

규칙기반 분류기법을 활용한 관계부처 합동 통합 가뭄 예·경보 단계 설정 연구*

A Preliminary Study on the Cooperative Multi-ministry Decision on the Integrated Drought Warning Alert Stage Using Rule-based Hybrid Techniques

이종소 Lee Jongso**, 이상은 Lee Snageun***

Abstract

Since 2016, Korean governments agencies including the Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, the Ministry of Environment, and Korea Meteorological Administration have operated drought warning systems in coordination with the Ministry of the Interior and Safety. Despite multi-ministerial efforts, the ministries designate and announce various drought stages by using their individual views and methods so that municipalities and citizens are largely confused when they try to understand the severity of current and future droughts. This study suggests a novel method for integrating drought stages from three ministries into a single stage at each municipality level. The method follows three steps in order to determine the integrated drought warning stage. First, municipalities are classified into three types on legal grounds, which are intended to differentiate municipalities' vulnerability to drought. Second, expert interviews and the analytical hierarchy process (AHP) method are used to quantify the weights of three drought stages for each type of municipality. Third, three drought stage records and estimated weights are applied to determine the integrated drought warning stage for municipalities across the country. The case with the drought in June 2022 shows that proposed methods can describe drought severity in terms of a single yardstick which is useful to communicate with the general public and local government officials, reflecting regional vulnerability characteristics in a simplified manner.

Keywords: Drought Stage, Drought Warning, Rule-Based Decision, Preparedness and Response

I. 서론

기후변화로 국토 전반에 걸쳐 가뭄이 심화됨에 따라 우리나라는 2016년부터 관계부처 가뭄 대책 합동 TF

를 매월 대면 1회, 서면 3회 운영하여 가뭄 예·경보를 시행하고 있다. 또한 2019년에는 가뭄정보를 통계에 반영하기로 결정하고 2020년부터 국가가뭄정보통계 집을 발간하고 있다. 행정안전부가 가뭄 총괄·조정

* 본 논문은 행정안전부 재난안전 공동연구 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2022-MOIS63-001).

** 국토연구원 건설경제산업연구본부 부연구위원(제1저자) | Assistant Research Fellow, Construction Economy&Industry Research Division, Korea Research Institute for Human Settlements | Primary Author | jslee@krihs.re.kr

*** 국토연구원 안전국토연구센터장(교신저자) | Research Fellow, Land & Infrastructure Safety Research Center, Korea Research Institute for Human Settlements | Corresponding Author | selee@krihs.re.kr

역할을 맡고 기상청은 기상 가뭄, 농림축산식품부는 농업용수 가뭄, 환경부는 생활 및 공업용수 가뭄을 담당한다. 가뭄 단계를 관심, 주의, 경계, 심각한 4단계로 구분하여 가뭄 예·경보를 발령하고 있다.

예전부터 가뭄 관련 정보를 기관별 목적과 업무 특성에 따라 생산, 가공하여 제공하고 있었으나, 부처 간 연계성 부족으로 선제적 대응 및 정보제공에 한계가 있음을 인지하고 가뭄에 대한 관리 능력을 강화하기 위해 기관별 가뭄 정보를 통합한 가뭄 예·경보제를 시행 중이다. 2021년 4월 「자연재해대책법」 제29조의2를 신설하여 행정안전부 장관은 가뭄 방재를 위해 관계 중앙행정기관의 장과 합동으로 가뭄 예보 및 경보 체계를 운영하여야 한다는 법적 근거도 마련하였다.

또한 가뭄 관련 연구도 활발히 진행되고 있다. 가뭄에 대한 감시 기술 개선을 위해 Copula 함수를 활용하여 기상-수문 정보를 결합한 이변량 결합가뭄지수를 산정하고 적용성을 평가하는 연구가 진행되었으며(김상단, 류정수, 오국열, 정상만 2012; 소재민, 손경환, 배덕효 2014; Won, Choi, Lee and Kim 2020), Shah, D. and Mishra, V. (2020)은 기상, 수문, 농업 등 관련 지수를 바탕으로 Copula 함수 활용을 통해 통합 가뭄 지수를 개발하였다. 유지영, 소병진, 이주현, 김태웅 (2020)은 가뭄의 사공간적 이동 패턴을 고려하여 기상 가뭄에서 수문학적 가뭄으로의 전이를 분석하였으며, 신지예, 손호준, 권현한, 김태웅(2021)은 기상학적 가뭄이 수문학적 가뭄으로 변화되는 시간적 전이 특성을 베이지안 네트워크(Bayesian Network) 모형을 활용하여 분석하였다.

하지만 우리나라의 경우, 국민과 실질적으로 연관이 있는 가뭄 예·경보에 대한 정책 실무적 연구는 활발히 이루어지지 못하고 있다. 가장 관련이 있는 연구로 윤현철, 이지현, 최창원, 원창희 외(2020)는 지역 여건별 가뭄 상황을 공식적으로 판단하기 위해 수정

결합가뭄지수를 개발하였는데, 이는 개별 가뭄단계점수, 기상가뭄 지속기간 및 발생시점 가중치, 경작지 면적 가중치, 지역특성 가중치 등을 총점으로 산정한 뒤 해당 지역의 예·경보 단계를 판단한 것이다.

반면 국외의 경우에는 정책 실무적인 가뭄 예·경보 연계를 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. Fontaine, Steinemann and Hayes(2014)는 미국 서부의 주 단위로 수립되는 가뭄계획과 담당자 면담을 바탕으로, 모니터링 자료를 위기관리 실무에 활용할 수 있도록 지역 여건에 맞는 가뭄 단계 판단을 개선할 것을 요구하였고, Bachmair, Stahl, Collins, Hannaford et al.(2016)은 기초과학에 기반한 가뭄지수가 가뭄의 영향을 재현하지 못해 정책 실무에 적용하기 힘든 한계점을 지적하며, 가뭄 예·경보에서 사회와 환경 간의 상호작용을 중시해야 한다고 강조하였다. 또한 Prabhakar, Knutson, Cummins and Rafindrabe(2018)은 인도, 케냐, 호주, 미국의 가뭄 대처 방식을 비교·분석하였으며 다양한 관계 기관이 참여하여 투명하고 검증 가능한 방식을 취해야 한다고 강조하였다. 이처럼 가뭄 감시와 현상에 대한 과학적 연구는 국내외 다양한 분야에서 활발히 이루어지고 있으나 우리나라에서 실무에 활용하기 위한 가뭄 예·경보 관련 정책 연구 분야는 여전히 미흡하다.

우리나라의 가뭄 관련 정책은 2015년까지 지속된 극심한 가뭄을 계기로 크게 변화하였고, 이후 통합적인 가뭄 대비·대응을 위해 노력하고 있다. 하지만 현재, 가뭄 예·경보를 실시함에 있어 부처별 소관 업무분야 구분에 따라 매월 12개의 가뭄 관련 정보를 제공하므로, 해당 지역의 가뭄 상황과 심각성을 직관적으로 이해하기 곤란한 실정이다. 즉 기상, 농업용수, 생활 및 공업용수 3개 분야에 대해 각각 현재, 1, 2, 3개월을 전망하는 12장의 지도가 보도자료로 제공되고 있다.

여러 부처가 각자 가뭄 관련 법령을 정비하고 기술

기반을 구축하는 노력을 통해 우리나라의 가뭄관리 역량은 크게 향상되었다고 할 수 있다. 그러나 가뭄 모니터링 정보를 통해 해당 지역의 여건과 가뭄의 상황에 맞춰 위기 경보 단계를 통합적으로 발령하기보다는 기상청, 농림축산식품부, 환경부 등 개별 부처가 각자의 방법으로 가뭄 예·경보를 발령하고 있다. 이러한 문제로 국민들이 가뭄의 심각성을 인지하고 상황을 판단하는 데 혼란이 가중되고 있으며, 최근 발령한 농업용수 가뭄 예·경보와 같이 실제 상황과 부합하지 않은 경우가 발생하기도 하였다. 또한 각 지자체의 담당자들이 종합적인 의사결정을 하는 데 있어 어려움을 초래하고 있다.

이에 본 연구에서는 다부처, 다기관 협동체계 구축에도 불구하고 지역 단위의 통합적인 예·경보 발령기준이 아직 정립되지 않았다는 점을 고려하여, 각 부처에서 제공하는 가뭄 발령 단계를 통합하는 가뭄 예·경보 기술을 선형적으로 연구하고자 하며, 이를 위해 부처별 가뭄 예·경보 발령 방식 및 현황을 분석하고, 통합가뭄 예·경보 기술을 개발한 뒤 실제 가뭄 현황에 적용해 보고자 한다.

II. 부처별 가뭄 예·경보 발령 방식 및 현황 분석

1. 각 부처별 가뭄 예·경보 발령 방식

우리나라의 가뭄 예·경보는 기상 가뭄, 농업용수 가뭄, 생활 및 공업용수 가뭄으로 구분되어 발령되고 있는데 기상 가뭄은 기상청, 농업용수 가뭄은 농림축산식품부 산하 기관인 한국농어촌공사, 생활 및 공업용수 가뭄은 환경부 산하 기관인 한국수자원공사에서 수행하고 있다. 각 부처별로 생산된 가뭄 현황을 행정안전부 기후재난대응과에서 종합하여 매일 발표하고 있다. 구체적으로는 기상, 농업용수, 생활 및 공업용

수별로 현재, 1개월 전망, 2개월 전망, 3개월 전망의 네 가지 시점으로 매달 총 12개의 가뭄 예·경보 지도를 발표하고 있다.

가뭄 예·경보의 단계는 초기에 주의(Yellow), 심함(Orange), 매우 심함(Red)의 세 단계로 발령되었으나 2019년 이후부터 관심(Blue), 주의(Yellow), 경계(Orange), 심각(Red)의 네 단계로 발령되고 있다. 행정안전부(2020, 24)의 발령기준을 분야별로 살펴보면 기상 가뭄은 최근 6개월 누적강수량을 이용한 표준강수지수를 기준으로, 농업 가뭄은 평년 저수율과 토양 유효수분률을 기준으로, 생활 및 공업용수 가뭄은 하천 및 수자원시설의 수위와 댐·저수지의 공급 가능성을 기준으로 예·경보 기준을 마련하고 있다.

한편, 지역적·상황적 불확실성이 높은 가뭄의 특성으로 인해 객관적 지표와 함께 주관적인 판단도 적극적으로 반영하고 있는 실정이다. 관계부처 합동(2021)에서 기상 가뭄의 경우 “기상 가뭄이 지속될 것으로 예상되는 경우”, 농업용수 가뭄은 “비영농기 저수율이 다가오는 영농기 모내기 용수 공급에 물 부족이 예상되는 경우”, 생활 및 공업용수 가뭄은 “생활 및 공업용수 부족이 일부 발생하였거나 발생이 우려되어” 등의 정성적으로 예측하는 부분이 주관적인 판단이라 할 수 있을 것이다.

2. 가뭄 예·경보 발령 현황 분석

우리나라는 2016년 3월부터 167개 지자체를 대상으로 기상, 농업용수, 생활 및 공업용수 가뭄 예·경보를 발표하고 있다. 가뭄 예·경보 도입 초기인 2016년의 경우 발령기준이 각각 다르기 때문에 이를 제외할 필요가 있다고 판단하여, 2017년 1월부터 2021년 5월까지 총 53개월의 현재시점 발령 현황을 토대로 가뭄 예·경보 현황 분석을 실시하였다(행정안전부 홈페이지).

2019년 이후 가뭄 예·경보 단계 기준이 변경됨에 따라 현황 분석에 앞서 변경된 기준을 살펴본 결과, 2019년 이전의 가뭄 예·경보 단계 기준 주의(Yellow), 심함(Orange), 매우 심함(Red)은 2019년 이후의 주의(Yellow), 경계(Orange), 심각(Red)과 매우 유사하고 여기에 약한 가뭄에 해당하는 관심(Blue) 단계가 추가된 것을 확인할 수 있었다. 이에 본 연구에서는 2019년 이전의 주의(Yellow), 심함(Orange), 매우 심함(Red)은 2019년 이후 단계 기준인 주의(Yellow), 경계(Orange), 심각(Red)과 동일하다고 가정하고 분석을 실시하였다.

1) 기상 가뭄 현황 분석

전국단위 기상 가뭄 분석 결과, 관심 347회, 주의 443회, 경계 142회, 심각 0회로 총 932회 가뭄 예·경보를 발령하였다. <Figure 1>의 (a)는 기상 가뭄의 시간적·공간적 변화를 나타내고 있으며, 2017년 중순에는 주로 남부의 많은 지역에서 경계 단계가 발령되었고 2019년에는 수도권과 충청도를 중심으로 기상 가뭄이 발생한 것으로 분석되었다.

2) 농업용수 가뭄 현황 분석

농업용수 가뭄은 관심 6회, 주의 77회, 경계 19회, 심각 0회로 총 102회 가뭄 예·경보를 발령하였다. <Figure 1>의 (b)는 농업용수 가뭄의 시간적·공간적 변화를 나타내고 있으며, 2017년 중순에는 안성, 서산, 홍성, 울주 등의 지역에서 경계 단계까지 발령되었다. 2019년도에도 일부 지역에서 가뭄 예·경보가 발령되었는데 지자체의 수와 기간을 고려해 봤을 때 경미한 수준이었던 것으로 나타났다.

3) 생활 및 공업용수 가뭄 현황 분석

생활 및 공업용수 가뭄은 관심 131회, 주의 267회, 경

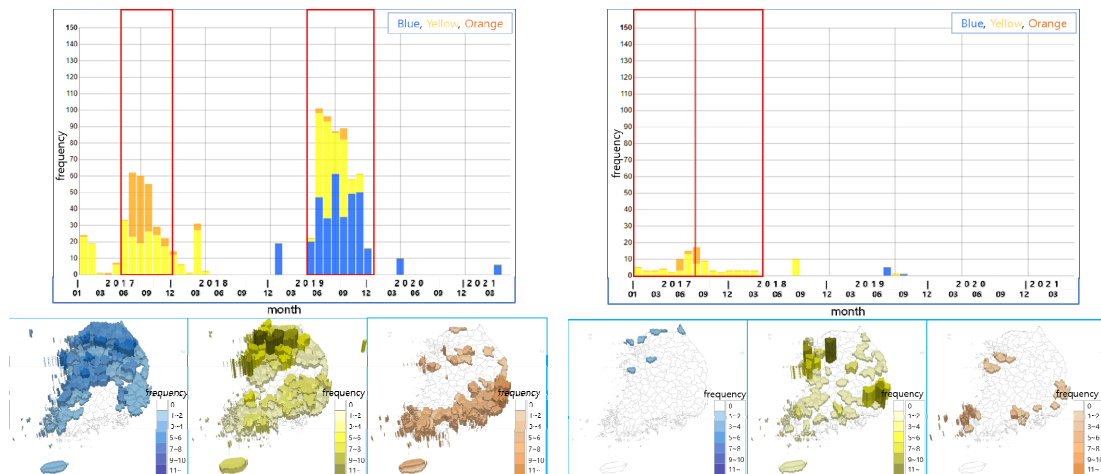
계 152회, 심각 0회로 총 550회 가뭄 예·경보를 발령하였다. <Figure 1> (c)는 생활 및 공업용수 가뭄의 시간적·공간적 변화를 나타내고 있으며, 특히 보령, 서산, 당진 등 충청남도 지역은 지속적으로 경계 단계까지의 가뭄이 발생한 것으로 나타났다. 또한 2017년에는 대구, 영천 지역에서 경계 단계까지의 가뭄이 발생했던 것으로 분석되었다.

전체적인 가뭄 현황 분석 결과를 살펴봤을 때, 기상 가뭄의 예·경보 발령 횟수가 총 932회로 다른 가뭄에 비해 많이 발령된 것으로 확인되었다. 실제 기상 가뭄은 하천 유량 및 댐 수위, 토양수분, 사회·경제 등으로 그 영향이 확대되지만 분석된 가뭄 예·경보 발령 현황에서는 이러한 특징을 확인하기 어려웠다. 이는 각 부처의 소관 분야마다 각자의 기준과 담당자 판단에 의해 가뭄 발령을 실시하고 있기 때문인 것으로 생각된다.

특히 심각 단계는 단 한 번도 발령된 적이 없었던 점이 특이사항이라 할 수 있을 것이다. 생활 및 공업용수 가뭄의 경우, 보령댐이 정상 가동되지 못했던 시기와 운문댐이 정상 가동되지 못했던 시기에 보령, 서산, 당진, 대구 등의 지역에서 용수공급에 제약이 걸려 식수 공급 문제까지 위협을 받았으나 경계 단계에서 심각 단계로 격상된 적이 없었던 것으로 분석되었다. 당시 해당지역 가뭄의 심각성을 느끼고 보령댐 도수로 사업, 금호강 비상급수시설 설치 등의 조치를 취해 가뭄 피해를 최소화하기 위한 국가의 노력이 뒷받침되었기 때문이라 생각된다.

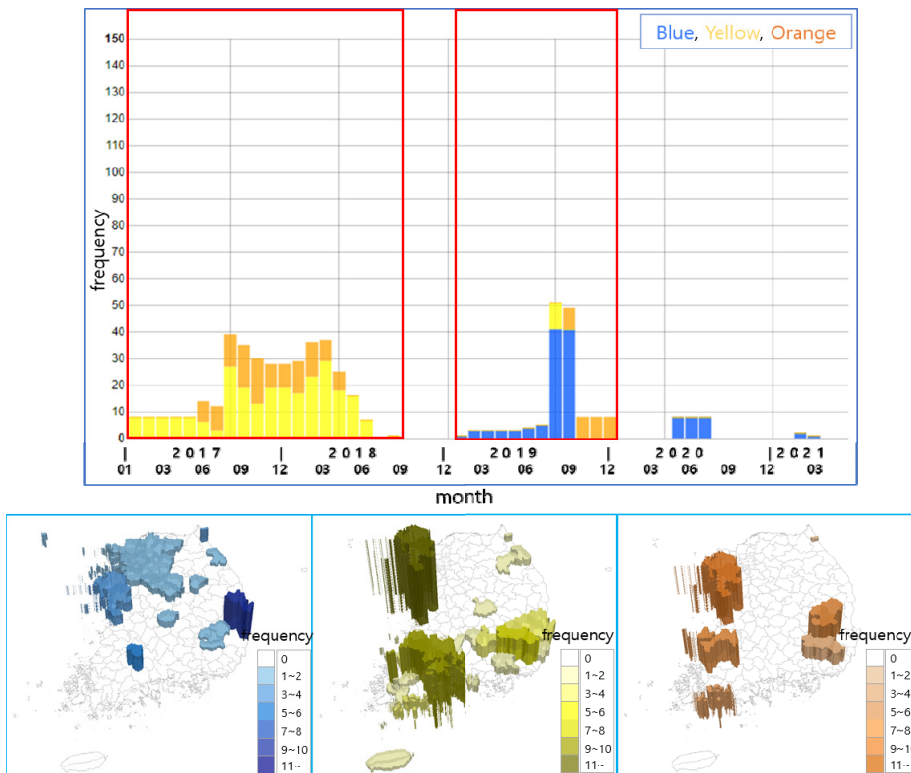
이와 같은 맥락에서 볼 때, 만약 가뭄 예·경보 발령 시 어느 한 분야에서라도 심각 단계로 발령된다면 이는 보령댐과 운문댐 상황을 넘어서는 국가적으로 중대한 사항이라고 해석할 수 있을 것이다.

Figure 1 _ Result of Monthly Drought Warning and Forecast



(a) Meteorological drought

(b) Agricultural drought



(c) Domestic & Industrial drought

Source: National Disaster Management Research Institute. 2021.

III. 통합 가뭄 예·경보 기술 개발

1. 전체 기술 개발 방향

본 연구에서 가뭄 예·경보 단계 결정은 다양한 자료를 종합한 범주형 분류의 문제로 간주하였다. 즉 통합 가뭄 예·경보 단계의 결정은 다양한 자료를 종합하여 정상, 관심, 주의, 경계, 심각한 범주형 레이블로 분류하는 클래스 분류의 문제에 해당한다고 볼 수 있다. 분류에 활용되는 일반적인 방법론은 의사결정 나무, 베이지안 분류기, 베이지안 신뢰 네트워크, 규칙기반 분류, 사례기반 추론, 퍼지기반 추론 등이 있다. 이 가운데 본 연구에서는 의미가 명확하고 클래스 분류 방법에 대한 투명한 논의가 가능해 실무에서 활용도가 높은 규칙 기반의 분류 방법을 선택하였다. 또한 이 분류 방법은 향후 전문가 시스템 구축 시 퍼지기반 추론과 접목할 수 있다는 장점이 있다. 규칙기반의 분류 방법은 과학적인 방법으로, "IF-THEN"으로 이뤄진 많은 규칙을 도출한 뒤 규칙의 집합을 활용하여 분류한다. "만약 기상 가뭄이 주의, 농업용수 가뭄이 정상, 생활 및 공업용수 가뭄이 경계라면, 통합 가뭄 예·경보는 경계 단계이다."가 그 예시라 할 수 있다. 가뭄 예·경보의 경우 기상 가뭄 5단계, 농업용수 가뭄 5단계, 생활 및 공업용수 5단계이기 때문에 총 $5^3=125$ 개의 규칙을 생성할 수 있다.

본 연구에서 제시하고자 하는 통합 가뭄 예·경보 융합기술(Rules-based Hybrid Techniques for the Drought Warning System, RHT)은 세 단계에 걸쳐 개발하고자 한다. 첫째, 법제도 근거를 검토하여 지역 유형의 구분을 실시하고, 둘째, 설문조사와 AHP 분석을 통해 통합 가뭄 심각성을 정량화하였으며, 최종적으로 심각성 정량화 분석 결과를 바탕으로 통합 가뭄 예·경보 판정을 위한 IF-THEN 규칙을 정의하여 판정 규칙을 도출하였다.

2. 지역 유형 구분

지역적 특성은 사회경제적 취약성을 의미하여 인문·사회적 또는 지리·공간적 요소 등 많은 속성들과 관련이 있다. 본 연구에서는 농업용수, 생활 및 공업용수 가뭄의 특성을 구분하기 위해 지역경제에서 농업 의존도를 다루고자 하였다. 기상학적 가뭄의 경우 지역에 따른 중요도 특성이 농업용수, 생활 및 공업용수 가뭄에 비해 큰 차이가 없을 것으로 추정됨에 반해, 농업용수, 생활 및 공업용수 가뭄은 지역의 경제구조와 관련이 있고 중요도가 크게 변할 수 있다고 판단되었기 때문이다.

지역별 농업 의존도를 판단하기 위해 경작지면적 비율, 농가인구 비율 등 다양한 통계자료의 활용이 가능하겠지만 본 연구에서는 실무에서의 활용을 높이기 위해 <Table 1>처럼 「지방자치법」 제10조와 각 시군의 「도농복합형태의 시 설치 등에 관한 법률」을 참조하여 도시형지역, 도농복합형지역, 농촌형지역으로 구분하고 통합 가뭄 판정 규칙을 차별화하는 방법을 적용하기로 하였다.

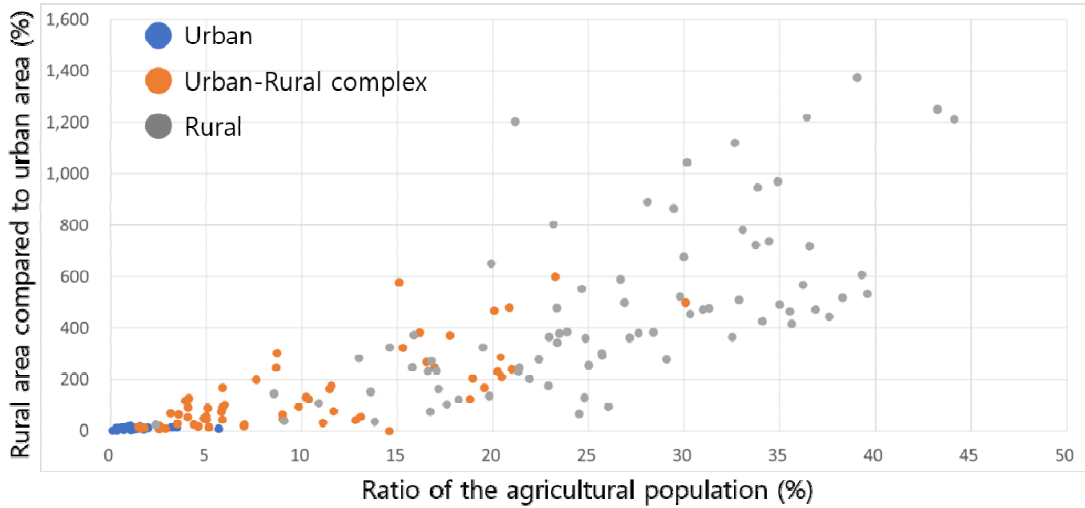
Table 1 _ Definition of Regional types Classification

Regional	Definition Used in This Paper	Note
Urban	a heavily populated municipality	Low ratio of agriculture
Urban-Rural complex	urban and rural areas coexist(Refer to the local Government Act.)	Medium ratio of agriculture
Rural	a sparsely populated rural municipality	High ratio of agriculture

Source: National Disaster Management Research Institute. 2021.

해당 구분 방법을 토대로 지자체 유형 구분이 타당하지 살펴보기 위해 경작지 면적 비율과 농가인구 비율을 활용하여 관련성을 살펴보았다. <Figure 2>와

Figure 2 _ Ratio of Agricultural Activities by Regional Types



Source: National Disaster Management Research Institute. 2021.

같이 전반적으로 지자체 유형 구분이 가능할 것이나, 추가적인 조정의 필요성도 있을 것으로 판단되었다. 향후 현 분류체계를 토대로 각 지자체 담당자의 의견을 수렴하여 추가조정을 실시하는 방향이 바람직할 것이라 판단된다.

3. 통합 가뭄 예·경보 판단의 심각성 정량화

통합 가뭄 예·경보 판단의 심각성에 대한 척도가 없기 때문에 이를 정량화하기 위해 AHP 조사를 실시하였다. 산·학·연의 가뭄 관련 분야 전문가 약 20명을 대상으로 1차 설문조사를 실시하였으며, 설문조사 응답 분석 후 큰 문제가 없음을 확인하고 추가 20명을 대상으로 2차 설문조사를 실시하였다. 응답하지 않은 1명을 제외하고 산업계 및 연구원 17명, 대학 22명으로 총 39명이 응답하였다.

설문조사는 AHP 형식으로 구성하였으며, 도시형, 도농복합형, 농촌형의 각 지역에 대해 기상 가뭄, 농업용수 가뭄, 생활 및 공업용수 가뭄 발령의 상대적

중요도를 조사하였다. 설문조사 분석 결과는 <Table 2>, <Table 3>과 같으며, 전반적으로 기상 가뭄 발령의 경우 지역특성에 큰 비중을 차지하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 도농복합형지역과 농촌형지역의 경우 기상 가뭄의 가중치가 높지 않았으며, 도시형지역의 경우에도 기상 가뭄의 가중치는 높지 않은 것으로 분석되었다.

Table 2 _ Importance of drought warnings and forecasts according to regional characteristics

Regional	Meteorological drought	Agricultural water drought	Domestic & Industrial water drought
Urban	0.31	-	0.69
Urban-Rural complex	0.18	0.35	0.47
Rural	0.20	0.63	0.17

Source: National Disaster Management Research Institute. 2021.

농업용수 가뭄은 농촌형지역의 농업 의존도가 높은 특성으로 인해 농업용수 가뭄 발령의 중요성에서 가중치가 높았으며, 생활 및 공업용수 가뭄의 경우 농

Table 3 _ Weights of drought warnings and forecasts by regional characteristics

	Urban		Urban-Rural complex		Rural	
	Geometric mean	Arithmetic mean	Geometric mean	Arithmetic mean	Geometric mean	Arithmetic mean
Meteorological drought	0.31	0.34	0.18	0.19	0.20	0.22
Agricultural water drought	-	-	0.35	0.34	0.63	0.60
Domestic & Industrial water drought	0.69	0.66	0.47	0.47	0.17	0.19
Total	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Max Eigenvalue	2.00	2.00	3.00	3.07	3.00	3.07
Consistency Index	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.03
Consistency Ratio	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.06

Source: National Disaster Management Research Institute. 2021.

촌형지역, 도농복합형지역, 도시형지역의 순서로 생활 및 공업용수 가뭄 발령의 중요성이 높은 것으로 분석되었다.

설문조사 분석 결과, 개별 가뭄의 중요도에 대한 인지수준을 잘 정량화하였다고 판단되며, 이 정량화 결과를 토대로 통합 가뭄 예·경보 판정 규칙을 도출하고자 하였다.

4. 통합 가뭄 예·경보 판정 규칙 도출

통합 가뭄 예·경보 판단 규칙을 도출하기 위해 가뭄의 심각성을 <Table 4>와 같이 100점을 기준으로 배점하였다. 여기서 X_1 은 기상 가뭄의 예·경보 단계이며, X_2 는 농업용수 가뭄의 예·경보 단계, X_3 은 생활 및 공업용수 가뭄의 예·경보 단계이다. 또한 배점은 정상(20), 관심(40), 주의(60), 경계(80), 심각(100)이다.

<Table 5>는 제시한 판정식의 예시이며, 전체적으로 봤을 때 판정의 규칙은 5가지 가뭄 단계이고 기상, 농업용수, 생활 및 공업용수 3가지 분야이기 때문에 각 지역 마다 125개, 총 375개의 판정 규칙을 1차적으로 도출하였다.

설문조사 결과를 통해 도시형지역의 경우 기상 가뭄 0.31, 생활 및 공업용수 가뭄 0.69의 가중치를, 도농복합형 지역은 기상 가뭄 0.18, 농업용수 가뭄 0.35, 생활 및 공업용수 가뭄 0.47의 가중치를, 마지막으로 농촌형 지역은 기상 가뭄 0.20, 농업용수 가뭄 0.63, 생활 및 공업용수 가뭄 0.17의 가중치를 도출하였다. 최종적으로 배점기준이 20점 이하일 경우 정상, 20점 초과 40점 이하일 경우 관심, 40점 초과 60점 이하일 경우 주의, 60점 초과 80점 미만일 경우 경계, 80보다 클 경우 심각단계로 간주하며 여기에 두 가지 예외 규칙을 적용하여 통합 가뭄 예·경보를 발령할 수 있게 된다.

Table 4 _ Discriminant and scoring criteria according to regional characteristics

Regional	Formula	Warning/Forecast Stage	Individual drought scoring criteria	Integrated drought scoring criteria
Urban	$0.31X_1 + 0.69X_3$	Normal	20	≤ 20
Urban-Rural complex	$0.18X_1 + 0.35X_2 + 0.47X_3$	Blue	40	≤ 40
		Yellow	60	≤ 60
Rural	$0.20X_1 + 0.63X_2 + 0.17X_3$	Orange	80	≤ 80
		Red	100	> 80

Source: National Disaster Management Research Institute. 2021.

<Table 5>의 Ex 1(예시 1)을 살펴보면 기상 가뭄은 관심, 농업용수 가뭄은 관심, 생활 및 공업용수 가뭄은 경계 수준의 가뭄 예·경보가 발령된 경우인데, 관련 식에 의해 도시형지역은 경계, 도농복합형지역은 주의, 농촌형지역은 주의로 통합 가뭄 예·경보가 발령될 수 있음을 나타내고 있다.

위와 같이 통합 가뭄 예·경보 판단의 심각성 정량화 결과를 기반으로 하여 1차적으로 판정 규칙을 도출하였으며, 여기에 두 가지 예외 사항을 추가로 고려하였다. 현실적인 규칙을 도출하기 위해 첫째는 기상, 농업, 생활 및 공업용수 가뭄 중 어느 한 가지가 심각 단계에 해당하면 통합 가뭄 단계도 심각으로 간주한다는 점, 둘째는 기상 가뭄만이 관심 단계일 경우 통합 가뭄 단계는 정상으로 간주한다는 점을 추가적으로 고려하였다.

제2장에서 언급한 바와 같이 개별 가뭄 예·경보 발령 시 국가적으로 심각한 피해라는 확신이 들었을 때

심각 단계로 가뭄을 발령하며, 실제 2017년 6개월 누적강수량을 이용한 표준강수지수가 -3.0 이하의 극심한 수준이 지속되었음에도 불구하고 경계 단계로 발령하였다. 또한 보령댐 도수로 사업, 금호강 비상급수시설 설치 등의 응급조치까지 시행했던 보령댐과 운문댐 고갈상황에서도 경계 단계의 발령으로 그쳤다. 이 부분에 대한 전문가의 순응도를 살펴보기 위해 설문조사를 실시하였는데 약 70% 이상의 전문가가 동의하기도 하였다. 두 번째 예외의 경우 기상 가뭄만 관심 단계로 발령되는 경우는 매우 흔하게 발생하며, 아직 사회·경제적으로 그 영향이 확대되기 이전이므로 통합 가뭄 예·경보 단계에서 정상으로 판단하고자 하였다.

도출된 통합 가뭄 예·경보 판정 규칙 가운데 도시형 지역의 경우 생활 및 공업용수 가뭄의 판정에 따라 통합 가뭄 예·경보가 발령되어 민감함을 알 수 있었다.

Table 5 _ Examples of Rules-based Hybrid Techniques

	Meteorological	Agricultural	Domestic & Industrial	Integrated drought
Urban	Blue	Blue	Orange	Orange
Urban-Rural complex	Blue	Blue	Orange	Yellow
Rural	Blue	Blue	Orange	Yellow
Urban	Orange	Yellow	Blue	Yellow
Urban-Rural complex	Orange	Yellow	Blue	Yellow
Rural	Orange	Yellow	Blue	Orange
Urban	Blue	Normal	Yellow	Yellow
Urban-Rural complex	Blue	Normal	Yellow	Yellow
Rural	Blue	Normal	Yellow	Blue

- Ex 1: (Meteorological) Blue, (Agricultural) Blue, (Domestic & Industrial) Orange
- Urban: $0.31X_1 + 0.69X_3 = 68 \rightarrow$ Integrated drought is "Orange"
 - Urban-Rural complex: $0.18X_1 + 0.35X_2 + 0.47X_3 = 59 \rightarrow$ Integrated drought is "Yellow"
 - Rural: $0.20X_1 + 0.63X_2 + 0.17X_3 = 47 \rightarrow$ Integrated drought is "Yellow"
- Ex 2: (Meteorological) Orange, (Agricultural) Yellow, (Domestic & Industrial) Blue
- Urban: $0.31X_1 + 0.69X_3 = 52 \rightarrow$ Integrated drought is "Yellow"
 - Urban-Rural complex: $0.18X_1 + 0.35X_2 + 0.47X_3 = 54 \rightarrow$ Integrated drought is "Yellow"
 - Rural: $0.20X_1 + 0.63X_2 + 0.17X_3 = 61 \rightarrow$ Integrated drought is "Orange"
- Ex 3: (Meteorological) Blue, (Agricultural) Normal, (Domestic & Industrial) Yellow
- Urban: $0.31X_1 + 0.69X_3 = 54 \rightarrow$ Integrated drought is "Yellow"
 - Urban-Rural complex: $0.18X_1 + 0.35X_2 + 0.47X_3 = 42 \rightarrow$ Integrated drought is "Yellow"
 - Rural: $0.20X_1 + 0.63X_2 + 0.17X_3 = 31 \rightarrow$ Integrated drought is "Blue"

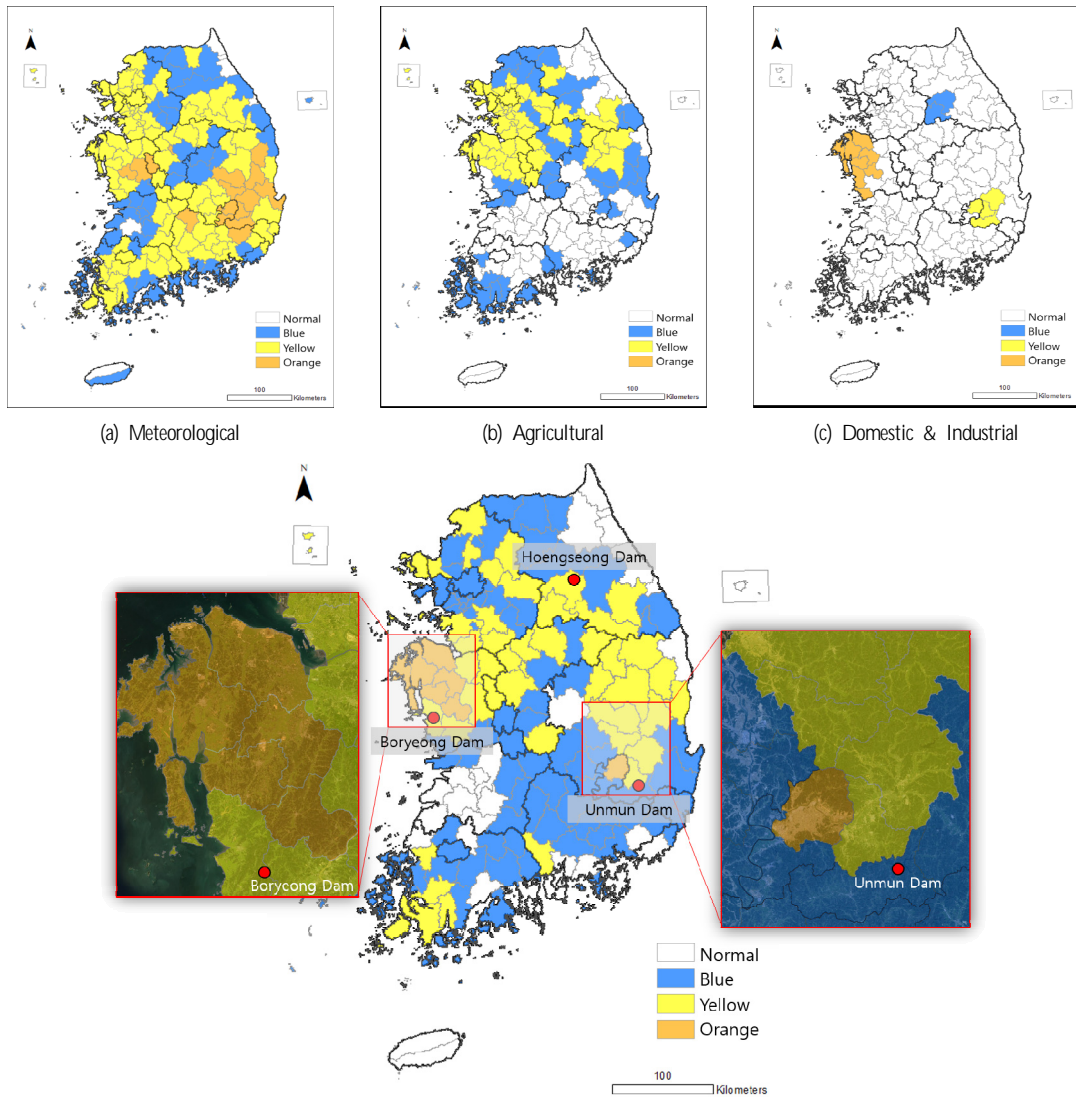
Source: National Disaster Management Research Institute. 2021.

IV. 통합 가뭄 예·경보 판단 규칙을 활용한 실제 가뭄 모의 결과

2021년 겨울부터 최근까지 전국적으로 가뭄이 심화되어 댐의 물이 마르는 등 기상 가뭄을 시작으로 농업용수, 생활 및 공업용수 가뭄이 지속되었다. 당시 기상, 농업용수, 생활 및 공업용수 가뭄은 <Figure 3>

의 (a), (b), (c)와 같으며, 특히 기상 가뭄이 전국적으로 심하게 발생하였고, 발작물과 관련된 농업용수 가뭄도 중부지방에 넓게 퍼져 발생하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 생활 및 공업용수 가뭄의 경우는 충청남도 지역과 대구, 영천 등의 지역에서 주의와 경계가 발령된 것을 확인할 수 있었다.

Figure 3 _ Result of Drought Warning/Forecast and Rules-based Hybrid Techniques (2022.06)



(d) Rules-based Hybrid Techniques for the Drought Warning System

통합 가뭄 예·경보 판단 규칙을 활용해 적용한 결과, 전국 가뭄 현황은 <Figure 3>의 (d)와 같으며, 특히 대구 지역은 기상 경계, 농업용수 관심, 생활 및 공업용수 주의로 발령되어 경계 단계로, 서산, 당진, 홍성군 등에서는 기상 주의, 농업용수 주의, 생활 및 공업용수 경계로 발령되어 경계 단계인 것으로 분석되었다. 일부 기상 가뭄만 관심으로 발령된 전라북도 일부 지역은 정상 단계로 볼 수 있었으며, 발작물과 관련된 농업용수 가뭄으로 인해 중부의 많은 도농복합형지역과 농촌형지역이 주의 단계인 것으로 분석되었다.

2022년 6월의 가뭄 발표 상황 및 단계별 대처 상황과 비교해 보면, 6개월 누적강수량이 평년의 절반 수준으로 전국에 기상 가뭄이 계속되고, 일부 지역은 발가뭄이 계속되고 있는 것으로 나타났다. 유형적 피해가 발생하여 재난대응체제가 가동되고 유관기관의 가뭄 대응이 본격적으로 시작되었다고 볼 수 있다. 특히 충남 보령댐은 도수로 가동 및 하천유지용수를 감량하고, 경북의 운문댐은 급수체계 조정을 통해 대체 공급과 하천유지용수 및 농업용수 여유량을 감량하였으며, 강원 횡성댐은 하천유지용수를 감량하는 등의 대응을 했던 것으로 나타났다. 또한 인천 중구·옹진, 전남 진도·완도 등 일부 도서·산간지역은 용수공급 제한 및 운반 급수 등의 비상 급수를 실시했던 것으로 나타났다(행정안전부 홈페이지).

가뭄 발생 지역의 행정안전부 단계별 조치 상황과 통합 가뭄 예·경보 판단 규칙 결과의 주의 및 경계 지역을 비교해 봤을 때 지자체 가뭄의 심각성 정도를 상당 부분 반영하고 있는 것으로 판단되었으며, 지역의 가뭄 심각성 정도를 한 장의 지도로 확인할 수 있었다. 하지만 개별적 단계별 조치현황과 달리 통합적인 가뭄 예·경보 발령과 관련된 액션 플랜(Action plan, 세부 계획)은 현재 부재하기에 이와 관련된 연구나 정책이 향후 필요할 것이다.

V. 결론

본 연구는 현재 부처별로 각각 발령하고 있는 총 12개의 가뭄 예·경보 정보를 하나의 정보로 제공하기 위해 선형적으로 통합 가뭄 예·경보 기술을 개발하는데 초점을 두어 연구를 진행하였다. 이를 위해 부처별 가뭄 예·경보 발령 방식을 살펴보고 실제 발령 현황을 분석한 뒤 통합 예·경보 기술을 개발하고 적용해 보았으며 결과는 다음의 세 가지로 요약할 수 있다.

첫째, 각 부처별 가뭄 예·경보 발령 방식을 살펴보고, 실제 가뭄 예·경보 현황을 분석하였다. 다소 주관적인 판단도 있으나 부처별 기준에 의해 기상, 농업용수, 생활 및 공업용수 가뭄에 대해 관심, 주의, 경계, 심각의 네 단계로 가뭄 예·경보를 발령하고 있었다. 기상 가뭄의 발령 횟수가 다른 가뭄에 비해 많이 발령된 것으로 나타났으며, 특히 세 분야에서 심각 단계의 가뭄은 단 한 번도 발령된 적이 없었던 특이점이 있었다. 보령댐이 정상 가동되지 못했던 시기, 운문댐이 정상 가동되지 못했던 시기 등 용수공급에 제약이 걸려 식수 공급 문제까지 위협받았던 경우도 경계 단계에서 심각 단계로 격상된 적이 없었다. 즉 만약 심각 단계까지 발령된다는 것은 국가적으로 중대한 사항이라고 볼 수 있을 것이며, 가뭄 피해를 최소화하기 위해 국가의 노력이 뒷받침되었다고 볼 수 있을 것이다.

둘째, 기상, 농업용수, 생활 및 공업용수 가뭄을 하나의 가뭄 예·경보 정보로 표현할 수 있는 통합 가뭄 예·경보 기술을 개발하였다. 총 12개의 가뭄 예·경보 정보를 하나의 정보로 제공하기 위해 규칙 기반의 IF-THEN 규칙을 정의하여 판정 규칙을 도출하였다. 도시형, 도농복합형, 농촌형지역으로 도시 유형을 구분하고 가뭄 예·경보 판단의 심각성을 정량화한 뒤 도시형지역 125개, 도농복합형지역 125개, 농촌형지

역 125개의 판정 규칙을 도출하였다. 이렇게 도시 유형별로 도출된 판정 규칙들은 최종적으로 지자체 담당자들과 의견을 조율한 뒤 지자체 특성에 맞는 통합 가뭄 예·경보 결과로 활용할 수 있을 것이다.

마지막으로, 활용 가능성을 판단하기 위해 최근의 가뭄 사례를 통합 가뭄 예·경보 기술에 적용해 보았다. 2022년 6월 기준 기상 가뭄이 지속되고, 일부 지역은 밭 가뭄이 생겼으며, 용수 공급을 조정하는 등 전국적으로 가뭄이 심화되어 많은 이슈가 있었다. 적용 결과, 부처별로 제공되는 가뭄 정보를 도시형, 도농복합형, 농촌형의 지역적 특성을 어느 정도 반영하는 하나의 정보로 표현할 수 있었으며, 일반 국민과 지자체 담당자에게 활용 가능성이 있을 것으로 판단되었다. 다만, 현 분류체계를 토대로 각 지자체 담당자의 의견을 수렴하여 추가조정을 실시하는 방안 등 지역 특성을 반영하는 방법은 지속적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한 가뭄 예·경보 발령이 본격적으로 시작된 지 얼마 지나지 않아 제한된 자료로부터 도출된 본 연구의 성과는 지속적으로 개선해 나갈 필요가 있을 것이다.

본 연구는 지역의 특성을 반영하여 각 부처의 가뭄 예·경보 발령 결과를 통합하기 위한 규칙을 도출하고 하나의 정보로 표현할 수 있는 기술을 개발하고 그 적용 가능성을 살펴보았다. 선행적 연구의 성향으로 통합 가뭄 예·경보 기술을 개발하였는데 이를 실무와 정책에 반영하고 고도화하기 위해서는 통계적 비교·분석, 가뭄 모니터링과의 연계, 사회적 수용성 반영 등을 접목한 연구와 유관기관과 단계별 대책을 체계적으로 정립하는 연구 등을 수행해 나가야 할 것이라 생각된다. 향후 위와 같은 연구가 지속적으로 수행된다면 가뭄 재난으로부터의 안전한 국토가 될 것이며, 효율적인 대비와 대응이 가능할 것으로 생각된다.

참고문헌 •••••

1. 관계부처 합동. 2021. 2019년 국가가뭄정보통계집. 세종: 관계부처 합동.
2. Multi-ministries Cooperative. 2021. *National Drought Information Statistics(2019)*. Sejong: Multi-ministries Cooperative.
3. 국립재난안전연구원. 2021. 국가 통합 가뭄관리기술 개발 및 추진전략 연구. 울산: 국립재난안전연구원.
4. National Disaster Management Research Institute. 2021. *Research on Development and Strategic Plan of the National Integrated Drought Management Technology*. Ulsan: National Disaster Management Research Institute.
5. 김상단, 류정수, 오국열, 정상만. 2012. 종합적인 가뭄상황판단을 위한 Copulas 기반의 결합가뭄지수의 적용. 한국방재학회 논문집 12권, 1호: 223-230.
6. Kim Sangdan, Ryu Jungsu, Oh Kukryul and Jeong sangman. 2012. An application of copulas-based joint drought index for determining comprehensive drought conditions. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 12, no.1: 223-230.
7. 소재민, 손경환, 배덕효. 2014. Copula 함수 기반의 이변량 결합가뭄지수 산정 및 평가. 한국수자원학회 논문집 47권, 2호: 171-182.
8. So Jaemin, Sohn Kyunghwan and Bae Deghyo. 2014. Estimation and assessment of bivariate joint drought index based on copula functions. *Journal of Korea Water Resources Association* 47, no.2: 171-182.
9. 신지예, 손호준, 권현한, 김태웅. 2021. Copula Bayesian networks를 활용한 수문학적 가뭄에 대한 사회경제적 인자들의 영향 평가 : 충주댐 유역을 중심으로. 한국수자원학회 2021 학술발표대회 논문집: 343.
10. Shin Jiye, Son, Hojun, Kwon Hyunhan and Kim Taewoong. 2021. Socio-economic impacts on human-modified hydrological drought using Copula Bayesian networks : a case study of Chungju Dam basin. *Korea Water Resources Association Conference of 2021*: 343.
11. 유지영, 소병진, 이주현, 김태웅. 2020. 가뭄사상의 시공간적 이동 패턴을 고려한 기상학적 가뭄에서 수문학적 가뭄으로의 전이 분석. 대한토목학회 논문집 40권, 2호: 135-143.
12. Yoo Jiyoung, So Byungjin, Lee Jooheon and Kim Taewoong. 2020. Analysis of drought propagation from meteorological

- to hydrological drought considering spatio-temporal moving pattern of drought events. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 40, no.2: 135-143.
13. 윤현철, 이지현, 최창원, 원창희, 황주하, 김미정, 조현승, 김원범, 전우열. 2020. 지역 맞춤형 통합 가뭄정보 평가기술 개발. 울산: 국립재난안전연구원.
 14. Yoon hyuncheol, Lee chiheon, Choi Changwon, Hwang Jooha, Kim Mijung, Jo Hyunseong, Kim Wonbum and Jun wooyeol. 2020. *The Development of Integrated Drought Information Assessment Technique for Regional Customization*. Ulsan: National Disaster Management Research Institute.
 15. 행정안전부. 2020. 「가뭄 재난」 위기대응 실무매뉴얼. 세종: 행정안전부.
 16. MOIS. 2020. *Drought Disaster, Crisis Response Practical Manual*. Sejong: MOIS
 17. 행정안전부 홈페이지. <http://www.mois.go.kr> (2021년 9월~2022년 7월 검색).
MOIS Homepage. <http://www.mois.go.kr> (accessed September, 2021~July, 2022).
 18. Bachmair, S., Stahl, K., Collins, K., Hannaford, J., Acreman, Mike., Svoboda, M., Knutson, C., Smith, K. H., Wall, N., Fuchs, B., Crossman, N. D. and Overton, I. C. 2016. Drought indicators revisited: the need for a wider consideration of environment and society. *WIREs Water* 2016, 3, no.4: 516-536.
 19. Fontaine, M., Steinemann, A. and Hayes, M. 2014. State drought programs and plans: Survey of the Western United States. *Natural Hazards Review* 15, no.1: 95-99.
 20. Prabhakar, S.V.R.K., Knutson, C., Cummins, J. and Rafindrabe, B.H.M. 2018. Decision making for responding to drought: Ensuring they are driven by objective assessment of drought. In Madu, C.N. and Kuei C. *Handbook of Disaster Risk Reduction & Management*, 539-562. Singapore: World Scientific Books.
 21. Shah, D. and Mishra, V. 2020. Integrated Drought Index (IDI) for drought monitoring and assessment in India. *Water Resources Research* 56, no.2, e2019WR026284.
 22. Won Jeongeun, Choi Jeonghyeon, Lee Okjeong and Kim sangdan. 2020. Copula-based Joint Drought Index using SPI and EDDI and its application to climate change. *Science of The Total Environment* 744: 140701.
-
- 논문 접수일: 2022. 7. 20.
 - 심사 시작일: 2022. 8. 3.
 - 심사 완료일: 2022. 9. 12.

요약

주제어: 가뭄 단계, 가뭄 예·경보, 규칙 기반 결정, 대비 및 대응

최근 기후변화로 인해 국토 전반에 걸쳐 가뭄이 빈번히 발생하고 있으며, 우리나라는 2016년부터 체계적으로 가뭄 예·경보를 시행하고 있다. 행정안전부가 가뭄 총괄·조정 역할을 맡고 있으며, 기상청은 기상 가뭄, 농림축산식품부는 농업용수 가뭄, 환경부는 생활 및 공업용수 가뭄을 담당하고 있어 다양한 부처가 관계되어 있다. 하지만 다부처, 다기관 협동체계 구축에도 불구하고 개별 부처가 각자의 방법으로 가뭄 예·경보를 발령하여 매달 12개의 가뭄 정보 및 지도가 제공되고 있다. 이러한 문제로 인해 국민과 지자체 담당자들은 가뭄의 심각성에 대한 인지와 상황 판단을 하는데 혼란이 가중되고 있다. 이에 본 연구에서는 각 부처에서 제공하는 가뭄 발령 단계를 기반으로 통합 가뭄 예·경보 기술을 개발하여 하나의 가

뭄 정보를 제공하고자 하였다.

통합 가뭄 예·경보 기술은 세 단계에 걸쳐 개발되었는데 법제도 근거를 검토하여 지역 유형의 구분을 실시하고, 설문조사와 AHP 분석을 통해 통합 가뭄의 심각성을 정량화하였으며, 최종적으로 통합 가뭄 예·경보 기술을 개발 및 적용하였다.

개발된 기술을 2022년 6월 가뭄에 적용한 결과, 지역적 특성을 반영한 하나의 정보로 표현할 수 있었으며, 이는 일반 국민과 지자체 담당자에게 활용 가능성이 있다고 판단되었다. 이를 실무와 정책에 적극적으로 활용하기 위해서는 지속적인 연구가 필요할 것으로 생각되나, 본 연구의 결과는 가뭄 재난으로부터의 효율적인 대비와 대응에 활용 가능할 것으로 판단된다.