개 및 배수, 지하수 시스템과 같은 용수 공급 시스템과 농업용수 수요량을 분석하여 농업가뭄을 평가하는 농업용수 수급 가뭄지수(Agricultural Water Demand and Supply Drought Index, AWDSDI)를 개발하였다. 개발된 가뭄지수의 적용성을 검토하기 위하여 과거 기록을 토대로 가뭄피해가 컸던 2017년 6~8월에 대해 진천군, 창녕군, 장성군 등 3개 군의 32개 읍·면에 AWDSDI를 적용하고 농업가뭄을 평가하였다. 적용성 검토결과 AWDSDI는 읍·면과 같은 소규모 행정구역의 일단위 농업가뭄을 잘 재현하는 것으로 나타났다. 더불어 개발된 가뭄지수를 검증하기 위하여 AWDSDI와 기존에 개발된 농업가뭄지수 그리고 수문학적 가뭄지수의 평가결과를 함께 비교하였다. 비교 결과 AWDSDI는 기존에 개발된 가뭄지수들보다 3개군 32개 읍·면의 가뭄기간 및 가뭄심도를 잘 재현하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 가뭄지수, 농업용수, 지구온난화, 식량안보, 농업용수 수급 가뭄지수

*정회원, 국립재난안전연구원 원장(E-mail: kwon2765@korea.kr)
Member, Director General, National Disaster Management Institute

**정회원, (주)에스 상무(E-mail: kroh5910@hanmail.net)

Member, Director, Urban Safety

***정회원, 한국재난안전기술원 원장(E-mail: smjeong@kids.re.kr)

Member, President, Korea Institute of Disaster & Safety

****교신저자, 정회원, 국립재난안전연구원 연구관(Tel: +82-52-928-8180, Fax: +82-52-928-8181, E-mail: bangjaeman@korea.kr)

Corresponding Author, Member, Senior Research Officer, National Disaster Management Institute

1. 서 론

가뭄은 20세기에 관측된 가장 심각한 자연재해 중 하나로 선정될 정도로 물 관련 재해 중에서 홍수와 함께 우리의 생활에 미치는 영향이 가장 큰 자연재해라 할 수 있으며, 그 피해는 급증할 것으로 전망되고 있다(Trenberth et al., 2004). 역사적으로 보면 가뭄은 인류문명의 지속가능한 발전에 큰 위협이 되고 있다. 특히, 가뭄은 1984년 나이지리아의 GDP를 4~6% 하락시켰고 짐바브웨 및 잠비아의 GDP를 8~9% 하락 사례에서도 알 수 있듯이 개발도상국의 경제발전에도 더 큰 위협이 되고 있다(Lee, 2021). 또한, 세계기상기구(World Meteorological Organization, 2006)는 100개국 이상에서 약 10억 명이 가뭄으로 인한 위협에 직면해 있다고 보고하였다.

IPCC(기후변화에 관한 정부간 협의체)는 2050년 한반도 연평균 기온이 약 2 °C~4 °C 상승하여 21세기 후반에 아열대로 변할 것으로 전망하고 있다. 기후변화와 맞물려 우리나라의 가뭄 발생빈도 또한 1904년~2000년 35회(0.36회/년)에서 2001년~2015년 10회(0.67회/년)로 증가추세에 있다(Lee, 2021). 더불어 강수가 지역별로 편중되어 발생함에 따라 충청, 전라, 경기, 강원, 제주 등에서는 가뭄지역이 꾸준히 확대되고 있는 실정이다. 2018년의 관계부처 합동 가뭄종합대책 조사 결과에 따르면 이들 지역에서는 농업가뭄의 피해가 특히 큰 것으로 조사되었는데, 2016년에는 충남, 전북, 전남, 경북, 제주지역을 중심으로 39,800 hr (논 물마름 10,200 hr, 밭 작물시들음 29,600 hr)의 농업가뭄 피해가 발생하였으며, 2017년에는 경기, 강원, 충청, 전라, 경상 지역을 중심으로 9,549 ha의 피해가 발생하는 등 농업가뭄 피해가 극심했던 것으로 나타났다.

가뭄은 강수의 부족에서 시작하여 농업 가뭄, 수문학적 가뭄 등의 가뭄으로 이어지며, 그 속도와 심도는 기후 및 지역 특성에 따라 다르게 나타난다. 지금까지 농업가뭄 평가를 위해 개발된 대표적인 가뭄지수는 토양수분이나 작물수분을 이용하여 가뭄을 평가하는 농업 가뭄지수(Palmer, 1968; Hollinger et al., 1993; Heathcote, 1998; Kendy et al., 2003; Wu and Wilhite, 2004; Wu et al., 2004; Tadesse et al., 2005; Kim et al., 2006; Tsakiris et al., 2006; Ahn, 2008; Brown et al., 2008; Sheffield and Wood, 2008; Shukla and Wood, 2008; Jaranilla-Sanchez et al., 2011; Jung and Chang, 2012; Hogg et al., 2013; Nam et al., 2014; Nam et al., 2015; Tadesse et al., 2015) 그리고 하천유량, 저수지나 댐 저류량, 지하수 등을 이용하여 가뭄을 평가하는 수문학적 가뭄지수(Dracup et al., 1980; Sen, 1980; Zelenhasic and Salvai, 1987; Chang and Stenson, 1990; Frick et al., 1990; Chang, 1991; Clausen and Pearson, 1995; Kwon et al., 2006; Kwon and Kim, 2007; Jo, 2008; Karamouz et al., 2009; Dogan et al., 2012; Assani, 2016; Jeong et al., 2017; Jo,

2017; Yoo et al., 2017) 등으로 구분할 수 있다.

가뭄에 영향을 미치는 용수는 크게 생활용수, 공업용수, 농업용수로 구분할 수 있는데, 농업용수는 우리나라 수자원 총 이용량의 약 48%를 차지하고 있어 가뭄이 발생하면 농업 및 농촌지역부터 피해가 나타날 수밖에 없는 실정이다. 더불어 농업분야는 식량안보와도 밀접하게 연관되어 있어 가뭄 피해저감에 있어 그 중요성이 매우 크다고 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 기존에 개발된 농업관련 수문학적 가뭄 지수들은 용수의 공급량 측면만을 고려하거나 수급을 고려한다고 하더라도 생활·공업·농업 전체용수에 대한 용수 수급을 고려함에 따라 농업가뭄이 과대평가되고 있었다(Lee, 2021). 더불어 공간적으로는 유역이나 국가 단위, 시간적으로는 주, 월단위 가뭄지수 정보를 제공하는 등 실질적인 농업용수의 부족량을 정량적으로 제시하는 가뭄지수는 현재까지 개발되지 않고 있어 본 연구는 기존의 연구와 차별화된 농업용수 수급을 고려한 새로운 농업용수 가뭄지수를 개발하고자 한다.

미국의 국립가뭄경감센터(NDMC) 분석에 따르면, 사전 예방이 사후복구에 비해 4배 가량 경제적이라고 언급하고 있지만, 지금까지는 가뭄피해저감대책이 필요함을 확신시킬 만큼의 가뭄 평가방법이 개발되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 중앙정부나 지자체에서 가뭄 피해저감을 위한 대책수립이나 가뭄 위험지역 지정 등에 직접적으로 활용이 가능하도록 읍·면·동 단위의 소규모 지역에 가뭄 지수를 적용할 수 있고 실질적인 용수부족 정도를 신속하게 파악할 수 있도록 일단위로 농업용수 수급을 분석하는 가뭄 지수를 개발하고자 한다. 더불어 읍·면·동 지역에서 수집 가능한 기초자료를 이용하여 수요량 및 공급량 자료를 구축하고 가뭄 정도를 파악할 수 있도록 함으로써 개발된 가뭄지수의 활용도를 높이하고자 한다.

2. 농업용수 수급 가뭄지수 개발

본 연구에서는 농업용수의 수요량과 공급량을 통해 실질적인 부족량을 산정하여 농업 가뭄을 평가하는 농업용수 수급 가뭄지수(Agricultural Water Demand and Supply Drought Index, AWSDSI)를 개발하였다. 이와 함께 관계식을 통해 구해진 용수 부족량을 가뭄지수로 변환하여 대상 지역의 농업용수 가뭄을 평가할 수 있도록 가뭄등급 분류기준을 함께 개발하였다. 본 연구에서 개발된 AWSDSI는 시간적으로는 일단위로 산정하고 공간적으로는 시·군 단위가 아닌 읍·면·동 행정구역 단위까지 분석을 수행하여 더 상세화한 것이 특징이라고 할 수 있다. 이때 농업용수 수요량은 Fig. 1과 같이 읍·면·동의 일 단위 논, 밭, 축산용수 자료를 활용하며, 공급량의 경우 강우를 포함한 농업용 저수지, 양수장과 양배수장, 지하수 일 공급량을 적용한다.

여기서 공급량은 인위적으로 용수가 공급되는 부문과

Fig. 1. Concept Diagram of Water Demands and Supply Flow and the AWDSDI Assessment

자연적으로 용수가 공급되는 부분으로 나누어 고려하였다. 인위적으로 용수가 공급되는 부분은 관개를 통해 용수가 공급되는 부분을 말하며, 자연적으로 용수가 공급되는 부분은 비관개로 용수가 공급되는 부분을 말한다. 이때 농업용 저수지 공급량은 농촌용수 종합정보시스템에서 관리하고 있는 농업용 저수지 공급량 정보를 사용하였고 양수장과 양배수장은 한국농어촌공사가 운영·관리하고 있는 시설의 공급량 정보를 사용하였으며, 지하수는 지자체 관내에 설치된 관정의 연평균 사용량을 월단위로 환산하여 사용하였다.

2.1 농업용수 수급 가뭄지수(AWDSDI) 관계식 개발

AWDSDI는 농업용수 수요량과 공급량 비교를 통해 용수 부족량을 산정하는 방법으로 본 연구에서는 용수 부족량을 산정하기 위하여 인위적인 용수 공급체계와 자연적인 용수 공급체계를 구분하여 용수 수급 관계식을 새롭게 개발하였다. 개발된 인위적인 용수 공급체계의 농업용수 일 수요량 ARQ_{Di} 은 Eq. (1)과 같다.

$$ARQ_{Di} = (AFQ_{Di} + AAQ_{Di})/365 + APQ_{Di}/183 \quad (1)$$

여기서 AFQ_{Di} 는 관개전 수요량, AAQ_{Di} 는 축산용수 수요량으로써 이들은 연중 필요한 수요량으로 일 수요량으로 환산을 위해 365일을 적용하였으며, APQ_{Di} 는 수리답 수요량으로써 벼 생장기간인 4~9월만 고려하여 일 수요량으로 환산하기 위해 183일을 적용하였다.

인위적인 용수 공급체계에서 용수 공급량은 지역별 농업용 저수지공급, 양수장과 양배수장 공급, 지하수 공급으로 구분하여 산정한다. 이때 농업용 저수지 일 공급량 ARQ_{Si} 은 농업용 저수지 유효저수량과 농업용 저수지 일 저수 변화율의 곱으로 구해지며, 양수장과 양·배수장의 일 공급량 PSQ_{Si} 은 시간당 최대 양수량과 일평균 가동시간의 곱으로 구해지고 지하수 일 공급량 GWQ_{Si} 은 지하수 일 유효공급량으로 구해진다. 인위적인 용수 공급체계를 통해 공급 가능한 전체 일

공급량은 농업용 저수지, 양수장과 양배수장 그리고 지하수의 일 공급량을 합한 값으로 산정하며 Eq. (2)와 같이 구해진다.

$$ASQ_{Si} = ARQ_{Si} + PSQ_{Si} + GWQ_{Si} \quad (2)$$

여기서, ASQ_{Si} 는 인위적인 용수 공급체계의 농업용수 일 공급량이다. 인위적인 용수 공급체계에서 농업용수 부족량은 농업용수 일 수요량과 농업용수 일 공급량의 차이로써 Eq. (3)으로 구할 수 있다.

$$ARQ_{ST} = ARQ_{Di} - ASQ_{Si} \quad (3)$$

여기서 ARQ_{ST} 는 농업용수 일 공급부족량(m^3/d), ARQ_{Di} 는 인위적인 용수 공급체계에서 농업용수 일 수요량(m^3/d) 그리고 ASQ_{Si} 는 인위적인 용수 공급체계에서 농업용수 일 공급량(m^3/d)이다.

자연적인 용수 공급체계에서의 용수공급은 관개를 통하지 않고 공급되는 용수를 말하며, 농업용수에 있어 자연적 공급을 통해 이루어지는 공급량은 강우이고 자연적인 용수 공급체계에서의 수요량은 비관개전 수요량과 수리불안전답 수요량이다. 본 연구에서는 가뭄이 시작되면 강우가 거의 없으며, 강우가 발생한다고 하더라도 그 양이 미미하여 가뭄에 미치는 영향이 적다고 가정하고 인위적인 농업용수 공급체계의 용수만으로 해당 지역의 농업용수의 수요량에 따른 각각의 부족량과 지역 전체의 농업용수 부족량을 산정하였다.

2.2 농업용수 수급 가뭄지수(AWDSDI) 등급 결정

농업 가뭄을 평가하기 위해서는 농업용수 부족량을 가뭄 정도를 지수·등급화하고 각 등급별 가뭄 심도를 결정하는 것이 중요한데, 국내·외에서 많이 이용되고 있는 가뭄지수들의 지수등급 구분을 살펴보면 기상학적 가뭄지수인 Palmer Drought Severity Index (PDSI)는 총 12단계로써 정상상태를 제외한 가뭄상태는 6단계로 구분되어 있다. 그리고 Standard

Precipitation Index (SPI)는 총 8단계 중 가뭄단계는 4단계로 나누어져 있으며, 수문학적 가뭄지수인 Modified Surface Water Supply Index (MSWSI)와 Water Demand and Supply Drought Index (WDSI; Oh, 2012)의 경우에는 정상상태와 4단계의 가뭄단계로 구분되어져 있다.

한편, 가뭄을 모니터링하고 가뭄대책을 마련하는 국내·외 기관들의 가뭄단계 구분을 보면 우리나라의 경우 가뭄발생 시 주요 대책마련이 요구되는 행정안전부, 환경부, 농림축산식품부와 같은 행정부처의 가뭄대책은 4단계로 구분되어져 있다. 또한, 미국의 국가가뭄경감센터(NDMC)의 경우도 정상상태를 제외하면 가뭄단계를 4단계로 구분하여 운용하고 있다. AWDSI의 가뭄단계는 농업용수 수요량 대비 농업용수 부족량의 비율을 고려하여 기존에 개발된 수문학적 가뭄지수들과 동일하게 D0 정상상태와 D1~D4의 4개 가뭄단계로 총 5단계의 지수등급으로 구분하였으며, 이를 정리하여 Table 1에 수록하였다. 정상상태(D0)는 부족량 비율이 0% 이하의 경우에 해당되며, 나머지 가뭄단계는 농업용수 수요량 대비 부족량의 전체비율 100%를 4단계로 균등하게 구분하여 0% 초과 25% 이하는 약한가뭄(D1), 25% 초과 50% 이하는 보통가뭄(D2), 50% 초과 75% 이하는 심한가뭄(D3), 75% 초과 100% 이하는 극한가뭄(D4)으로 분류하였다.

3. 농업용수 수급 가뭄지수(AWDSI) 적용 및 검증

본 연구에서는 기존에 개발, 적용성이 검증된 SMI, MSWSI 그리고 WDSI 가뭄지수와의 비교·분석 연구를 통해 AWDSI의 국내 적용 가능성을 검증하고자 우리나라의 가뭄기록을 토대로 중·소도시 규모에 농경지가 다수 분포하는 지역과 최근에 농업용 저수지 저수율 저하로 실제 가뭄피해가 발생했던 지역을 우선 고려하여 선정하였다. AWDSI는 유역단위 분석이 아닌 행정구역단위의 읍·면별 분석이 가능하므로 충청권, 경상권, 전라권에서 각각 1개씩 진천군, 창녕군, 장성군 3개 군을 선정하고 군내 모든 읍·면에 적용하였다. 분석기간으로는 과거 가뭄기록을 바탕으로 가뭄피해가 크게 발생했던 2017년 6~8월을 선정하였다. 적용대상 지자체중 장성군과 진천군은 국내 시·군중 비교적 규모가 큰 농업용 저수지를 보유한 반면, 창녕군은

소규모 농업용 저수지가 많은 특성이 있으며, 3개 군 모두 일정규모의 양수장·양배수장 운영기록, 지하수 공급량 자료가 있어 농업용수 가뭄을 평가하기 적절한 지역으로 판단된다. 농업용 저수지 유효저수량과 일단위 저수 변화를 자료는 농촌용수 종합정보시스템, 양수장·양배수장 일 공급량 자료는 한국농어촌공사, 지하수 일 유효공급은 지자체로부터 각각 수집하였으며, 이들 자료는 읍·면별 농업용수 수급을 분석하는 데 적용하였다. 적용 대상지역인 3개 군의 행정구역도는 Fig. 2에 도시하였으며, 군내 포함된 읍·면 현황은 Table 2에 정리하여 제시하였다.

진천군은 2017년 5월 27일 초평저수지의 저수율이 38%에 이르렀으며, 5월까지의 강수량은 96.0 mm로 평년(208.3 mm)의 절반에도 못 미쳤고 5월 한 달간의 강수량은 11.2 mm로 평년(70.5 mm)에 비해 매우 적은 강우의 발생으로 진천군의 대부분 지역이 가뭄을 겪었다. 경남지역의 2017년 5월 저수율은 78.1%로 평년(82.2%)의 92.6% 수준이었으며, 도내 저수지 651개소 중 용수부족이 우려되는 16개소의 저수량도 5월 22일 기준 139만 m³에 달해 모내기철 영농활동에 차질이 없었다. 그러나 창녕군은 쌀 위주의 논농사가 점차 줄고 있는 반면, 발농사나 과일농사를 짓는 농가가 점차 늘고 있음에도 논농사 중심의 농업용수 지원 체계를 유지하고 있어 창녕군 대합면은 2017년 5월 24일 현재 수확을 앞둔 마늘의 생육이 지난해 70% 수준에 그치는 등 발농사를 중심으로 농업 가뭄이 발생하였다. 전남지역의 2017년 6월 22일 평균 저수율은 50% 이하로 특히 진도, 무안, 고흥, 영광, 나주, 장성과 같은 시·군의 저수율은 30%까지 낮아져 산간이나 도서 지역을 중심으로 제한급수가 이루어지는 등 심한가뭄을 겪었다.

3.1 AWDSI 적용을 위한 자료구축

AWDSI를 이용하여 가뭄을 평가하기 위한 공급량 자료 중 강수량 자료는 진천군의 진천, 증평, 천안관측소와 창녕군의 길곡, 도천, 창녕관측소 그리고 장성군의 장성, 상무대, 고창관측소에서 2017년 1월 1일~12월 31일 기간 동안 수집한 자료를 이용하였다. 농업용수 공급을 위한 진천군, 창녕군, 장성군 관내 농어촌공사 관할 저수지, 지자체 관할 저수지, 양수장, 양배수장, 지하수 공급량을 정리하여 Table 3에 수록하였다.

Table 1. Drought Index and Rating Criteria of the AWDSI

Drought Index	Rating Criteria	Values (%)	Calculation Method
D0	Normal	$R \leq 0$	$R = \frac{\text{Water Deficit}}{\text{Water Demands}} \times 100 (\%)$
D1	Moderately Drought	$0 < R \leq 25$	
D2	Normal Drought	$25 < R \leq 50$	
D3	Severe Drought	$50 < R \leq 75$	
D4	Extremely Drought	$75 < R \leq 100$

Fig. 2. Map Based Administrative Districts Boundary of Test-Bed

Table 2. Administrative Districts (Ep · Myun) List of Test-Bed

Cities	Districts (Ep · Myun)
Jinchungun (7 Ep · Myun)	Jinchunep, Duksanep, Chpyungmyun, Munbackmyun, Bakgokmyun, Yiwolmyun, Gwanghyaewonmyun
Chnagnyunggun (14 Ep · Myun)	Changnyungep, Namjiep, Goammyun, Sungsanmyun, Daehapmyun, Yibangmyun, Youeomyun, Daejimyun, Gaesungmyun, Youngsanmyun, Jangmamyun, Dochunmyun, Gilkokmyun, Bugokmyun
Jangsunggun (11 Ep · Myun)	Jangsungep, Jinwonmyun, Nammyun, Donghwamyun, Samseomyun, Samgyemyun, Hwangryongmyun, Seosammyun, Bukilmyun, Bukyimyun, Bukhamyun

Table 3. Supply Data of the Agricultural Water Resources in Three Cities

City	Reservoirs managed by				Pumping station		Drainage System		Ground Water Wells	
	Korea Rural Community Corporation		Local Government							
	Number	Storage (1,000 m³)	Number	Storage (1,000 m³)	Number	Storage (1,000 m³)	Number	Storage (1,000 m³)	Number	Usage (1,000 m³)
Jinchungun	12	26,853.4	38	239.7	21	8.14	-	-	3,970	12,397
Chnagnyunggun	47	24,636.8	178	3,403.5	32	10.86	8	23.66	1,983	13,688
Jangsunggun	50	42,014.10	67	2,632.6	7	1.27	-	-	6,189	17,906

강우량-저수율 관계분석을 위하여 3개 군에 위치한 저수지 중 2017년 가뭄피해 조사시 저수율이 낮았던 농업용 저수지 자료를 사용하였는데, 진천군에서는 미호, 백곡, 옥성저수지와 창녕군에서는 감동, 길곡, 옥천, 화전저수지 그리고 장성군에서는 달성, 유당, 장성호저수지 저수율을 사용하여 분석하였다. 이들 3개군의 강수량 자료와 저수율 분석 결과는 Fig. 3에 비교·도시하였다.

강우량-저수율 관계곡선을 분석한 결과, 3개군의 농업용 저수지들은 4, 5월까지 일정 수준을 유지하고 있던 저수율이 강우감소와 용수이용이 증가함에 따라 5월부터 7월까지 감소하는 것으로 나타났다. 진천군은 6월까지 간헐적으로 강우가 발생하기도 하였으나 저수지 저수율은 회복되지 못하고 7월에 이르러서야 집중호우로 저수율이 점차 회복된 것으로 나타났다. 창녕군 역시 7월까지 간헐적으로 강우가 발생하였으나 저수율을 회복하지는 못하고 8월 이후에서야 집중호우와 고압면의 감동저수지 등 주요 저수지에 대한 광역상수도 전환 등의 대책으로 저수율이 점차 회복된 것으로 나타났다. 2017년 당시 창녕군에 위치한 47개 농어촌공사 저수지의 평균 저수율은 36.8%로써 전국 평균 68%와 경남 평균 59%보다 낮은 것으로 조사되었다. 장성군은 5월부터 농번기 물 사용이 급증하는 시기로 용수사용이 증가하면서 저수율이 급격히 하강한 것으로 나타났다. 6월까지의 간헐적으로 강우가 발생하였으나 저수지 저수율을 회복하는 데는 한계가 있었으며, 7월 이후 집중호우와 농업용수 대체 공급시설을 확충하는 등 가뭄대책이 시행되면서 저수율이 점차 회복된 것으로 나타났다.

AWDSDI를 이용하여 가뭄을 평가하기 위한 농업용수 수요량을 산정하기 위하여 3개군에 위치한 수리답, 수리불

안전답과 같은 논작물 재배에 필요한 용수, 관개전, 비관개전과 같은 밭작물 재배에 필요한 용수, 양축용수, 가공용수와 같이 축산에 필요한 용수자료를 구축하였다. 진천군, 창녕군, 장성군의 전체 농업용수 수요량 자료를 정리하여 Fig. 4에 도시하였다.

농업용수 수요량 자료 분석결과, 진천군의 경우에는 논작물 용수 수요량은 이월면이, 밭작물 용수 수요량은 덕산읍이, 양축용수 및 가공용수를 위한 축산용수 수요량은 이월면이 가장 큰 것으로 나타났다. 창녕군의 경우에는 논작물 용수 수요량은 대합면이, 밭작물 용수 수요량은 남지읍이, 축산용수 수요량은 창녕읍이 가장 큰 것으로 나타났다. 장성군의 경우에는 논작물과 밭작물 용수 수요량은 남면이 가장 크고 축산용수 수요량은 서삼면이 가장 큰 것으로 나타났다.

3.2 AWDSDI 적용을 통한 부족량 산정 및 농업 가뭄평가

본 연구에서는 AWDSDI의 적용을 통해 대상유역인 진천군(JCG), 창녕군(CNG), 장성군(JSG)의 3개 군에 대한 공급량과 수요량을 분석하여 농업용수 부족량을 산정하고 이를 이용하여 가뭄을 평가하였으며 이들을 정리하여 Table 4에 수록하였다. 분석기간은 가장 최근에 가뭄 피해가 크게 발생했던 2017년 1월부터 12월까지이며, 분석주기는 월 간격으로 가뭄의 변동성을 분석하였다. 연간 농업용수 수급체계를 분석한 결과 농업가뭄은 저수지 유효저수량의 의존성이 높아 월별 공급가능량에 따라 영농활동에 제한이 있을 것으로 판단되어, 본 연구에서는 월별 평년 저수율을 적용하여 농업 가뭄을 평가하였다.

Fig. 3. Rainfall-Storage Ratio Curve During 2017.1.1. ~ 12.31.

Fig. 4. Agricultural Water Demands in Three Cities

Table 4. Monthly Agricultural Water Demands and Supply Analysis and Drought Assessment Results on Changnyunggun in 2017

Month	Supply (1,000 m ³)			Demands (1,000 m ³)			Deficit (1,000 m ³)			AWDSDI		
	JCG	CNG	JSG	JCG	CNG	JSG	JCG	CNG	JSG	JCG	CNG	JSG
JAN	21,608	13,514.8	27,350.4	161	138.2	151.9	21,446	13,376.6	27,198.5	D0	D0	D0
FEB	22,259	13,579.6	28,377.3	403	345.6	379.7	21,855	13,234.0	27,997.6	D0	D0	D0
MAR	22,666	13,838.5	29,448.8	727	622.1	683.6	21,938	13,216.4	28,765.2	D0	D0	D0
APR	23,289	14,340.2	30,877.5	2,343	2,004.4	2,202.5	20,946	12,335.8	28,675.0	D0	D0	D0
MAY	22,069	14,728.6	32,574.1	5,332	4,561.8	5,012.7	16,737	10,166.8	27,561.4	D0	D0	D0
JUN	16,675	13,547.2	28,154.1	26,016	22,256.0	24,455.9	-9,341	-8,708.8	3,698.2	D2	D2	D0
JUL	15,509	11,783.2	24,046.6	15,028	12,855.9	14,126.7	481	-1,072.7	9,919.9	D0	D1	D0
AUG	20,524	13,644.3	28,198.7	20,118	17,210.4	18,911.6	406	-3,566.1	9,287.1	D0	D1	D0
SEP	19,901	13,579.6	27,573.7	9,615	8,225.0	9,038.1	10,286	5,354.5	18,535.6	D0	D0	D0
OCT	19,548	13,450.1	25,743.2	808	691.2	759.5	18,740	12,758.9	24,983.7	D0	D0	D0
NOV	20,036	13,433.9	25,966.4	162	138.2	151.9	19,875	13,295.7	25,814.5	D0	D0	D0
DEC	20,903	13,450.1	26,457.5	81	69.1	76.0	20,823	13,381.0	26,381.5	D0	D0	D0

본 연구에서는 분석을 위하여 농어촌공사 및 지자체 관할 저수지는 평년 저수량을 반영하여 월별 공급량을 산정하였으며, 양수장, 양배수장, 지하수의 월별 공급량은 평균 이용량을 사용하였다. AWDSDI 평가를 위한 월별 농업용수 수요량과 공급량을 비교한 결과는 Table 4에서 알 수 있듯이 진천군은 수요량 대비 공급량이 부족해지는 기간은 공급량에 비해 수요량이 큰 6월 한 달로 나타났으며, 창녕군은 수요량 대비 공급량이 부족해지는 기간은 수요량이 큰 3개월(6-8월)로 나타났으며, 장성군은 수요량 대비 공급량이 부족해지는 기간은 없었던 것으로 나타났다. 6월 한 달 동안 진천군과 창녕군의 농업용수 부족량은 각각 9,341.0 m³와 8,708.8 m³로 두개군 모두 보통가뭄(D2)으로 평가 되었다. 또한 창녕군에서는 7월과 8월에도 농업용수 공급량이 수요량에 비해 1,072.7 m³와 3,566.1 m³ 정도 적었으며, 2개월 모두 약한가뭄(D1)으로 평가 되었다.

AWDSDI의 적용을 통해 대상유역인 진천군(JCG), 창녕군(CNG), 장성군(JSG) 3개 군에 대한 읍·면별 가뭄을 평가하여 Fig. 5에 비교하여 도시 하였다. 2017년 진천군 전체 읍·면의 월별 농업용수 부족은 Fig. 4에서도 알 수 있듯이 연평균 가뭄은 백곡면과 덕산면이 보통가뭄(D2)이, 이들 두면을 제외한 모든 읍면이 심한가뭄(D3)이 발생하는 것으로 평가되었다. AWDSDI는 6월 한 달 동안 전체 읍·면에서 보통가뭄(D2)이 발생하는 것으로 평가하였으며, 그중 진천읍과 이월면은 7월과 8월은 약한가뭄(D1)이 발생하는 것으로 평가되었다.

AWDSDI 평가결과 창녕군의 농업가뭄이 발생하는 기간은 수요량이 공급량보다 큰 6월, 7월, 8월로 나타났다. 창녕군 전체 읍·면의 월별 농업용수 부족 평가 결과 6월 한달간 전체 읍·면에서 보통가뭄(D2)이 발생하는 것으로 나타났

으며, 7월 가뭄평가에서는 이방면을 제외한 전체 읍·면에서 약한가뭄(D1)이 발생하는 것으로 나타났다. 8월에는 창녕읍에서 보통가뭄(D2)이 발생한 것으로 나타났으며, 창녕읍을 제외한 모든 읍·면에서는 약한가뭄(D1)이 발생한 것으로 평가 되었다.

AWDSDI 평가결과 장성군 전체 읍·면의 월별 농업용수 부족은 6월 한 달간 장성읍과 진원면을 제외한 전체 읍·면에서 보통가뭄(D2)이 발생하는 것으로 나타났으며, 7월 가뭄평가에서는 장성읍과 진원면을 제외한 전 읍·면에서 약한가뭄(D1)이 발생하는 것으로 나타났다. 8월에는 삼계면과 북일면에서 보통가뭄(D2)이 발생하였고 장성읍과 진원면은 정상상태(D0)로 나타났으며, 그 외 북이면, 북하면, 서삼면, 황룡면, 동화면, 삼서면, 남면에서는 약한가뭄(D1)이 발생하였다.

4. 농업용수 수급 가뭄지수(AWDSDI) 검증

실측자료가 있는 경우, 실측자료와 평가결과를 직접 비교하는 방법으로 개발된 가뭄지수의 신뢰성을 검증하는 것이 바람직하나, 가뭄의 경우 피해범위나 심도를 실측하기 어려워 본 연구에서는 기존에 개발된 지수들 중 농업가뭄 평가가 가능한 지수들과 AWDSDI 평가결과를 비교하는 방법으로 신뢰성을 검증하였다. 농업용수 수급 가뭄지수의 가뭄평가 신뢰성을 검증하기 위하여 토양수분 가뭄지수인 SMI, SWSI를 우리나라 실정에 맞게 보완하여 수문학적 가뭄평가에 적용하고 있는 MSWSI와 WSDSI를 선정하고 각 방법들의 가뭄평가 인자, 시·공간적 가뭄평가 범위, 지수범위, 가뭄평가 범위 등을 AWDSDI와 비교하여 Table 5에 수록 하였다.

Fig. 5. Map of Agricultural Water Drought Assessment on Districts of Jangchunggun in 2017

Table 5. Comparisons of Drought Assessment Method of the AWDSI with Existing Drought Methods

Contents	SMI	MSWSI	WDSI	AWDSI
Basic Concept	<ul style="list-style-type: none"> - Rainfall, evaporation, etc meteorological factor based agricultural water supply assessment - Drought index due to the meteorological factor based agricultural water supply by effective moisture percentage 	<ul style="list-style-type: none"> - Hydrological factor based living, agricultural, industrial water supply statistical assessment - Weighted drought index due to the hydrological factor based living, agricultural industrial water compared to demand 	<ul style="list-style-type: none"> - Horological factor based living, agricultural, industrial water supply quantitative analysis - Drought index due to the shortage of living, industrial and agricultural water compared to demand 	<ul style="list-style-type: none"> - Horological factor based domestic agricultural industrial water supply quantitative analysis - Drought index due to the shortage of agricultural water compared to demand
Input Factors	<ul style="list-style-type: none"> - Rainfall - River Flow - Reservoir Storage - Groundwater Level 	<ul style="list-style-type: none"> - Rainfall - River Flow - Reservoir Storage - Groundwater Level 	<ul style="list-style-type: none"> - Rainfall - Reservoir Storage 	<ul style="list-style-type: none"> - Rainfall - River Flow - Reservoir Storage - Groundwater Level
Time Range	- Monthly, Weakly	- Monthly, Weakly	- Daily Real Time	- Daily Real Time
Space Range	- Basin	- Basin	- City	- District
Assessment Range	- Water Usage Assessment Impossible	- No Water Usage Assessment Impossible	- Water Usage Assessment Possible	- Agricultural Water Usage Assessment Possible
Drought Index, Rating Criteria	<ul style="list-style-type: none"> - 5 Grades • D0 (Normal) • D1 (Moderately Drought) • D2 (Normal Drought) • D3 (Severe Drought) • D4 (Extreme Drought) 	<ul style="list-style-type: none"> - 5 Grades • D0 (Normal) • D1 (Moderately Drought) • D2 (Normal Drought) • D3 (Severe Drought) • D4 (Extreme Drought) 	<ul style="list-style-type: none"> - 5 Grades • D0 (Normal) • D1 (Moderately Drought) • D2 (Normal Drought) • D3 (Severe Drought) • D4 (Extreme Drought) 	<ul style="list-style-type: none"> - 5 Grades • D0 (Normal) • D1 (Moderately Drought) • D2 (Normal Drought) • D3 (Severe Drought) • D4 (Extreme Drought)

Fig. 6. Map of Agricultural Water Drought Assessment on Districts of Jangsunggun in 2017

WDSI와 MSWSI는 생활, 공업, 농업 모든 용수의 가뭄평가를 수행하고 SMI와 AWDSI는 농업용수의 가뭄평가를 수행하는 것으로써 각 지수의 기본 개념은 AWDSI와 WDSI는 수문인자별 용수공급량과 용수 수요량을 산정 후 용수부족량을 정량적으로 산정하고 이를 이용하여 용수부족량을 구하고 가뭄을 지수화 한다. 한편, MSWSI의 경우에는 수문인자별 용수공급능력을 통계학적으로 평가하고 각 인자별 가중치를 적용하여 가뭄을 지수화 하고 SMI는 토양수분 정도를 측정하여 구한 유효수분백분율을 이용하여 가뭄을 지수화 한다. WDSI와 MSWSI의 가뭄평가 범위는 WDSI는 전체 용수 상황뿐만 아니라 생활용수, 공업용수, 농업용수 각각의 용수이용별 가뭄의 평가가 가능하나, SMI와 AWDSI는 농업용수의 이용별 가뭄평가를 수행하고 MSWSI의 경우에는 유역의 전체적인 용수상황만을 평가한다. 마지막으로 가뭄등급을 산정하는 기준은 산정방법의 차이로 인해 다르나 가뭄평가 등급은 모든 지수가 D0, 정상상태와 D1~D4, 4단계의 가뭄단계로써 총 5단계로 동일하다.

진천군, 창녕군 그리고 장성군 3개 군의 2017년 6월, 7월 그리고 8월 15일에 대한 각 가뭄지수별 평가결과를 비교하여 Fig. 6에 도시하였다. 진천군의 경우, 6월 15일에 대해 모든

지수들이 7개 읍면을 동일한 가뭄으로 평가하였는데, SMI는 토양의 수분정도로 가뭄을 평가함에 따라 6월의 건조현상으로 인한 토양수분 부족으로 전체 읍면을 심한가뭄으로 평가하는 것으로 나타났다. WDSI는 MSWSI와 같은 수문학적 가뭄지수이나 강수에 의한 영향과 함께 저수지 공급량만을 고려하여 가뭄을 평가함에 따라 MSWSI와는 다르게 저수량이 감소하는 6월을 심한가뭄(D3)으로 평가하는 것으로 나타났다. 반면, AWDSI는 진천군내 7개 읍면을 보통가뭄(D2)으로 평가하였다.

창녕군의 경우, 7월 15일에 대해 WDSI를 제외한 모든 지수들이 14개 읍면을 다르게 평가하였는데, SMI는 성산면만 약한가뭄(D1)으로 평가하였고 나머지 장마면, 계성면 등 13개 읍·면은 7월부터 증가한 강수량이 반영되어 정상상태(D0)로 평가하였다. MSWSI는 장마면, 계성면 등 2개 읍·면을 약한가뭄(D1)으로 영산면, 도천면, 길곡면, 부곡면 등 4개 읍·면을 심한가뭄(D1)으로 평가하였으며, 성산면, 이방면, 대함면, 유어면, 대지면, 고암면, 창녕읍, 남지읍 등 8개 읍·면을 정상상태(D0)로 평가하였는데, 이는 강수량과 함께 저수지 저수량이 증가하면서 공급량 또한 증가하여 대부분의 읍·면 정상상태로 평가한 것으로 분석되었다. WDSI의 경우 읍·

면 단위의 분석이 아닌 시·군 단위 분석을 수행하여 농업용수 가뭄을 전 읍·면을 정상상태로 평가한 것으로 판단된다. 반면, AWDSI는 이방면을 정상상태로 나머지 13개 읍·면을 약한가뭄(D1)으로 평가하였다. 2017년 5월 당시 경남지역의 댐 실제 저수율은 78.1%로 평년(82.2%)에 비해 적은 수준이었으며, 당시 6-8월에는 가뭄이 발생하였던 것으로 조사되어 AWDSI는 다른 가뭄지수에 비해 읍면별 가뭄을 비교적 잘 재현하는 것으로 나타났다.

장성군의 경우, 8월 15일에 대해 AWDSI를 제외한 모든 지수들이 11개 읍·면을 동일한 가뭄으로 평가하였는데, SMI는 11개 전체 읍·면을 정상상태(D0)로 평가하였으며, 수정지표수공급지수인 MSWSI는 11개 읍·면을 보통가뭄(D2)으로, WDSI는 11개 읍·면에 대한 가뭄지수등급을 극한가뭄(D4)으로 평가하였다. 본 연구에서 개발한 AWDSI는 장성읍과 진원면을 정상상태(D0), 삼계면, 북일면을 보통가뭄(D2)로 평가하였고 나머지 7개 읍·면을 약한가뭄(D1)으로 평가하였다. 2017년 6월 22일 전남지역의 평균 저수율은 모두 50% 이하였으며, 특히 장성군의 저수율은 30%까지 낮았던 것으로 조사되었다. 그러나 7월부터 강우가 발생하면서 가뭄이 일부 해소되었음에도 WDSI의 경우 저수지 공급량만을 적용하여 가뭄을 평가하였고 읍·면 단위의 분석이 아닌 시·군 단위 분석을 수행하고 지하수, 양수장과 양배수장 등과 같은 농업용수의 다양한 취수원을 고려하지 못함에 따라 전 읍면을 극한가뭄으로 평가한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 농업용수의 수요량과 공급량과의 관계를 구명하여 실질적인 농업용수부족량을 산정하여 농업용수 가뭄을 평가하는 수문학적 가뭄평가 기법인 농업용수 수급 가뭄지수(AWDSI)를 개발하였다. AWDSI는 농업용수 수요량과 공급량을 비교·분석하여 용수 부족량을 산정하는 농업용수 수급 가뭄지수로서 인위적 물 공급체계와 자연적 물 공급체제로 나누어 개발함으로써 실시간 읍·면·동별, 농업용수에 대한 가뭄평가가 가능하다. AWDSI의 적용을 위하여 공간적으로는 진천군, 창녕군, 장성군 3개 군의 읍·면을 대상으로 분석을 수행하였으며, 시간적으로는 일(daily)단위 수요량과 공급량 자료를 적용하여 월단위 가뭄을 분석하였다. 분석기간은 가장 최근에 가뭄 피해가 크게 발생했던 2017년 6월부터 8월까지의 기간에 대해 분석을 수행하였다. 또한, 분석주기는 30일 간격으로 가뭄의 변동성을 분석하였다. 분석결과 AWDSI는 농업용수 이용별 특성을 잘 반영하여 가뭄평가 수행이 가능한 것으로 나타났다.

본 연구에서 개발한 농업용수 수급 가뭄지수를 검증하기 위하여 기존에 개발된 SMI, MSWSI와 WDSI를 적용하여 산정한 가뭄지수별 등급을 비교하였다. 그 결과 SMI는 실제 가뭄이 발생했던 기간을 잘 재현하지 못하는 반면, MSWSI,

WDSI와 AWDSI는 비교적 과거 가뭄을 잘 재현하는 것으로 나타났다. 하지만 MSWSI의 경우 대부분 동일유역 내 읍·면에서 가뭄이 나타나 행정구역별 가뭄평가에 제한이 있는 것으로 나타났다. 반면, WDSI와 AWDSI는 행정구역별 가뭄평가가 가능한 것으로 나타났다. 특히, AWDSI는 읍·면·동 단위까지 가뭄평가가 가능하도록 개발되어 기존에 개발된 가뭄지수에 비해 공간적으로 상세 분석이 가능하므로 자연재해저감종합계획 등 법령에 규정된 가뭄대책수립시 위험지역 지정 및 농업용수 공급대책 마련에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서 개발된 AWDSI는 농업용수 수요와 공급을 통해 실질적인 용수부족 정도를 구하고 이를 이용하여 가뭄을 실시간으로 신속하게 판단할 수 있는 지수로서 정부나 지자체에서 가뭄대책 수립시 활용이 가능하지만 보다 더 정확한 가뭄상황 판단을 위해서는 신뢰성 높은 수요량 및 공급량 산정에 필요한 자료의 DB 구축이 선행되어야 한다. 더불어 가뭄재해관리대책을 마련함에 있어서도 농업용수 확보와 함께 수환경과 생태계를 보호하려는 전략이 필요하며, 향후 LID 나 NBS 기술을 활용한 용수수급체계의 다양화 노력이 병행된다면 보다 정확한 농업용수 부족량 산정이 가능할 것으로 기대된다.

Reference

- Ahn, S.R. (2008). Assessment of the potential water supply rate of agricultural irrigation facilities -For geum river basin-. Master thesis, Kunkook University, Korea.
- Assani, A.A. (2016). The usefulness of the lombard method for analyzing the hydrological impacts of dams: The case of the Manouane River diversion dam, Quebec, Canada, Water, 8.
- Brown, J.F., Wardlow, B.D., Tadesse, T., Hayes, M.J., and Reed, B.C. (2008). The vegetation drought response index (VegDRI): A new integrated approach for monitoring drought stress in vegetation. *GIScience & Remote Sensing*, Vol. 45, No. 1, pp. 16-46.
- Chang, T.J. (1991). Investigation of precipitation droughts by use of kriging method. *J. Irrig. Drain. Engrg.*, Vol. 117, No. 6, pp. 935-943.
- Chang, T.J., and Stenson, J.R. (1990). Is it realistic to define a 100-year drought for water management?. *Water Resour. Bull.*, Vol. 26, No. 5, pp. 823-829.
- Clausen, B., and Pearson, C.P. (1995). Regional frequency analysis of annual maximum streamflow drought. *J. Hydrol.*, Vol. 173, pp. 111-130.
- Dogan, S., Berkay, A., and Singh, V.P. (2012). Comparison of multi-monthly rainfall based drought severity

- indices, with application to semi-arid Konya closed basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, Vol. 470, pp. 255-268.
- Dracup, J.A., Lee, K.S., and Paulson, E.G. (1980). On the statistical characteristics of drought events. *Water Resour. Res.*, Vol. 16, No.2, pp. 289-296.
- Frick, D.M., Bode, D., and Salas, J.D. (1990). Effect of drought on urban water supplies. I: drought analysis. *J. Hydrological Eng.*, Vol. 116, pp. 733-753.
- Heathcote, I.W. (1998). *Intergrated watershed management: principles and practice*. John Wiley & Sons, Inc. U.S.A.
- Hollinger, S.E., Isard, S.A., and Welford, M.R. (1993). *A new soil moisture drought index for predicting crop yields*. In: Preprints, Eighth Conf, on AppliedClimatology, Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc., pp. 187-190.
- Hogg, E.H., Barr, A.G., and Black, T.A. (2013). A simple soil moisture index for representing multi-year drought impacts on aspen productivity in the western Canadian interior. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 178-179, No. 15, pp. 173-182.
- Jaranilla-Sanchez, P.A., Wang, L., and Koike, T. (2011). Modeling the hydrologic responses of the Pampanga river basin, Philippines: Azuantitative approach for identifying droughts. *Water Resour Res.*, Vol. 47, No. 3, pp. 1-21
- Jeong, M., Lee, C., Lee, J., and Hong, I. (2017). Analysis of hydrological drought considering msusi and precipitation. *Journal of Korea Academia Industrial Cooperation Society*, Vol. 18, No. 12, pp. 668-678.
- Jo, J. (2017). *The probabilistic drought analysis based on ensemble technique through the msusi improvement*. Master thesis, Daejin University, Korea.
- Jo, C. (2008). *Characteristics of the Korea River Basin drought indexes using RDI*. Master thesis, Yonsei University, Korea.
- Jung, I.W., and Chang, H.J. (2012). *Climate change impacts on spatial patterns in drought risk in the willamette River Basin, Oregon, USA*, Theoretical and Applied Climatology.
- Karamouz, M., Rasouli, K., and Nazif, S. (2009). Development of a Hybrid Index for Drought Prediction: Case Study, *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 10, pp. 617-627.
- Kendy, E., Gerard-Marchant, P., Walter, M.T., Zhang, Y., Liu, C., and Steenhuis, T.S. (2003). A soil-water-balance approach to quantify groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain. *Hydrological Processes*, Vol. 17, pp. 2011-2031.
- Kim, O., Lam, W., Rho, J., Lee, J., Choi, J., Yu, S., et al. (2006). Watershed scale drought assessment using soil moisture index. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 48, No. 6, pp. 3-13.
- Kwon, H., Kim, S., Bark, H., and Hong, D. (2006). A study on semi-distributed hydrologic drought assessment modifying SWSI. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 8, pp. 645-658.
- Kwon, H., and Kim, S. (2007). Assessment of drought risk in Korea: Focused on data-based drought risk map. *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 27, No. 2B, pp. 197-199.
- Lee, S. (2021). *Development of agricultural water demand and supply drought index (AWSDSI)*. Doctoral thesis, Kongju National University, Korea.
- Nam, W., Hong, E.M., Jang, M., and Choi, J. (2014). Projection of consumptive use and irrigation water for major upland crops using soil moisture model under climate change. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 55, No. 3, pp. 41-49.
- Nam, W., Tsegaye, T., Brian, D.W., Jang, M., and Hong, S. (2015). Satellite-based hybrid drought assessment using vegetation drought response index in South Korea (VegDRI-SKorea). *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 57, No. 4, pp. 1-9.
- Oh, K.R. (2012). *Development of water demand and supply drought index*. Doctoral thesis, Kongju National University, Korea.
- Palmer, W.C. (1968). Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index. *Weatherwise*, Vol. 21, No. 4, pp. 156-161.
- Sen, Z. (1980). Statistical analysis of hydrologic critical droughts. *J. Hydraulics Div.*, Vol. 106, No. 1, pp. 99-115.
- Sheffield, J., and Wood, E.F. (2008). Global trends and variability in soil moisture and drought characteristics, 1950-2000, from observation-driven simulations of the terrestrial hydrologic cycle. *Journal of Climate*, Vol. 21, No. 3, pp. 432-458.
- Shukla, S., and Wood, A.W. (2008). Use of a standradized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 35, No. 2, pp. 1-7.
- Tadesse, T., Wardlow, B.D., Brown, J., Hayes, M., Svoboda,

- M., Fuchs, B., et al. (2015). Assessing the vegetation condition impacts of the 2011 drought across the U.S. southern great plains using the vegetation drought response index (VegDRI). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 54, No. 1, pp. 153-169.
- Tadesse, T., Brown, J.F., and Hayes, M.J. (2005). A new approach for predicting drought-related vegetation stress: integrating satellite, climate, and biophysical data over the U.S. central plains. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 59, pp. 244-253.
- Trenberth, K., Overpeck, J., and Solomon, S. (2004). Exploring drought and its implications for the future, *Eos. Transactions American Geophysical Union*, Vol. 85, No. 3, pp. 27.
- Tsakiris, G., Pangalou, D., and Vangelis, H. (2006). Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*, Vol. 21, No. 5, pp. 821-833.
- World Meteorological Organization. (2006). Drought monitor and early warning, WMO, NO. 1006, ISBN 92-63-11006-9.
- Wu, H., Hubbard, K.G., and Wilhite, D.A. (2004). An agricultural drought risk-assessment model for corn and soy-beans. *International Journal of Climatology*, Vol. 24, No. 6, pp. 723-741.
- Wu, H., and Wilhite, D.A. (2004). An operational agricultural drought risk assessment model for Nebraska. *Natural Hazards*, Vol. 33, No. 1, pp. 1-21.
- Yoo, J., Kim, T., Kim, J., and Moon, J.W. (2017). Development of drought index based on streamflow for monitoring hydrological drought. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 37, No. 4, pp. 669-680.
- Zelenhasic, E., and Salvai, A. (1987). A method of stream-flow analysis. *Water Resources Research*, Vol. 23, No. 1, pp. 156-168.

Received	March 4, 2021
Revised	March 5, 2021
Accepted	March 18, 2021