

## 3차원 가뭄지도를 활용한 시공간적 가뭄 특성 변화 분석

유지영\* · 김장경\*\* · 권현한\*\*\* · 김태웅\*\*\*\*

Yoo, Jiyoung\* · Kim, Jang-Gyeong\*\* · Kwon, Hyun-Han\*\*\* · Kim, Tae-Woong\*\*\*\*

### Analysis of Changes of Spatio-Temporal Drought Characteristics Using Three-Dimensional Drought Maps

#### ABSTRACT

In order to understand the characteristics of natural droughts, it is very important to interpret the spatio-temporal relationship between different types of droughts. In this study, meteorological and hydrological drought events were defined to account for the overlap between drought duration and spatial extent in three dimensions (i.e., latitude, longitude, and timing). In other words, the spatio-temporal drought propagation characteristics were analyzed based on the drought characteristic factors (duration, area, depth, center). The drought map considering the characteristics of spatio-temporal drought propagation can be used to find the fundamental cause of the hydrological drought which is expected to frequently occur in the future. In addition, the drought map is expected to be useful in preparing an effective drought response plan.

**Key words :** Three-dimensional drought map, Hydrological drought, Meteorological drought, Spatio-temporal analysis

#### 초록

자연적인 가뭄의 발생특성을 이해하는 데 있어서는 서로 다른 유형의 가뭄 사이의 시공간적 관계를 해석하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 가뭄 지속시간과 3차원(즉, 위도, 경도 및 시간)의 공간 범위가 겹치는 것을 고려하여 기상 및 수문학적 가뭄사상을 정의하고 전이특성을 해석하였다. 이는 시공간적 가뭄 특성인자(지속시간, 면적, 심도, 중심)를 기반으로 하여 가뭄의 공간적 재현특성과 더불어 시간이라는 연속적인 개념을 결합한다는 것을 의미한다. 이처럼 개발된 시공간적 가뭄전이 특성을 고려한 가뭄지도는 향후 국지적으로 빈번히 발생하는 수문학적 가뭄의 발생 원인을 발견하고, 가뭄에 대한 효율적인 대응방안을 마련하는 데 활용도가 매우 높을 것으로 기대된다.

**검색어 :** 3차원 가뭄지도, 수문학적 가뭄, 기상학적 가뭄, 시공간적 해석

## 1. 서론

자연적으로 발생하는 가뭄은 시간 및 공간적으로 영향이 확장되는 특징이 있고, 이는 시간변화에 따라 농업적 및 수문학적 가뭄으로 이어져 순차적인 가뭄피해를 야기할 수 있다. 우리나라와 같은 계절적 특성이 분명한 경우에는 건조시기에 발생한 가뭄(우리나라의 경우는 대략 6월 이전)은 여름철 장마와 태풍으로 인한 충분한 강수로 인해 대부분 해결된다. 다만, 충분한 강수가 발생해야 하는 시기에 적절하게 강수량이 확보가 되지 않을 경우(마른장마 또는 태풍으로 인한 강수량이 충분하지 않을 경우)에는 실질적인 수자원

\* 종신회원 · 한양대학교(ERICA) 건설환경공학과 연구교수, 공학박사 (Hanyang University (ERICA) · jyyoo84@gmail.com)

\*\* 베이저안웍스 대표 공학박사 (Bayesianworks Research Institute · kjk2388@gmail.com)

\*\*\* 종신회원 · 세종대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사 (Sejong University · hkwon@sejong.ac.kr)

\*\*\*\* 종신회원 · 교신저자 · 한양대학교(ERICA) 건설환경공학과 교수, 공학박사

(Corresponding Author · Hanyang University (ERICA) · twkim72@hanyang.ac.kr)

Received November 20, 2019/ revised December 30, 2019/ accepted January 14, 2020

확보에 어려움이 발생하여 극한 가뭄피해를 초래할 가능성이 있다.

따라서 가뭄에 대한 시기적절한 대응을 위해서는 가뭄의 발생특성을 시공간적으로 고려한 가뭄의 전이 현상을 해석할 필요가 있다. 국내의 선행연구에서는 가뭄 전이특성을 해석하기 위한 시간적 지체현상과 관련한 연구가 다수 진행되었으나, 가뭄을 공간적인 영역으로 확장한 전이특성 분석 연구는 미비한 실정이다. 일반적으로 가뭄의 전이는 다양한 수문변량의 평균에 대한 차이를 비교하면서 개념이 정립되었다(Changnon, 1987; Eltahir and Yeh, 1999). 이러한 가뭄의 전이특성은 발생하는 계절 및 원인에 따라 차이가 발생할 수 있으며(Peters, 2003), 최근 선행연구에서는 시계열 변화에 따른 가뭄 전이를 크게 4가지 특성(폴링, 감소, 지체, 연장)으로 구분하여 분석한다(Van Loon, 2015).

최근 우리나라에서도 가뭄 전이와 관련한 연구가 점차 진행되고 있다. 특히, 가뭄의 전이해석을 통해 파악된 지체시간을 이용하여 가뭄을 전망하는 데 있어 예측 변량으로 활용이 가능해졌고(Shin et al., 2017), 더불어 홍수기 및 태풍의 영향에 따라 기상학적 가뭄이 농업적 가뭄으로 전이되는 데 있어 약 1개월의 지체시간이 소요된다는 것이 밝혀졌다(Yu et al., 2018). 또한, Sattar(2019)는 우리나라는 가뭄전이에 따른 지체시간 및 발생확률이 공간적으로 다르게 나타나는 것을 발견하였다. 즉 지역별 가뭄 완화 대책을 위해서는 시공간적 가뭄의 전이 특성에 대한 분석이 필요하다는 것을 강조하였다.

Yoo et al.(2019)은 자연에 의한 가뭄은 시간과 공간에서 동시에 진화하는 3차원적 현상이라는 점을 감안하여 우리나라 가뭄의 시공간적 이동패턴을 분석한 바 있다. 또한 Yoo et al.(2020)은 3차원적 측면에서 기상학적 가뭄을 재현하였다. 6개월 누적 강수량을 고려하여 산정된 SPI6을 활용하는 경우 우리나라의 연강수량 특성을 재현하는 데 효과적임을 보여주었다. 따라서 본 연구에서는 기상학적 및 수문학적 가뭄 간의 연관성을 평가하기 위해 6개월 누적 강수량과 유출량을 활용하여 3차원적 관점에서 가뭄사상을 해석하고자 한다. 이를 위해 (i) 기상 및 수문학적 가뭄사상의 특성을 추출하기 위하여 3차원적 개념을 적용하고, (ii) 두 가지 가뭄 유형 사이의 연계해석을 위하여 Liu et al.(2019)이 제안한 방법을 활용하고, (iii) 기상에서 수문학적 가뭄으로의 전이 과정을 고려하여 개발한 가뭄지도를 기반으로 시공간적 가뭄 특성의 변화를 해석하였다.

## 2. 분석자료 및 연구방법

본 연구에서는 우리나라 112개 중권역별 기상학적 가뭄과 수문학적 가뭄을 정의하기 위해, 1983년부터 2014년까지의 6개월 누적 강수량과 유출량 자료를 이용하여 표준강수지수(Standardized

Precipitation Index, SPI6)와 표준유출지수(Standardized Runoff Index, SRI6)를 산정하였다. 중권역별 강수량은 기상청의 (유인)종합기상관측장비(Automated Synoptic Observing System, ASOS) 및 자동기상관측장비(Automatic Weather Station, AWS)로 관측된 지점 강수량 자료를 디센지증법에 의해 산정한 유역 평균 강수량이며, 중권역별 유출량은 유역 평균 강수량을 집중형 강우-유출모형인 탱크모형에 적용하여 산정한 것으로 2000년, 2006년 및 2011년 수자원장기종합계획 수립 및 보완/수립 과정에 적용된 것이다.

### 2.1 3차원 가뭄사상의 정의

3차원적 가뭄사상의 정의는 Andreadis et al.(2005)이 제안한 간단한 클러스터링 알고리즘을 기반으로 한다. 본 연구에서는 Yoo et al.(2019)에서 적용한 3차원(위도, 경도, 시간) 관점의 가뭄특성을 이용하여 두 가뭄 유형(기상학적 가뭄과 수문학적 가뭄)에 대한 가뭄사상을 추출하였다. Fig. 1(a)과 같이 3차원 관점에서 가뭄특성을 구분하면 시공간적으로 연속된 하나의 가뭄사상에 대한 지속기간(duration) 및 심도(severity)에 대한 정의가 가능하다. 또한, Fig. 1(b)과 같이 각 가뭄기간 내 월별 최대 가뭄심도가 나타난 위치를 가뭄 중심(centroid)으로 정의하였다.

### 2.2 가뭄전이 개념

일반적으로 기온 증가 및 강수량 부족으로 인해 발생하는 기상학적 가뭄은 시간이 지남에 따라 토양수분의 부족에 영향을 미치고, 수문학적인 측면에서의 유출량 감소로 인한 가뭄 전이현상이 발생할 수 있다. 이러한 관점에서 기상학적 및 수문학적 가뭄의 발생에 관한 시간적 순서를 감안하여, 두 가뭄 유형간의 상호 연관성을 해석하는 과정은 매우 중요한 연구이다.

본 연구에서는 Liu et al.(2019)을 참고하여 두 가뭄 유형(기상학적 및 수문학적 가뭄) 사이에 시간적 중복(overlap time)과 더불어 공간적 중복(overlap space)이 발생한 경우를 두 가뭄 유형 간의 연계성이 존재하는 것으로 판단하였다. 다시 말해, 수문학적 가뭄의 발생 원인이 기상학적 가뭄이라면, 두 가뭄은 시공간적인 중복과 동시에 상호간의 전이관계가 있다는 의미로 해석이 가능하다.

즉, 시공간적인 가뭄의 전이관계를 판단하기 위해서는 두 가지를 검토해야 한다. 첫 번째로는 수문학적 가뭄이 발생한 지속기간 내에 중첩적으로 발생한 기상학적 가뭄의 발생여부를 판단하여 수문학적 가뭄과 기상학적 가뭄의 시간적 중복을 검토한다. 이는 수문학적 가뭄이 시작하기 이전 시점에 발생한 기상학적 가뭄이 수문학적 가뭄으로 전이되는 특성을 보였음을 검토하는 것이다. 두 번째로는 두 가뭄 유형에 대한 공간적 중복을 추가로 검토하여 시공간적인 전이특성을 최종적으로 결정하는 것이다. 이를 통해

두 가뭄 유형은 하나의 쌍으로 상호연계하여 해석하는 것이 가능하다. 두 가뭄 유형간의 전이 특성은 하나의 수문학적 가뭄에 전이 영향을 미치는 기상학적 가뭄사상이 오직 한개 뿐인 일대일(단일(single) 연계특성)인 경우와 하나의 수문학적 가뭄에 전이 영향을 미치는 기상학적 가뭄사상이 한 개 이상인 일대다(복합(complexity) 연계특성)인 경우로 구분된다.

### 3. 3차원 가뭄지도와 시공간적 가뭄 전이 분석

#### 3.1 기상학적 및 수문학적 가뭄의 특성 분석

본 연구에서는 다음과 같은 순서로 두 가지 가뭄 유형에 대한 3차원 개념의 가뭄사상을 각각 추출하였다. 첫 번째 단계는 월

단위 시간 간격마다 가뭄지수(SPI6, SRI6)의 값이 보통가뭄 판단기준(임계값, -1.0) 이하인 지역을 “가뭄상태”로 정의했다. 그 후 공간 연속성의 원리를 기반으로 하여, 인접한 지역이 “가뭄상태”인 경우에 대한 간단 클러스터링 과정을 거쳐 3차원적 가뭄사상을 추출하였다(Yoo et al., 2019). 그 결과, 3차원 개념으로 추출된 기상학적 및 수문학적 가뭄사상의 특성은 Table 1과 같다.

본 연구에서 추출된 기상학적 가뭄사상은 총 25개이며, 전체 평균 가뭄 지속기간은 약 5.04개월이며, 평균 가뭄 심도는 -373이다. 기상학적 가뭄 중 최대 가뭄 지속기간과 심도가 나타난 가뭄사상은 1988년 2월부터 발생하여 1989년 1월까지 12개월 동안 지속된 가뭄이다. 이때 우리나라 전체 면적 중 73.25 (%)는 가뭄상태였으며, 해당 가뭄 지속기간 내 누적 가뭄 심도는 약 -1708로 나타났다.

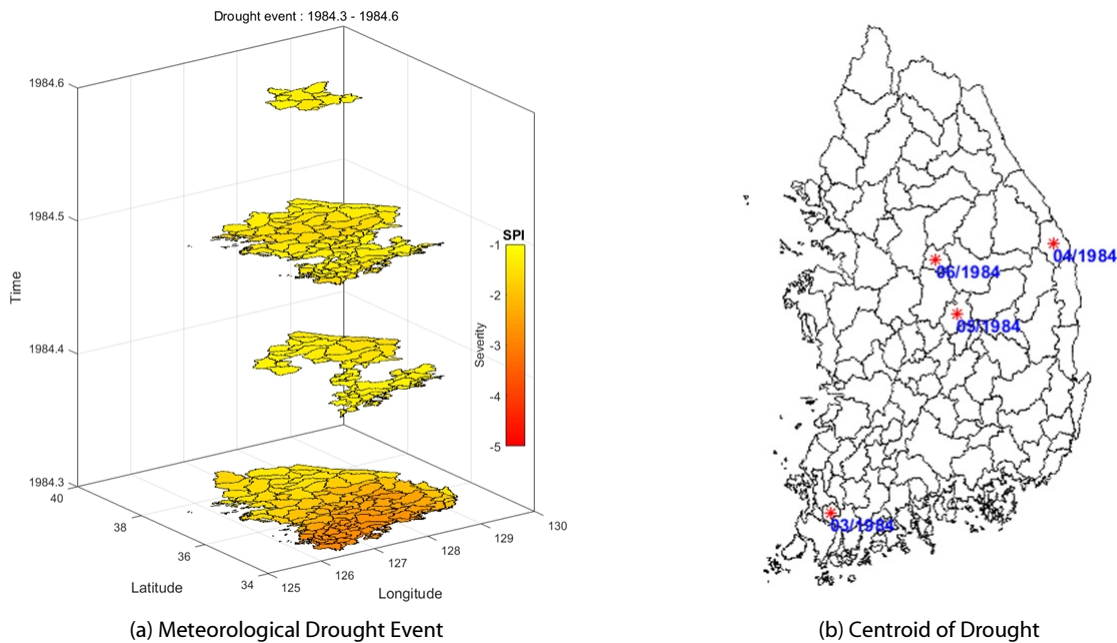


Fig. 1. Definition of Three-Dimensional Drought Event using a Simple Clustering Algorithm

Table 1. Basic Statistics of Three-Dimensional Drought Events Identified by SPI6 and SRI6

		Meteorological drought	Hydrological drought
Number of drought events		25	34
Duration (months)	Mean	5.04	5.74
	Max	12 (1988.02-1989.01)	30 (1993.12-1996.05)
Severity (-)	Mean	372.7	270.2
	Max	1707.8 (1988.02-1989.01)	2476.7 (1993.12-1996.05)
Area (%)	Mean	40.3	18.9
	Max	73.25 (1988.02-1989.01)	58.2 (1988.03-1989.02)

이는 112개 구역에서 12개월 동안 누적된 가뭄 심도로써, 가뭄 지속기간(12개월) 내내 112개 모든 구역에서 보통가뭄 상태(SPI=-1.27)가 지속된 것으로 해석된다(Table 1 참고). 또한, 추출된 수문학적 가뭄사상은 총 34개이며, 전체 평균 지속기간은 약 5.74개월, 평균 가뭄 심도는 -270이다. 수문학적 가뭄 중 최대 가뭄 지속기간과 심도가 나타난 가뭄사상은 1993년 12월부터 발생하여 1996년 5월까지 30개월 동안 지속된 가뭄이다. 이때 해당 가뭄 지속기간 내 누적 가뭄 심도는 약 -2477로 나타났고, 이는 112개 구역에서 30개월 동안 누적된 가뭄 심도로써, 가뭄 지속기간(30개월) 내내 112개 모든 구역에서 SRI가 약 -0.74인 가뭄상태가 지속된 것으로 해석된다.

또한, 최대 가뭄 면적이 확인된 시점은 1988년 3월부터 발생하여 1989년 2월까지 12개월 지속된 가뭄이며, 우리나라 전체 면적 중 58.2 (%)는 가뭄상태였다. 더불어 기상학적 가뭄과 수문학적 가뭄의 발생특성을 비교해 본 결과 평균적으로 기상학적 가뭄에 비해 수문학적 가뭄의 발생면적이 다소 적게 나타나는 것을 확인할 수 있다(Table 1 참고). 이는 수문학적 가뭄은 기상학적 가뭄에 비해 국소면적으로 발생하는 특성이 있는 것으로 해석된다.

Fig 2는 두 가뭄 유형별로 추출된 가뭄사상에 대한 가뭄 발생특성(가뭄 지속기간과 심도)에 대한 공간분포를 나타낸다. 다시 말해, 3차원 가뭄정의에 따르면 개별 구역마다 서로 다른 시작 및 종료 시간을 갖게 되며, 최종적으로 각 구역별 가뭄 지속기간과 심도의

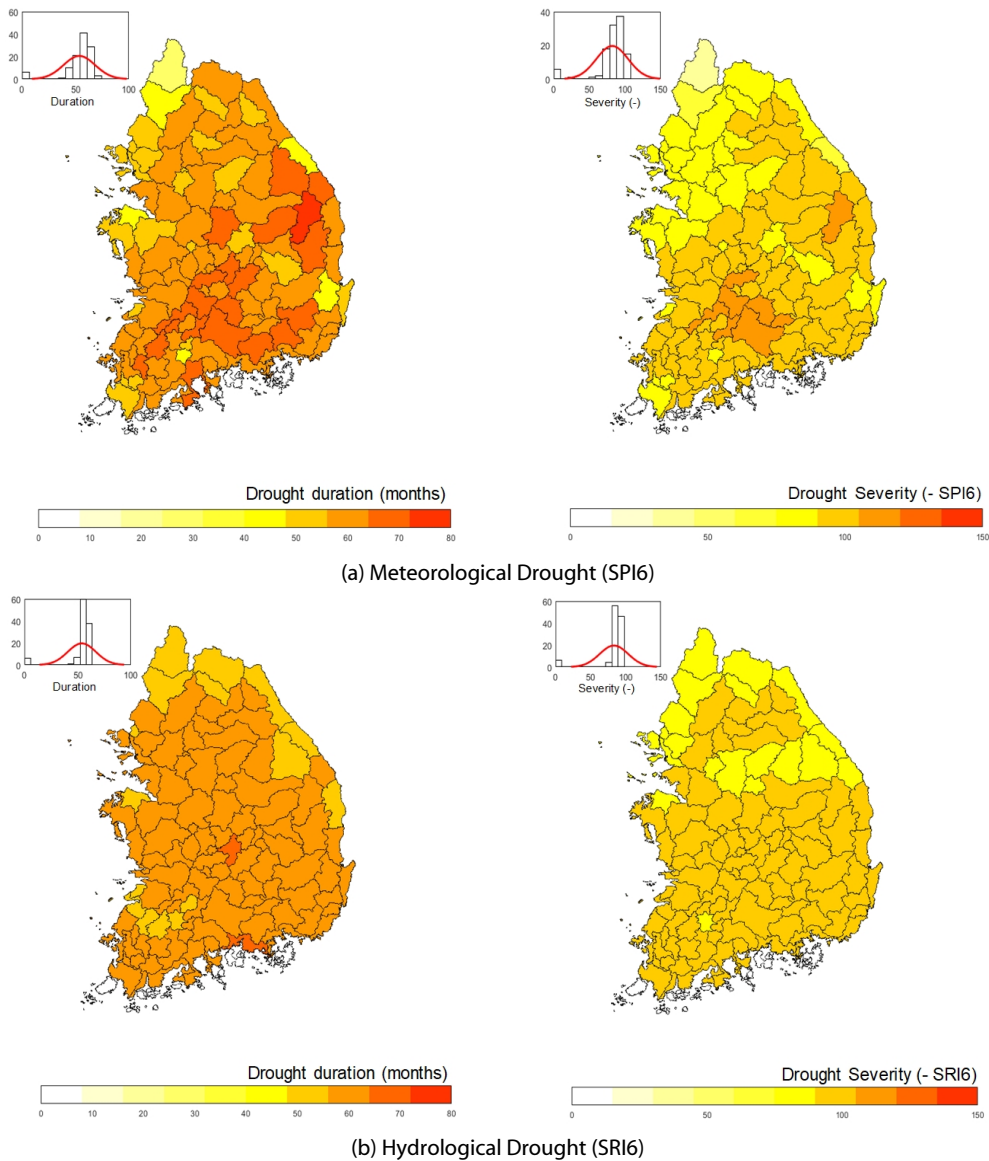


Fig. 2. Spatio-Temporal Patterns of Drought Duration and Severity using SPI6 and SRI6

발생특성은 서로 상이한 공간분포를 갖게 된다. 두 가뭄 유형을 비교해 보면 기상학적 가뭄이 수문학적 가뭄보다 가뭄의 지속기간이 큰 지역이 전반적으로 많은 것을 확인할 수 있다. 반면, 가뭄의 심도의 경우에는 수문학적 가뭄이 기상학적 가뭄에 비해 극한 누적심도의 범위(-80에서 -100 사이)에서의 발생빈도가 크게 나타나는 것으로 확인되었다.

### 3.2 가뭄지도를 활용한 시공간적 가뭄전이 특성 분석

본 연구에서는 두 가뭄 유형 간의 발생 시간적 순서에 따른 상호 전이특성을 해석하기 위한 목적으로 기상학적 가뭄과 수문학적 가뭄의 연계 특성 평가가 가능한 가뭄지도를 개발하였다. 전체 수문학적 가뭄사상(총 34개) 중에서 50 %의 비율은 기상학적 가뭄사상에 영향을 받은 것으로 확인되었다. 더불어 앞에서 언급한 가뭄 전이의 연계 특성 중에서 단일특성으로 구분된 가뭄 쌍은 총 16개(94 % 비율)로 확인되었으며, 복합특성으로 구분된 가뭄 쌍은 유일하게 1개(6 %)로 구분되었다. Fig. 3은 단일특성으로 구분된 가뭄사상 중 최근 2014년에 발생한 가뭄을 도시한 것이며, Fig. 4는 복합특성으로 구분된 가뭄사상에 대한 전이특성 확인이 가능한 가뭄지도이다.

Fig. 3(b)에 따르면 2014년 6월에 수문학적 가뭄사상이 발생하였고, 해당 가뭄사상은 7개월 동안 지속된 것으로 나타난다. 해당 기간 내 시공간적으로 가뭄 전이특성에 연계성이 있다고 구분된 기상학적 가뭄사상은 2014년 5월에 시작하여 8개월이 지속되었다(Fig. 3(a) 참고). 이처럼 두 가뭄 유형 간의 시공간적인 전이특성을

해석하는 데 있어, 가뭄지도를 기반으로 가뭄 모니터링을 수행할 경우, 수문학적 가뭄에 영향을 미친 기상학적 가뭄의 발생 지역 및 기간에 대한 파악이 가능하다. 또한, 가뭄지도에 따르면 2014년에 발생한 수문학적 및 기상학적 가뭄은 대체로 한강유역 내에서 가뭄의 중심이 발견되었다. 더불어 누적된 가뭄심도를 살펴본 결과, 남부지역과 비교하여 중북부지역의 가뭄 심도는 매우 크게 나타나 극한 가뭄이 발생한 지역에 대한 구분이 가능하다.

Fig. 4는 기상학적 가뭄과 수문학적 가뭄의 연계성 검토 결과 복합특성으로 구분된 가뭄 쌍에 대한 가뭄지도 결과이다. Fig. 4의 좌측 상단의 그림은 지난 1993년 12월부터 시작되어 30개월 동안 지속된 수문학적 가뭄을 나타내고 있다. 전체 30개월의 가뭄 지속기간 내 누적된 가뭄 심도와 더불어 가뭄의 중심이 발생한 위치를 복합적으로 살펴본 결과, 해당 가뭄은 남부지역에서 극심한 수준의 가뭄이 발생한 것이 확인된다. Fig. 4에서 나머지 5개의 가뭄지도는 해당 수문학적 가뭄에 시공간적으로 영향을 미쳤던 기상학적 가뭄을 보여주고 있다. 즉, 장기적으로 발생한 수문학적 가뭄과 연계성이 있다고 확인된 기상학적 가뭄은 총 5개로 나타났으며, 이 중 첫 번째 기상학적 가뭄은 1993년 9월에 시작하여 6개월 지속한 사상이며, 두 번째 기상학적 가뭄은 1994년 5월에 시작하여 10개월 지속한 사상이다. 세 번째 기상학적 가뭄은 1995년 4월에 시작하여 4개월 지속한 사상이고, 네 번째 기상학적 가뭄은 1995년 8월에 시작하여 4개월 지속한 사상이다. 마지막 다섯 번째 기상학적 가뭄은 1996년 1월에 발생하여 5개월 지속한 사상이다.

이처럼 장·단기적으로 발생한 다양한 기상학적 가뭄은 지난

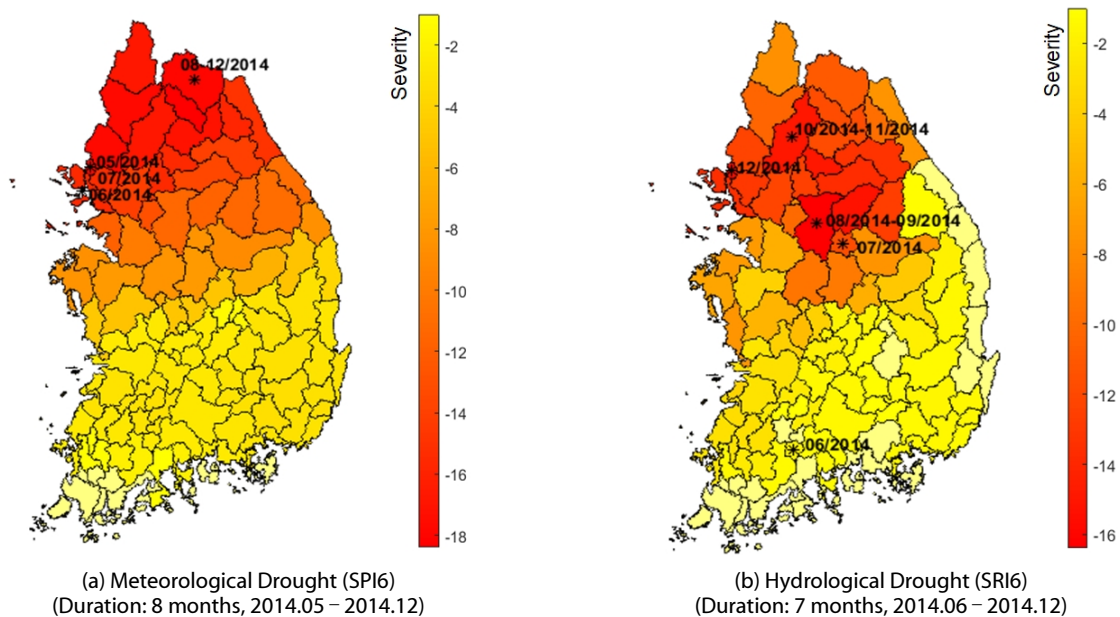


Fig. 3. Spatio-Temporal Drought Propagation and Accumulated Drought Severity for Single Category



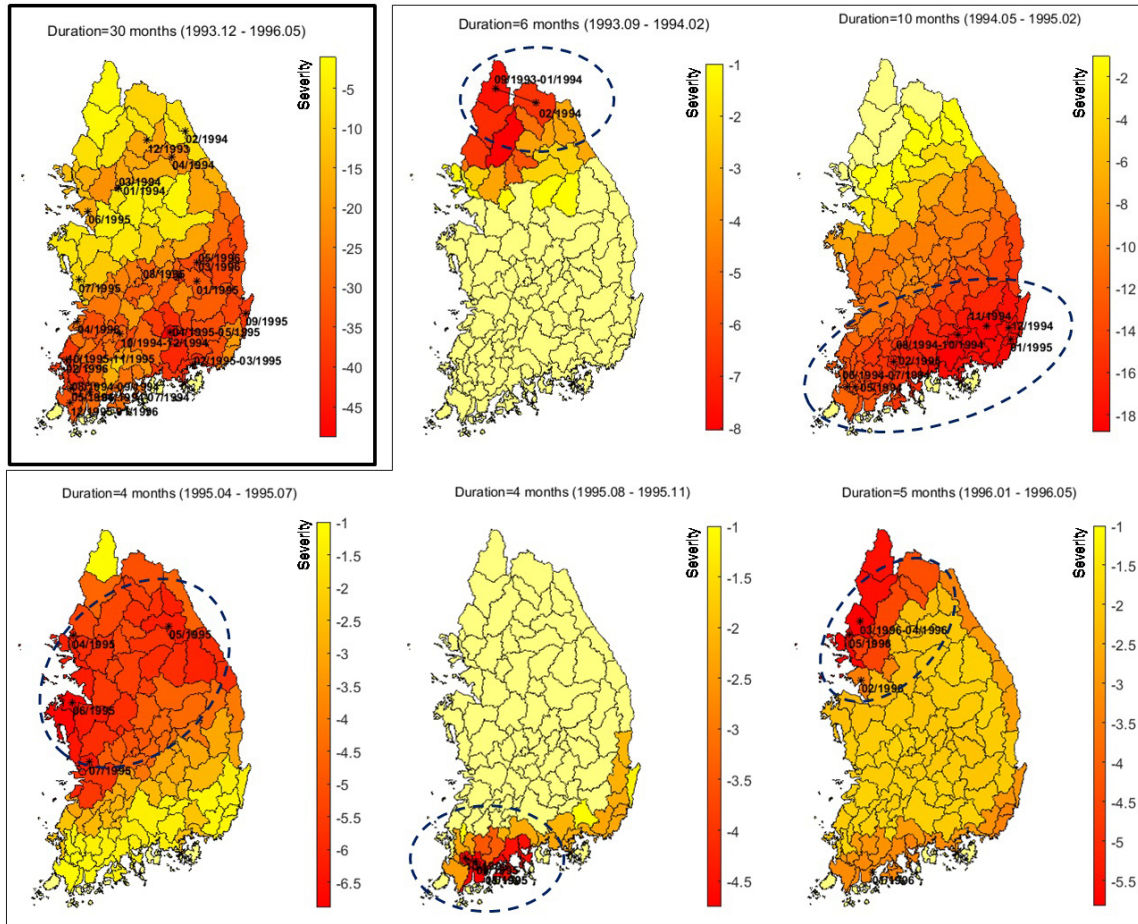


Fig. 4. Spatio-Temporal Drought Propagation and Accumulated Drought Severity for Complexly Category

30개월 동안 지속한 수문학적 가뭄이 장기적으로 발생한 것과 밀접한 관계가 있는 것을 확인할 수 있다. 즉, 수문학적 가뭄이 남부지역에서 극심한 수준의 가뭄으로 나타난 이유는 1994년 5월에 시작하여 10개월 지속한 두 번째 기상학적 가뭄에 크게 영향을 받은 결과로 해석된다. 두 번째 기상학적 가뭄이 발생한 기간 내 가뭄 중심의 위치는 대부분 남부지역이었다. 또한, 가뭄지도 내 누적 가뭄 심도에 따른 극한값(범례 참고)을 비교한 결과, 남부지역에서 누적된 최대 범위의 가뭄 심도가 발생한 것으로 확인된다. 또한, 수문학적 가뭄의 중심이 북부지역에서 가뭄 발생 초기에 발생한 이유는 1993년 9월에 시작하여 6개월 지속한 첫 번째 기상학적 가뭄에 영향을 받은 것으로 확인된다. 이처럼 1993년 가을에 지속하여 이듬해 겨울까지 연속된 기상학적 가뭄은 약 3개월의 지체시간에 거쳐 수문학적 가뭄에 영향을 미친 것으로 확인된다. 이러한 가을 및 겨울철 강수량 부족으로 인해 발생하는 기상학적 가뭄은 향후 수문학적 가뭄으로 시공간적인 전이 가능성이 충분하다는 의미로 해석된다.

#### 4. 토의 및 결론

본 연구에서는 기상학적 가뭄과 수문학적 가뭄과의 시공간적 전이특성 분석을 위하여, 3차원 개념에서 가뭄을 정의하고 수문학적 가뭄에 영향을 미치는 기상학적 가뭄을 해석하였다. 즉 기상학적 가뭄지수(SPI6)와 수문학적 가뭄지수(SRI6)를 이용하여 3차원 개념에서의 가뭄을 판단하였다. 그 결과, 두 가뭄 유형(기상학적 가뭄과 수문학적 가뭄)별 가뭄 특성인자(가뭄의 지속기간, 심도, 면적, 중심 등)에 대한 정량적 평가가 가능하였다. 두 가뭄 유형 중 평균적인 가뭄 지속기간이 크게 나타난 것은 수문학적 가뭄이며, 평균적인 가뭄 심도가 크게 나타난 것은 기상학적 가뭄으로 확인되었다. 또한, 평균적인 가뭄발생 면적의 비율은 기상학적 가뭄에서 크게 나타났으며, 두 가뭄 유형의 발생면적의 평균적 특성을 비교한 결과, 기상학적 가뭄으로 인한 발생면적은 수문학적 가뭄에 비해 약 2배 이상 큰 것으로 확인되었다.

가뭄 전이의 연계특성 분석을 위해서 두 가뭄 유형 간의 발생

순서에 따른 상호 연계과정을 검토했다. 그 결과, 1983년부터 2014년 기간 내 발생한 수문학적 가뭄사상 중 기상학적 가뭄에 의한 시공간적으로 전이특성을 보인 경우는 절반의 비율(50%)인 것으로 확인되었다. 이는 강수량의 부족 및 기후의 건조로 인한 자연적인 현상을 통해 발생하는 기상학적 가뭄의 전이현상으로 인한 것 이외에 수문학적 가뭄 발생에 또 다른 원인이 있다는 것을 의미하는 것으로 해석된다.

본 연구에서는 강우-유출 모형을 통해 모의된 유량을 기반으로 산정한 수문학적 가뭄지수(SRI6)를 이용하여 기상학적 가뭄지수(SPI6)와의 전이특성을 검토하였다. 그 결과 단일특성으로 구분된 두 가뭄은 발생 위치와 심도의 크기는 대체로 유사하게 나타났다. 즉 SRI6은 강우-유출 모형을 통해 해당 지역의 저류효과 및 기저유출 등이 반영되는 과정에 있어 강우에 대한 의존성이 매우 크게 반영되기에 SPI6과 시공간적 가뭄 패턴이 유사하게 나타난 것으로 해석된다. 그럼에도 불구하고 수문학적 가뭄의 발생 원인을 규명하는데 있어, 기상학적 가뭄에 의한 시공간적으로 전이특성을 보인 경우가 50% 비율인 것을 보면, 향후 연구에서는 다양한 시간단위에 따른 장·단기적 기상학적 가뭄에 대한 지체시간을 감안하여 수문학적 가뭄과의 관계를 추가로 검토해야 할 필요가 있다.

우리나라는 수문학적 가뭄 발생에 영향을 미치는 기상학적 가뭄 중 거의 대부분은 가뭄 연계특성 중 단일특성으로 구분된 가뭄 쌍으로 확인되었고(94% 비율), 복합특성으로 구분된 가뭄 쌍은 지난 우리나라 대표 가뭄기간인 1994년/1995년의 장기가뭄 기간이 유일한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 단일한 가뭄 쌍으로 구분되는 두 가뭄 유형에 대해서는 전조적으로 발생하는 기상학적 가뭄이 시공간적인 가뭄의 전이 현상을 해석하는 데 중요한 요인으로 활용될 수 있다는 것을 의미한다.

또한, 지난 1994-1995년에 발생한 수문학적 가뭄의 경우에는 총 5개의 기상학적 가뭄에 의한 장기간의 강수량 부족으로 인한 가뭄의 발생 원인을 해석하고, 시공간적인 가뭄전이 현상을 해석하는데 본 연구에서 개발한 가뭄지도의 활용성이 높은 것으로 판단된다. 따라서 국지적으로 빈번히 발생하는 가뭄에 대한 효율적인 대응방안을 마련하기 위해서는 실제 수문학적 가뭄으로 인한 용수 부족의 근본적인 원인을 발견하는 데 가뭄전이 과정을 평가하는 것은 반드시 고려되어야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한재난대응기술평가개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2019-MOIS-011).

본 논문은 2019 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

## References

- Andreadis, K. M., Clark, E. A., Wood, A. W., Hamlet, A. F. and Lettenmaier, D. P. (2005). "20th century drought in the conterminous United States." *Journal of Hydrometeorol*, Vol. 6, pp. 885-1001.
- Changnon, S. A. (1987). *Detecting drought conditions in Illinois*, Vol. 169, Illinois State Water Survey, Illinois.
- Eltahir, E. A. and Yeh, P. J. F. (1999). "On the asymmetric response of aquifer water level to floods and droughts in Illinois." *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 4, pp. 1199-1217.
- Liu, Y., Zhu, Y., Ren, L., Singh, V. P., Yong, B., Jiang, S., Yuan, F. and Yang, X. (2019). "Understanding the spatio-temporal links between meteorological and hydrological droughts from a three-dimensional perspective." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 124, No. 6, pp. 3090-3109.
- Peters, E. (2003). *Propagation of drought through the groundwater systems: Illustrated in the Pang (UK) and Upper-Guadiana (ES) catchments*, Ph.D. Thesis, Wageningen University, Wageningen, Nederland.
- Sattar, M. N. (2019). *Probabilistic framework for characterizing drought propagation between meteorological and hydrological droughts*, Ph.D. Thesis, Hanyang University.
- Shin, J. Y., Kwon, H. H., Lee, J. H. and Kim, T. W. (2017). "Bayesian networks-based probabilistic forecasting of hydrological drought considering drought propagation." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 50, No. 11, pp. 769-779 (in Korean).
- Van Loon, A. F. (2015). "Hydrological drought explained." *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, Vol. 2, No. 4, pp. 359-392.
- Yoo, J., Kim, J. G., Yoo, D. G. and Kim, T. W. (2019). "Characterizing three-dimensional drought events and spatio-temporal migration patterns." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 52, No. 12, pp. 1025-1031 (in Korean).
- Yoo, J., So, B. J., Kwon, H. H. and Kim, T. W. (2020). "Development of drought map based on three-dimensional spatio-temporal analysis of drought." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 40, No. 1, pp. 25-33 (in Korean).
- Yu, M., Cho, Y., Kim, T. W. and Chae, H. S. (2018). "Analysis of drought propagation using hydrometeorological data: from meteorological drought to agricultural drought." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 51, No. 3, pp. 195-205 (in Korean).