



Analysis of drought propagation using hydrometeorological data: from meteorological drought to agricultural drought

Yu, Myungsu^{a*} · Cho, Younghyun^a · Kim, Tae-Woong^b · Chae, Hyo-Sok^c

^aHydrometeorological Cooperation Center, K-water

^bDepartment of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

^cDepartment of R&D Planning and Management, K-water Institute

Paper number: 17-103

Received: 22 November 2017; Revised: 11 December 2017; Accepted: 11 December 2017

Abstract

Drought is a complex phenomenon caused by various factors which can be classified into natural and anthropogenic causes. In Korea, the natural drought typically occurs when the high pressure of the Pacific Ocean develops rapidly or becomes stronger than usual in summer, resulting in a short-lived monsoon season. Drought also can be classified into meteorological, agricultural, hydrological, and socioeconomic drought depending on the development process and consequences. Each type of droughts can influence the other drought types directly or indirectly. Drought propagation refers a phenomenon that changes from meteorological drought to agricultural or hydrological drought. In this study, the occurrence and patterns of drought propagation are evaluated. The relationship between meteorological and agricultural droughts was assessed using hydrometeorological data. We classified the types of drought into five categories to evaluate the occurrence and characteristics of drought propagation. As results, we found drought propagation did not occur or delayed until three months, depending on the type of drought. The further generalized relationship of drought propagation is expected to be used for predicting agricultural drought from the preceding meteorological drought.

Keywords: Drought propagation, Meteorological drought, Agricultural drought, SPI, ARDI

수문기상 정보를 이용한 가뭄 전이 분석: 기상학적 가뭄에서 농업적 가뭄

유명수^{a*} · 조영현^a · 김태웅^b · 채효석^c

^a한국수자원공사 통합물정보처 수문기상협력센터, ^b한양대학교 공학대학 건설환경공학과, ^cK-water융합연구원 기술경영처

요 지

가뭄은 여러 가지 요인에 의해 복합적으로 발생하는 현상으로 자연적 원인과 인위적 원인으로 구분할 수 있다. 우리나라는 기후학적 특성상 여름철에 태평양 고기압의 발달 시기가 빠르거나 평년보다 강하면 장마 기간이 짧아져 자연적인 원인에 의해 가뭄이 발생한다. 가뭄은 발생과정과 피해 영향에 따라 기상학적, 농업적, 수문학적, 사회경제적 가뭄으로 구분할 수 있으며 직·간접적으로 다른 가뭄에 영향을 미친다. 가뭄의 종류가 기상학적 가뭄에서 농업적 가뭄 혹은 기상학적 가뭄에서 수문학적 가뭄으로 변화되는 현상을 가뭄 전이라 한다. 본 연구에서는 국내의 가뭄 전이 발생 여부와 발생 패턴을 검토하기 위해 수문기상 정보를 이용하여 기상학적 가뭄에서 농업적 가뭄으로의 전이 관계를 분석하였다. 가뭄 전이 발생 현황 및 특성 분석을 위해 가뭄 발생의 유형을 5가지로 구분하였으며, 유형에 따라 가뭄 전이가 발생하지 않거나 최대 3개월까지 지체되는 것을 확인하였다. 향후 더 많은 가뭄 지표들과의 분석을 통해 가뭄 전이 관계를 일반화한다면 기상학적 가뭄 발생 시 농업적 가뭄 예측을 위한 인자로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어: 가뭄 전이, 기상학적 가뭄, 농업적 가뭄, SPI, ARDI

*Corresponding Author. Tel: +82-2-2150-0565

E-mail: myungsu.yu@gmail.com (M. Yu)

1. 서론

가뭄은 모든 수문학적 재해 중에서 홍수와 함께 가장 두려운 재해라 할 수 있으며 20세기에 관측된 가장 심각한 자연재해 중 하나로 선정되었고, 21세기 기후변화에 따른 기온 및 강수량의 증가는 가뭄 피해의 급증으로 이어질 것으로 미국 대기해양청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 발표하였다(Trenberth *et al.*, 2004). 이에 국내외에서 많은 가뭄 관련 연구가 진행되었으며 여러 분석 방법이 제안되고 사용되어왔다. 가뭄 연구의 목적은 지역의 가뭄 상황을 정확하게 표현하기 위한 것이며, 일반적으로 년 혹은 월 단위의 장기 분석을 통해 가뭄 발생의 특성을 분석하고 지역 혹은 시기별 가뭄크기를 비교하는 연구들이 많았다. 가뭄은 다양하게 정의되지만, Warwick (1975)는 광범위한 지역에서 식물과 동물 그리고 인간에게 치명적일 수 있는 물 부족 상태가 지속하는 경우로 정의하였다. Dracup *et al.* (1980)은 가뭄을 정의하기 위하여 주 관심사를 먼저 결정할 것을 제시하였고, Beran and Rodier (1985)는 특정 지역과 기간에 걸쳐 물이 부족한 상태로 가뭄을 정의하였으며, Wilhite and Glantz (1985)는 기후인자와 지역 특성을 이용하여 가뭄을 크게 기상학적 가뭄, 수문학적 가뭄, 농업적 가뭄 그리고 사회·경제적 가뭄 등으로 구분하였다. 한편, 기상학적 가뭄(Huschke, 1959)은 비정상적으로 건조한 기상환경으로 인한 물 부족으로 정의되며, 강수량 부족으로 작물의 생육 저하, 생산량 감소 등을 유발하는 기상 조건의 이상 발생은 농업적 가뭄으로 정의하였다(Rosenberg, 1979). 즉, 강수량 부족, 토양수분 부족, 저수량 저하 등 작물 생장에 영향을 미치는 수문기상인자가 바탕이 되어 가뭄이 정의된 것이다. 또한, Yevjevich *et al.* (1977)은 가용 수자원의 수요와 공급을 바탕으로 수문학적 가뭄을 정의하였다.

가뭄 판단은 일반적으로 가뭄지수를 활용해 수행하며 가뭄 지수에 따라서 동일한 종류의 가뭄이더라도 다르게 판단될 수 있다. 가뭄을 정량적으로 표현하기 위해 개발된 많은 지수는 설계개념, 용도, 시공간 해상도 등 각각의 목적과 특징에 적합하도록 개발되었으며, 국내의 경우를 살펴보면 기상학적 가뭄을 평가하기 위해 기상청에서 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI), 정상강수백분율(Percent of Normal Precipitation, PN), 파머가뭄지수(Palmer Drought Severity Index, PDSI) 등의 가뭄 지표를 제공하고 있으며(<https://hydro.kma.go.kr>), 농업적 가뭄은 토양수분지수(Soil Moisture Index, SMI)가 널리 활용되며 저수지가뭄지수(Reservoir Drought Index, RDI)도 활용된다(<https://rawris.ekr.or.kr>). 수문학적 가뭄은 물 공급 가용수준 평가를 위해 지표수공급지수(Surface

Water Supply Index, SWSI), 용수공급 가뭄지수(Water supply Drought Index, WADI) 및 수문학적 파머지수(Palmer Hydrological Drought Index, PHDI)와 국내에서 개발한 보정지표수공급지수(Modified Surface Water Supply Index, MSWSI) 등을 이용하고 있다(<http://drought.kwater.or.kr>).

일반적으로 가뭄은 기상학적, 농업적, 수문학적 가뭄의 순서로 진행되며 피해를 유발하게 된다. Joseph *et al.* (2009)은 가뭄의 종류가 기상학적 가뭄에서 농업적 가뭄 혹은 기상학적 가뭄에서 수문학적 가뭄으로 변화되거나, 가뭄 현상이 공간적으로 이동하는 현상을 가뭄 전이(drought propagation)라 정의하였다. 가뭄 전이에 대한 개념은 Changnon (1987)이 다양한 수문변량의 평균에 대한 차이를 비교하면서 처음 제시되었으며, 용어는 Eltahir and Yeh (1999)에 의해서 처음 제시되었다.

본 연구의 주제인 가뭄 전이 관련 선행연구는 크게 수문기상인자를 이용한 연구와 가뭄 판단을 통한 분석으로 구분할 수 있다. Peter (2003)는 영국의 Pang 지점을 대상으로 강수량, 토양수분, 지하수 수위, 하천 유량을 비교하였으며, 가뭄이 발생하는 계절 및 발생 원인에 따라서 가뭄 전이가 다르게 발생한다는 것을 확인하여 가뭄 상황을 4가지로 구분하였다. Van Loon and Van Lane (2012)은 온도, 강수량, 토양수분, 지하수, 유량 등의 수문기상인자를 활용하여 전이 발생과정을 분석하였다. Zhao *et al.* (2014)은 중국 Jinghe 유역의 기상학적 가뭄지수(SPI)와 수문학적 가뭄지수(Standardized Runoff Index, SRI)를 비교하여 SRI가 SPI보다 2~256일 늦게 가뭄이 발생하고 수문학적 가뭄으로 갈수록 가뭄 사상 발생빈도가 감소하고 지속기간이 증가함을 확인하였다. 한편, Van Loon *et al.* (2011)은 임계수준 방법과 이동평균법을 활용하여 기상학적 가뭄과 수문학적 가뭄을 판단하였으며, 토양수분, 지하수 수위, 유출량에 대하여 관측값과 유출모형을 활용한 모의 값으로 전이 관계를 분석하였다.

본 연구에서는 기상학적 가뭄에서 농업적 가뭄으로의 전이 현상 일반화를 위해 가뭄 발생의 유형을 설정하여 가뭄 전이 발생 현황을 분석하였다. 이를 위해, 기상학적 가뭄지수는 강수량 자료만으로 산정이 가능한 SPI를 선정하여 판단하였고 농업적 가뭄지수는 한국농어촌공사의 저수지 저수율 자료를 이용하여 판단하였다. 이렇게 가뭄지수(자료)를 이용하여 가뭄 발생을 판단하고 가뭄별 유형을 5가지로 정리하여 가뭄 전이 발생 현황을 검토하였다. 아울러, 본 연구는 가뭄 상황을 표현하기 위한 가뭄지수의 개발 및 가뭄 크기의 비교 등과 같은 기존 가뭄 연구와 달리 각각의 가뭄 판단이 갖는 특성을 비교하여 가뭄지수 간 상관성을 표현하는 데 초점을 두었다.

2. 배경이론과 적용자료

2.1 가뭄지수

2.1.1 기상학적 가뭄지수

기상학적 가뭄지수는 전 세계적으로 널리 활용되고 있으며 강수량 자료만을 활용하여 기상학적 가뭄 상태를 표현할 수 있는 SPI를 사용하였다(McKee *et al.*, 1993). SPI는 월 강수량을 일정 개월 수(3, 6, 12개월 등) 만큼 누적시킨 뒤, Eq. (1)의 Gamma 분포에 적용된다.

$$f(x;\alpha,\beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (1)$$

여기서, x 는 누적된 강수량($x > 0$), α 는 축척변수(shape parameter), β 는 규모변수(scale parameter)이다.

적용된 Gamma 분포는 평균 0, 표준편차 1을 가지는 정규 분포로 정규화 과정을 거치게 되며, 그 결과 다른 시공간에서도 확률분포 모형의 평균이 0이 되어 지역 간 시간에 따른 가뭄 심도의 비교가 가능하다(Lee *et al.*, 2016). 하지만 확률분포 모형을 활용하기 때문에 신뢰성을 확보하기 위해서는 장기간의 강수량 자료가 필요하다. 강수량 자료는 최소 30년 이상이 필요하지만, 50년 이상의 강수량 자료를 사용할 것을 권장하고 있으며(Guttman, 1999), 본 연구에서는 1974년부터 2016년(43년) 자료를 이용하였다. SPI는 강수량의 누적 기간에 따라 다양한 시간 규모의 가뭄지수 산정이 가능하기 때문에 강

Table 2. Drought classification according to the SPI (McKee *et al.*, 1993)

SPI index range	Moisture condition
More than +2.00	Extremely wet
+1.50 ~ +1.99	Very wet
+1.00 ~ +1.49	Moderately wet
-0.99 ~ +0.99	Nearly normal
-1.00 ~ -1.49	Moderately dry
-1.50 ~ -1.99	Very dry
Less than -2.00	Extremely dry

수량 누적기간에 따라 Table 1과 같이 다양한 종류의 가뭄 판단이 가능하며(Zarger *et al.*, 2011; WMO, 2012), Table 2에 SPI에 따른 가뭄 분류를 나타내었다.

2.1.2 농업적 가뭄지수

농업적 가뭄은 농경지에 따라 크게 논과 밭으로 구분할 수 있으며, 농업적 가뭄지수 산정에는 농작물, 산림, 초지 등에서 식물의 생육에 결정적 영향을 미치는 인자 중 하나인 토양수분이 많이 이용되고 있다. 그러나 국내에서 관측되는 토양수분은 지표면 인근(10 cm)에서 관측하고 있으며 위성영상을 이용한 토양수분 추정치도 지표면 인근에 대해서 진행되고 있어, 강수의 영향에 민감하게 반응하므로 가뭄지수로 직접 활용하는 데 어려움이 있다. 통계청 농업면적조사 자료 (<http://kostat.go.kr>)에 따르면 Fig. 1과 같이 농경지 면적은 최근으로 올수록 감소하고 있으나 수리안전답 비율(빨간 점선)

Table 1. Characteristics of SPI based on the accumulative precipitation pattern (Zarger *et al.*, 2011; WMO, 2012)

SPI	Precipitation patterns	Application characteristics
SPI 1	Short term	Short-term soil moisture and crop stress
SPI 3	Short and medium term	Soil moisture conditions
SPI 6	Medium term	Showing the precipitation over distinct seasons
SPI 9	Medium time scale	Significant impacts in agriculture
SPI 12	Long term	Streamflows, reservoir levels, and even groundwater levels

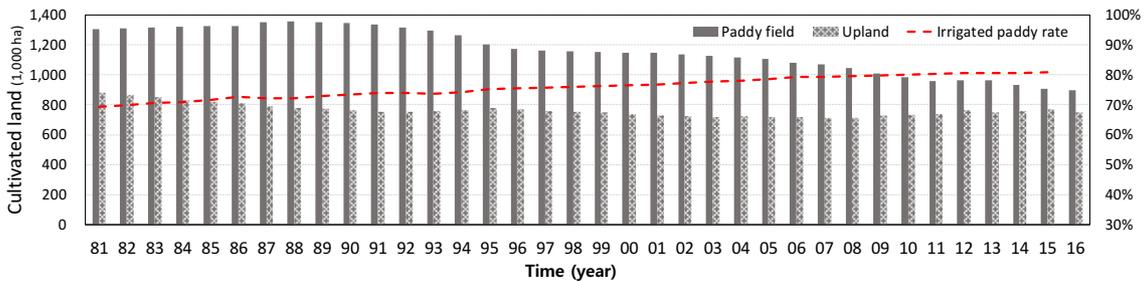


Fig. 1. Changes of agricultural (cultivated) land during 1981 to 2016

은 계속 증가하여 2009년부터 80% 이상을 공급하고 있다. 이는 논 면적의 감소와 저수지 확충으로 인한 수리안전담 비율이 증가한 것이며 농업적(논) 가뭄 판단 시 저수지 저수율 자료의 중요성이 증가하였다고 판단할 수 있다. 그 결과 한국농어촌 공사는 식물의 생육에 영향을 미치는 토양유효수분량과 저수율을 이용하여 가뭄을 판단하고 있다.

본 연구에서는 현재 한국농어촌공사에서 이용 중인 저수지 저수율을 이용하여 농업 저수지 가뭄지수(Agricultural Reservoir Drought Index, ARDI)를 산정하였다. ARDI는 순별 가용저수량의 최소값에 대해 가뭄 발생의 위험과 크기를 빈도개념을 이용하여 표현한 RDI와는 다르게 Eq. (2)와 같이 저수지 저수율 자료만을 이용하여 산정한다.

$$ARDI = \frac{s_i}{\bar{S}_i} - \gamma \quad (2)$$

여기서, i 는 연도별 월이며 \bar{S}_i 는 월별 평년 저수율(%), s_i 는 월 평균 저수율(%), γ 는 가뭄 판단 기준을 나타내며, 본 연구에서는 한국농어촌공사에서 사용 중인 70%로 정의하였다. 즉, 매월 평균 저수율이 평년 저수율의 70% 미만이면 ARDI는 음수(-)를 나타내며, 이는 농업적 가뭄의 발생으로 판단한다.

2.2 적용자료

가뭄지수 산정을 위해 기상청 종관기상 관측장비(Automated Synoptic Observing System, ASOS)와 한국농어촌공사 저수지를 조사하여 강수 관측 지점의 반경 5 km 이내의 백만톤 이상 저수지를 선별하였다. 선별된 관측 지점은 Fig. 2

Table 3. Test stations for drought propagation analysis

	Name	Code	Name	Code
Test 1	Insan	INSA	Ganghwa	GANG
Test 2	Wangsong	WANG	Suwon	SUWO
Test 3	Janghyeon	JANG	Gangneung	GANN
Test 4	Hoam	HOAM	Chungju	CHUN
Test 5	Biryongdam	BIRY	Jecheon	JECH
Test 6	Guryong	GURY	Boeun	BOEU
Test 7	Chupung-nyeong	CHUP	Chupung-nyeong	CHPY
Test 8	Okseo	OKSE	Boryeong	BORY
Test 9	Seongam	SEON	Seosan	SEOS
Test 10	Hwarim	HWAR	Geumsan	GEUS
Test 11	Jisan	JISA	Imsil	IMSI
Test 12	Cheongho	CHEO	Buan	BUAN
Test 13	Gwangjuho	GWAN	Gwangju	GWAJ
Test 14	Yangchon	YANG	Haenam	HAEN
Test 15	Daeseong	DAES	Gumi	GUMI
Test 16	Geumgye	GEUM	Yeongju	YEON
Test 17	Pungrak	PUNG	Yeongcheon	YEOC
Test 18	Annyong	ANNY	Mungyeong	MUNG
Test 19	Myogok	MYOG	Yeongdeok	YEOD
Test 20	Gasan	GASA	Miryang	MIRY
Test 21	Mogo	MOGO	Sancheong	SANC
Test 22	Maesan	MAES	Geochang	GEOC

와 같이 기상청(KMA)과 한국농어촌공사(KRC)를 구분하여 표시하였으며 연구 지점별 관측소 정보는 Table 3과 같다.

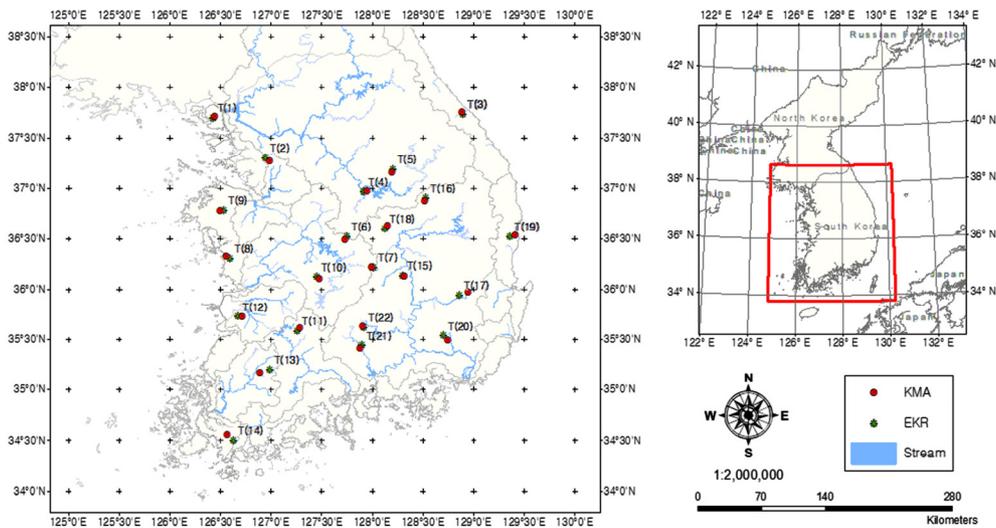


Fig. 2. Location of gauge stations

또한, 월별 강수량(mm)과 월 평균 저수율(%) 자료를 수집하여 Fig. 3과 같이 1991~2016년의 월 강수량(Monthly Total

Precipitation, MTP; 검정 실선)과 저수지별 월 평균 저수율(Storage Rate; 파랑 점선)을 나타내었다.

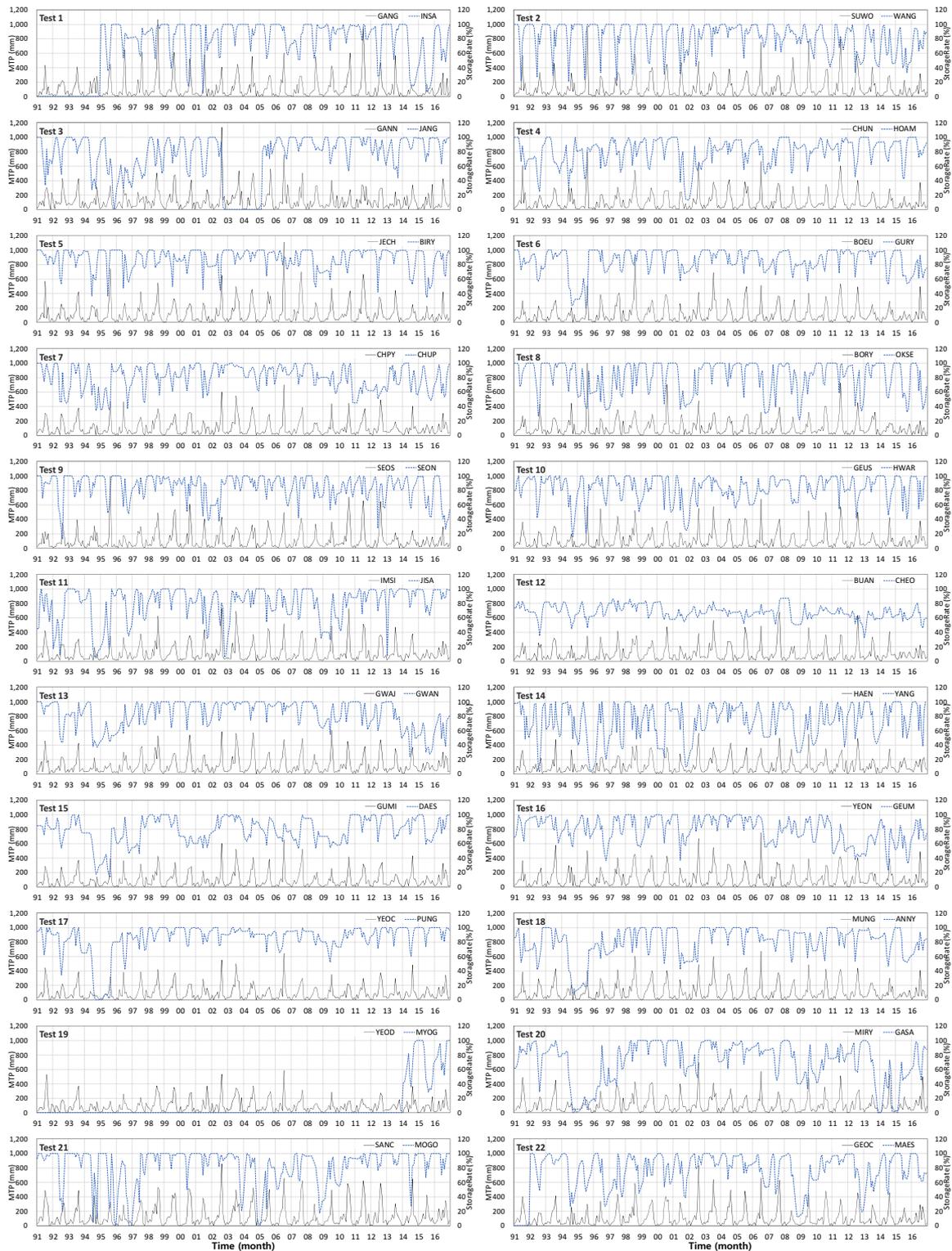


Fig. 3. Reservoir storage rate and precipitation data for test stations

3. 가뭄 전이 분석 방법

3.1 가뭄 판단

가뭄 전이 분석에 앞서 기상학적, 농업적 가뭄 판단을 위한

지수산정을 위해 앞에서 설명한 22개 지점의 강수량 및 저수를 자료를 이용하여 1991~2016년 동안의 SPI3와 ARDI를 산정 하였다. 산정된 가뭄지수로부터 기상학적 가뭄(MDrought)은 $SPI3 \leq -1$, 농업적 가뭄(ADrought)은 $ARDI < 0$ 기준으로

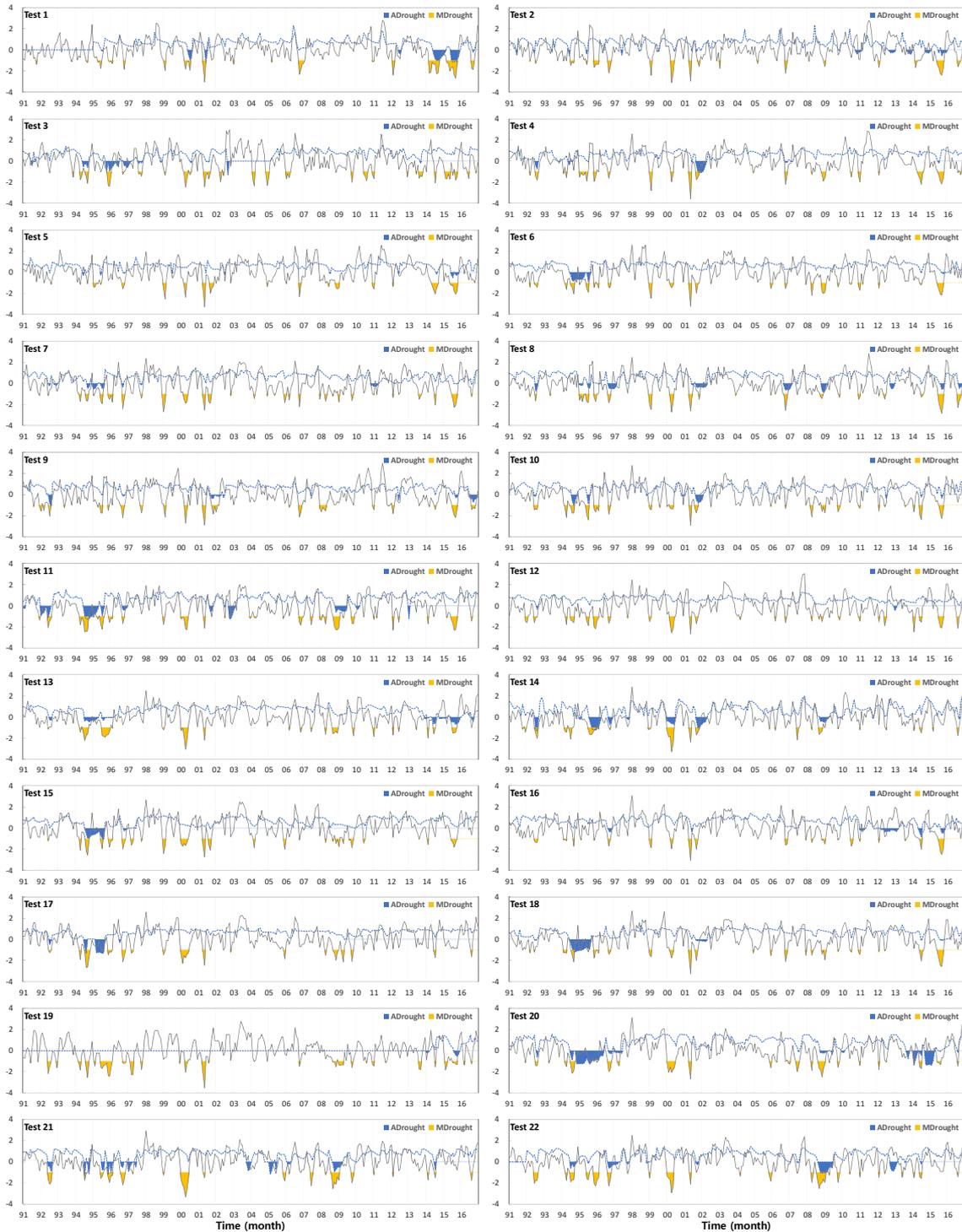


Fig. 4. Analyzed agricultural and meteorological drought for test stations

지점별 가뭄을 Fig. 4와 같이 판단하였다. Fig. 4의 가로는 분석 기간(1991~2016년)을 나타내고 세로는 가뭄지수별 범위이며, 본 자료로부터 주요 가뭄에 대한 전이 분석을 수행하였다.

3.2 가뭄 전이 분석

가뭄은 여러 가지 요인에 의해 복합적으로 발생하는 현상으로 자연적 원인과 인위적 원인으로 구분할 수 있다. 우리나라는 기후학적 특성상 여름철에 태평양 고기압 발달의 시기가 빠르거나 평년보다 강하면 장마 기간이 짧아져 자연적인 원인에 의해 가뭄이 발생하게 된다. 그밖에 수자원 시설의 용량 부족과 용수 수요 및 공급 체계의 관리 미흡 등이 원인으로 작용하여 가뭄이 발생할 수 있다. 이 때문에 연 강수량이 상대적으로 부족하지 않은 해라도 관개기 강수량이 부족할 경우 농업적 가뭄이 발생할 수 있어, 강수량의 절대적인 양뿐만 아니라 강수 발생 시기도 가뭄 발생의 중요한 요인이 된다.

본 연구에서는 국내 여러 가뭄 사상 중에서 전국적으로 가뭄이 발생한 1994~1995년 및 2001년 가뭄과 충남, 전라도 및 강원 지역에 피해를 입힌 2008~2009년 가뭄, 최근 경기, 충남 및 강원 지역에 큰 피해를 입힌 2014~2015년 가뭄에 대하여 SPI3과 ARDI를 이용한 기상학적, 농업적 가뭄 판단으로부터 가뭄 전이 과정을 분석하였다(K-water, 2002; KEI, 2013; Kim et al., 2016).

4. 가뭄 전이 분석 결과

4.1 1994~1995년 가뭄

1994~1995년은 전국적으로 매우 심한 가뭄이 발생하였으

며, 특히 농업용수 부족으로 농업 분야에 큰 피해를 발생시켰고 2개 광역시와 8개 도, 32개 시, 54개 군이 제한급수, 격일제 급수, 급수 중단 등 생활용수 관련 피해가 발생하였다. 가뭄은 1994년 7월 초 적은 강수량으로 전남, 경남 지방에서 시작되어 경북, 전북, 충청도 지역 등으로 확산하면서 발생하였다. 1994년의 강수량은 전국적으로 예년평균의 76.4% 수준으로, 경북, 경남, 전북, 전남 및 충북의 경우에는 예년보다 40~50% 부족했다. 1994년 여름철의 적은 강수량은 가뭄을 1995년도까지 지속시켰으나 한강 유역은 1995년 발생한 홍수로 가뭄이 해갈되었고, 남부지방의 경우에는 계속적으로 강우 부족 현상이 발생하였다(K-water, 1996).

가뭄 피해 지역에 대하여 가뭄 전이의 발생 여부를 검토하였으며, Fig. 5에 일부 지점의 SPI3과 ARDI를 이용하여 가뭄 기간 동안의 기상학적 가뭄과 농업적 가뭄을 나타내었다. 대부분 1994년 봄부터 기상학적 가뭄이 발생하였으며, 여름과 가을에 농업적 가뭄이 발생하였다. Test 6 (보은)과 Test 11 (임실) 지점은 1995년 봄철에도 강수 부족으로 농업적 가뭄이 해결되지 못하여 가뭄이 지속되었으며 8월 홍수로 가뭄이 해갈되었다.

4.2 2001년 가뭄

2001년에는 단기간의 강수량 부족으로 3월에서 6월 중순까지 전국적으로 극심한 가뭄이 발생하였으며 경기 북부지역을 중심으로 물 부족이 심화되었다(KEI, 2013). 2001년의 가뭄은 봄철(3, 4, 5월) 강수량을 예년의 값과 비교하였을 때 모든 지역에서 40% 이하로 심한 가뭄 상태로 판단되며 Fig. 6의 Test 1 (강화), Test 4 (충주), Test 10 (금산) 및 Test 14 (해남) 지점에서와 같이 봄철 기상학적 가뭄을 확인할 수 있다. 특히

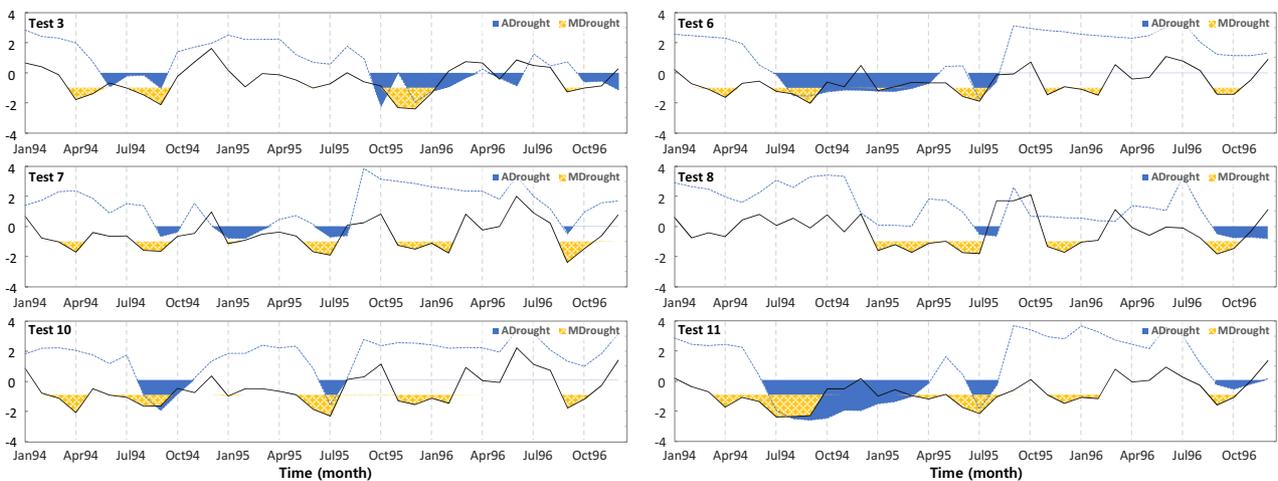


Fig. 5. Results of drought propagation analysis from 1994 to 1995

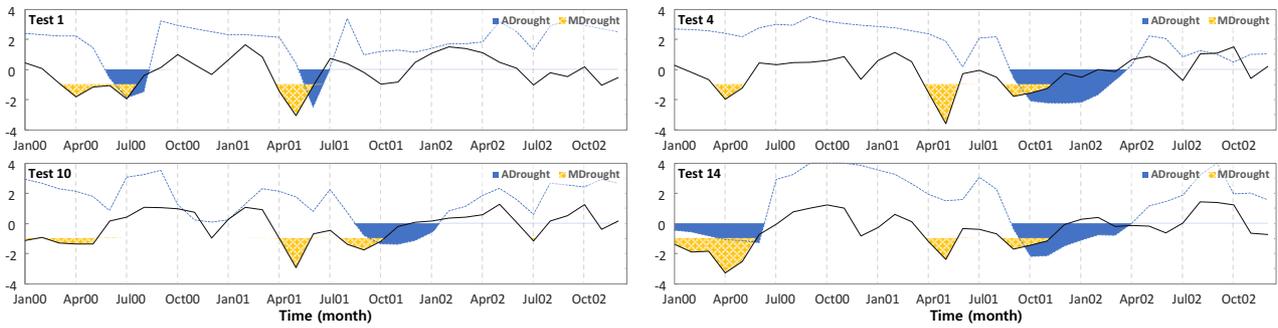


Fig. 6. Results of drought propagation analysis for 2001

봄철 가뭄이 심했던 경기 북부지역 인근 Test 1 (강화) 지점에서는 농업적 가뭄이 1개월 뒤에 발생하였다. 가뭄은 6월 중순부터 강원도 및 충청도 지역의 소나기를 시작으로 대부분 지역에 150 mm 이상의 비가 내려 봄 가뭄이 해결되었으나, 2001년 한반도에 영향을 미친 태풍이 없어 가을철에 기상학적 가뭄 및 농업적 가뭄이 발생하였다.

기상학적 가뭄은 봄철과 태풍이 발생하지 않은 가을에 발생하여 약 2개월 정도 유지된 이후 대부분 해결되었으나, 가을철 발생한 농업적 가뭄은 수분 부족이 지속되어 다음해 봄철 이전까지 가뭄의 지속기간이 길게 발생하였다.

4.3 2008~2009년 가뭄

2007년에 발생한 태풍의 영향으로 2008년 봄철에는 건조한 날씨에도 불구하고 농업적 가뭄이 발생하지 않았으나, 2008년 가을철에는 우리나라에 영향을 미친 태풍이 없어 경상남도, 전라도 지역 및 강원도 지역을 중심으로 기상학적 가뭄이 발생하였다. 권역별 평균강수량을 비교하면 한강은 전국 평균을 웃돌지만 섬진강과 영산강은 60%대에 머물고 낙동강과 금강은 71% 수준에 그쳤다. 특히, 거창과 산청과 같은 내륙 산간지역에서 강수량이 평년대비 60% 이하로 나타났다 (Park, 2009).

가뭄 발생지역인 금강, 낙동강, 영산강 및 섬진강 유역 중

Test 8 (보령), Test 11 (임실), Test 14 (해남), Test 21 (산청) 등 분석 지점의 가뭄 판단 결과를 Fig. 7에 도시하였다. 전 지점에서 태풍의 영향이 없어 2008년 8~9월에 기상학적 가뭄이 발생하였으며, 1~2개월 후에 농업적 가뭄이 발생하였다. 바다와 인접한 Test 8 (보령)과 Test 14 (해남) 지점은 1~2개월 후에 기상학적 가뭄이 종료되었으며 농업적 가뭄은 4~5개월 후에 종료되었다. Test 11 (임실) 이외의 지점은 가을과 겨울철을 중심으로 가뭄이 발생하였으나 그 피해가 봄철 관개기에 비해 적어 가뭄 상황임에도 불구하고 국민들이 체감할 수 있는 수준은 아니었다.

4.4 2014~2015년 가뭄

2014년 강수량은 1,042.6 mm로 1966년 이후 13번째로 적은 해였으며, 2015년은 900.2 mm로 2번째로 적은 해였다. 그 결과 2014년 1월부터 가뭄이 발생하기 시작하여 12월까지 중부지방을 중심으로 약한 가뭄이 지속되었으며, 2014년도의 가뭄이 완전히 해결되지 못한 상황에서 2015년 가뭄이 다시 시작되면서 극심한 가뭄이 발생하였다(Kim et al., 2016).

2014년 중부지방부터 발생한 가뭄의 확장은 Fig. 8의 Test 1 (강화), Test 5 (제천), Test 8 (보령) 및 Test 16 (영주)에서 확인할 수 있으며, Test 1 (강화) 지점에서는 봄철 강수량의 부족으로 발생한 기상학적 가뭄이 여름까지 이어지면서 6월부

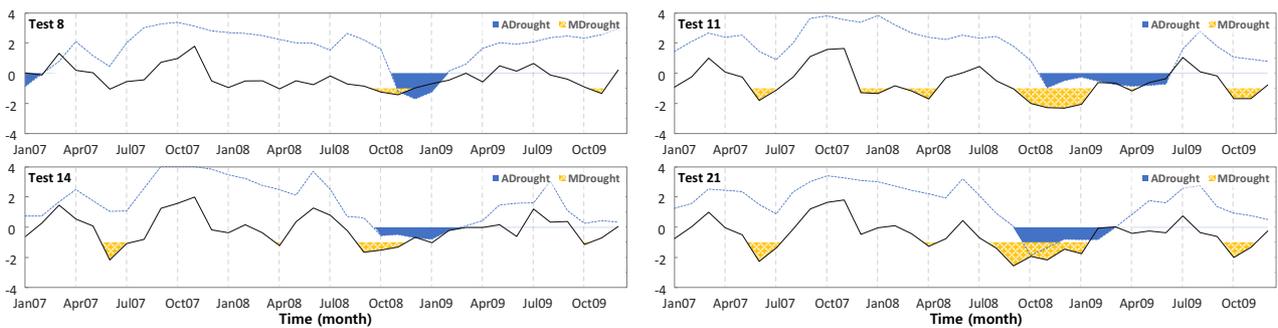


Fig. 7. Results of drought propagation analysis from 2008 to 2009

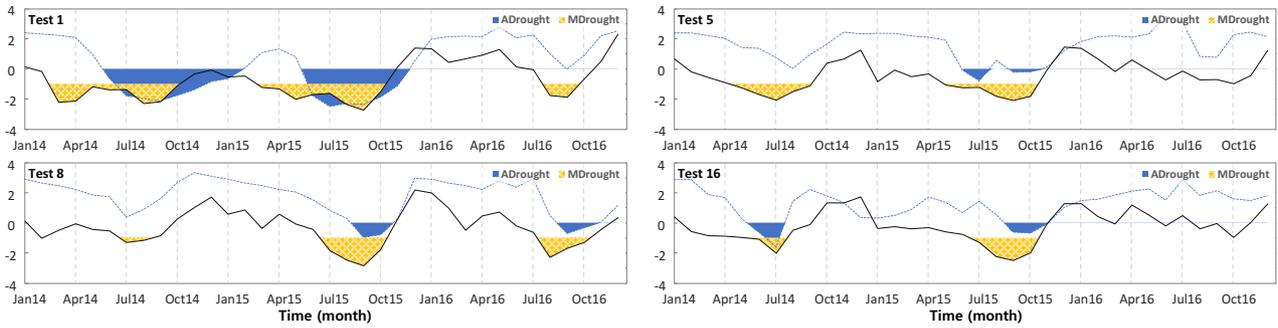


Fig. 8. Results of drought propagation analysis from 2014 to 2015

터 농업적 가뭄으로 전이되었다. 2014년도 기상학적 가뭄이 발생한 후 회복되었다가 2015년도에 다시 중부 지방인 Test 1 (강화), Test 5 (제천) 지점에서 가뭄이 시작되었다. 2015년 가뭄은 특히 2014년 가뭄 피해가 심했던 Test 1 (강화) 지점에서 심각하게 발생했으며, 대부분의 지점에서 농업적 가뭄이 기상학적 가뭄보다 약 2개월 정도 지체되어 발생하였다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 기상학적 가뭄에서 농업적 가뭄으로 전이 되는 현상을 검토하기 위해 기상학적 가뭄지수인 SPI3과 농업적 가뭄 지표인 ARDI를 이용하여 가뭄을 판단하였다. 이후 가뭄 전이 분석을 위해 1970년 이후의 가뭄사상(1994~1995, 2001, 2008~2009, 2014~2015년)에 대한 특성을 유형별로 구분하여 정리한 결과를 아래와 같이 요약하였다.

1) 일반적인 봄 가뭄

1994, 1995년도 및 봄철 가뭄은 강수 부족으로 대부분 3월 부터 기상학적 가뭄이 발생하였으며, 극심한 지점에서는 1~2 개월 정도의 지체시간을 거쳐 농업적 가뭄이 나타났다. 건조기에 속하는 봄에 발생한 기상학적 가뭄은 짧은 지체시간을 거쳐 농업적 가뭄으로 전이되나 농번기 대비를 위한 저수량 확보로 가뭄을 예방하여 봄철 농업적 가뭄의 발생이 적었다.

2) 홍수기 강수 부족으로 인한 여름 가뭄

1994년 봄철부터 발생하기 시작한 기상학적 가뭄은 홍수 기인 7월의 강수량이 감소하면서 기상학적 가뭄이 심화되었고 동시에 농업적 가뭄이 발생하였다. 여름철에 발생하는 가뭄은 봄철 가뭄이 시작되었다가 여름철 동안의 적은 강수(혹은 마른장마)가 가뭄을 심화시켰다. 이 때문에 기상학적 가뭄은 봄철부터 가뭄으로 판단되는 상태에 있다가 늦은 봄이나 여름철 농업적 가뭄으로 전이가 발생하였으며 가뭄의 지체시

간은 약 2개월 정도였다.

3) 태풍의 미발생으로 인한 가을 가뭄

2001년도의 가뭄은 봄철 단기간의 강수량 부족으로 발생한 기상학적 가뭄이 여름철 강수로 인해 일부 해갈되었으나, 가을철 태풍의 영향을 받지 못하여 기상학적 가뭄과 농업적 가뭄이 발생하였다. 2008년에도 가을철 우리나라에 영향을 미친 태풍이 발생하지 않아 금강, 낙동강, 영산강 및 섬진강 유역에서 기상학적 가뭄이 발생한 후 농업적 가뭄이 발생하였다. 봄철 및 여름철 가뭄이 해소되었어도 태풍이 발생하지 않은 해는 가을 가뭄이 발생할 수 있으며 해당 경우에는 농업적 가뭄으로 전이되는 시간이 짧아져 약 1개월 정도의 지체시간을 가진다.

4) 단기간 강수 부족으로 발생하는 가뭄

2001년 봄철의 경우 단기간 무강수 및 적은 강수로 예년에 비해 전국 강수량이 40% 이하로 기상학적 가뭄이 발생하였다. 그러나 6월 중순부터 시작된 강우의 영향으로 농업적 가뭄까지 발생하지 않았으며, 단기간의 강수 부족으로 발생한 기상학적 가뭄의 대부분은 농업적 가뭄까지 이어지는 가뭄 전이는 발생하지 않았다.

5) 장기간 강수 부족으로 발생하는 가뭄

1995년도의 가뭄은 1994년도부터 장기간의 강수 부족이 원인으로 발생하였으며, 2015년도 가뭄의 경우도 2014년도 가뭄이 완전히 해갈되지 않은 채로 수분부족 현상이 지속하여 가뭄이 다시 발생하였다. 이처럼 장기간의 수분 부족이 지속하여 발생하는 가뭄은 강수 부족 시 농업적 가뭄으로 전이가 발생하며, 약 2~3개월의 지체 기간을 가지는 것으로 분석되었다.

우리나라는 여름철 장마와 가을철 태풍의 영향으로 50% 이상의 강우가 홍수기(6~9월)에 집중되어, 홍수기 동안 확보한 수자원을 다음 홍수기 전까지 활용하고 있다. 이 때문에 홍수기 직전인 봄철의 경우 전년도에 확보한 수자원을 이용하여 가뭄을 대비하고 있으나, 홍수기 이후 가을철의 경우 관개기 동안 농업용수의 사용량이 많아 홍수기 수자원 확보가 어

렵다면 가뭄에 취약하게 된다. 농업용수의 공급은 생활 및 공업 용수와 다르게 단위면적 대비 관개량을 기준으로 이루어지기 때문에 전체 용수량이 충분하더라도 관개 시기에 용수공급이 제대로 이뤄지지 못하면 가뭄이 발생할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 농업용수의 안정적 확보 등을 고려하기 위하여 기상학적 가뭄 상황으로부터 농업적 가뭄을 판단할 수 있는 전이 관계를 분석하였다.

가뭄의 판단 및 전이 기준이 명확하지는 않지만, 기상학적 가뭄의 판단으로 사용되는 SPI와 농업적 가뭄 판단을 위한 국농어촌공사에서 이용 중인 저수율을 이용하여 가뭄 판단과 전이 관계를 분석하였다. 분석은 주로 연구자의 판단으로 수행되기 때문에 자료 및 지점을 최대한 이용하여 가뭄 전이 발생 현황을 분석하였다. 본 연구에서는 가뭄 유형을 ‘일반적인 봄 가뭄’, ‘홍수기 강우 부족으로 인한 여름 가뭄’, ‘태풍의 미발생으로 인한 가을 가뭄’, ‘단기간 강우 부족으로 발생하는 가뭄’ 및 ‘장기간 강우 부족으로 발생하는 가뭄’ 등 5가지로 구분하여 가뭄 전이 발생 현황과 특성을 정리하였으며, 구분에 따라서 기상학적 가뭄에서 농업적 가뭄으로 전이가 발생하지 않거나 최대 3개월까지 지체되는 것을 확인하였다. 가뭄 전이는 관개기 농업용수의 안정적 확보 등의 이유로 기상학적 가뭄의 발생이 잦은 봄철보다 홍수기 이후에 발생이 많았으며, 홍수기 및 태풍의 영향을 받지 못하여 기상학적 가뭄이 발생한다면 약 1개월 후에 농업적 가뭄이 발생하였다.

국내의 가뭄은 자연적인 영향뿐만 아니라 기타 저수지, 양수장, 보 및 관정 등의 운영으로 인한 인위적인 영향을 많이 받으므로 국외의 가뭄 전이 연구보다 복잡성을 가지고 있다. 그러나 이번 연구를 통해 기상학적 가뭄에서 농업적 가뭄으로의 전이 현상을 확인할 수 있었으며, 가뭄의 정량적 판단의 어려움을 해결하고자 가뭄을 유형별로 구분하여 결과를 도출하였다. 아울러, 본 연구는 지수의 개발보다는 각 가뭄 특성의 비교를 통한 전이 관계 분석에 국한되어 있으며, 향후 더 많은 가뭄 지표들과의 분석을 통해 가뭄 전이 관계를 체계적으로 일반화하면 기상학적 가뭄 발생 시 농업적 가뭄 예측을 위한 인자로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국기상산업진흥원의 “기상See-AT기술개발” 사업의 연구비지원으로 수행한 ‘정량적 수문기상인자 추정 기술 개발을 통한 수문순환 모델 적용 체계 구축(KMIPA 2016-1020)’ 과제에 의해 수행되었습니다.

References

- Beran, M. A., and Rodier, J. A. (1985). *Hydrological aspects of drought*. UNESCO-WMO Studies and Reports in Hydrology, pp. 39-149.
- Changnon, S. A. Jr. (1987). *Detecting drought conditions in Illinois*. Illinois State Water Survey, p. 169.
- Dracup, J. A., Lee, K. S., and Paulson, E. G. Jr. (1980). “On the definition of droughts.” *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 2, pp. 297-302.
- 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.
- Guttman, N. B. (1999). “Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm.” *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 35, No. 2, pp. 311-322.
- Huschke, R. E. (1959). *Glossary of meteorology: Boston*. American Meteorological Society, p. 638.
- Joseph, S., Sahai, A. K., and Goswami, B. N. (2009). “Eastward propagating MJO during boreal summer and Indian monsoon droughts.” *Climate Dynamics*, Vol. 32, No. 7-8, pp. 1139-1153.
- KEI (2013). *A study of climate change adaptation policies for different types of droughts*.
- Kim, H. S., Kim, H. S., Jeon, G. I., and Gang, S. U. (2016). “Evaluation of drought; 2014-15.” *Water for Future*, KWRA, Vol. 49, No. 7, pp. 61-75.
- K-water (1996). *Drought survey report: '94-'95*.
- K-water (2002). *A study on the comprehensive measures for drought management*.
- Lee, J. H., Kwon, H. H., Jang, H. W., and Kim, T. W. (2016). “Future changes in drought characteristics under extreme climate change over South Korea.” *Advances in Meteorology*, pp. 1-19.
- Mckee, T. B., Doesken, N. J., and Kleist, J. (1993). “The relationship of drought frequency and duration to time scales.” *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, pp. 179-184.
- Park, C. G. (2009). “How will you make a decision the drought?” *Water for Future*, KWRA, Vol. 42, No. 6, pp.21-30.
- Peters, E. (2003). *Propagation of drought through the groundwater systems*. Ph.D. Thesis, Illustrated in the Pang (UK) and Upper-Guadiana (ES) catchments, Wageningen University.
- Rosenberg, N. J. (1979). “Drought in the great plains: research on impacts and strategies: proceedings of the workshop on research in great plains drought management strategies.” University of Nebraska, Lincoln, March 26-28: Littleton, Colorado, *Water Resources Publications*, p. 225.
- 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, p. 27.
- Van Loon, A. F., and Van Lane, H. A. (2012). “A process-based typology of hydrological drought.” *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 16, No. 7, pp. 1915-1946.
- Van Loon, A. F., Van Lanen, H. A., Tallaksen, L. M., Hanel, M.,

- Fendeková, M., Machlica, M., Sapriza, G., Koutroulis, A., Van Huijgevoort, M. H. J., Bermúdez, J. J., Tsanis, L., and Hisdal, H. (2011). *Propagation of drought through the hydrological cycle*. WATCH Technical Report, p. 32.
- Warwick, R. A. (1975). *Drought hazard in the United States: a research assessment*. Nsf/Ra/E-75/004. Boulder, CO: University of Colorado, Institute of Behavioral Science.
- Wilhite, D. A., and Glantz, M. H. (1985). "Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions." *Water International*, Vol. 10, No. 3, pp. 111-120.
- WMO (2012). *Standardized precipitation index user guide*.
- Yevjevich Vujica, H. W. A., and Salas, J. D. (1977). "Drought research needs." *Proceedings of the Conference on Drought Research Needs*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, p. 276.
- Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B., and Khan, F. I. (2011). "A review of drought indices." *Environmental Reviews*, Vol. 19, pp. 333-349.
- Zhao, L., Lyu, A., Wu, J., Hayes, M., Tang, Z., He, B., Liu, J., and Liu, M. (2014). "Impact of meteorological drought on streamflow drought in Jinghe river basin of China." *Chinese Geographical Science*, Vol. 24, No. 6, pp. 694-705.