

# 미래 기후 · 수문 정보에 따른 국내 가뭄의 전망 및 분석

## Projection and Analysis of Drought according to Future Climate and Hydrological Information in Korea

손 경 환\* / 배 덕 효\*\* / 안 재 현\*\*\*

Sohn, Kyung Hwan / Bae, Deg Hyo / Ahn, Jae Hyun

### Abstract

The objective of this study is to project and analyze drought conditions using future climate and hydrology information over South Korea. This study used three Global Climate Models (GCMs) and three hydrological models considering the uncertainty of future scenario. Standardized Precipitation Index (SPI), Standardized Runoff Index (SRI) and Standardized Soil moisture Index (SSI) classified as meteorological, hydrological and agricultural droughts were estimated from the precipitation, runoff and soil moisture. The Mann-Kendall test showed high increase in future drought trend during spring and winter seasons, and the drought frequency of SRI and SSI is expected higher than that of SPI. These results show the high impact of climate change on hydrological and agriculture drought compared to meteorological drought.

**Keywords** : climate change, drought, GCMs, hydrological model, drought indices

### 요 지

본 연구에서는 기후변화에 따른 미래 기후, 수문정보로부터 가뭄전망 정보를 생산 및 분석하고자 한다. 미래의 불확실성을 고려하기위해 3개 GCMs와 3개 수문모형을 이용하였다. 강수량, 유출량 및 토양수분량으로부터 기상학적, 수문학적 및 농업적 가뭄지수로 분류되는 SPI, SRI 및 SSI를 산정하였다. Mann-Kendall test 결과, 미래 가뭄의 경향은 봄철 및 겨울철에 크게 증가할 것으로 전망되었으며, 가뭄발생빈도의 경우 SRI 및 SSI가 SPI 보다 더 높게 나타났다. 미래 기후변화가 기상학적 가뭄 보다는 수문학적 및 농업적 가뭄에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

**핵심용어** : 기후변화, 가뭄, GCMs, 수문모형, 가뭄지수

### 1. 서 론

가뭄은 그 특성상 점진적이며 홍수에 비해 피해규모가 광범위하여 효율적인 대처방안을 마련하기가 쉽지 않는

기상재해이다. 국내에서는 이러한 가뭄이 짧게는 2~3년, 길게는 5~7년 주기로 발생하며, 주로 봄철과 겨울철의 발생빈도가 높다(KMA, 2012; Bae et al., 2013). 그러나 최근 기후변화의 영향은 기온의 상승, 강수량 패턴의 변

\* 세종대학교 건설환경공학과 박사과정 (e-mail: skhdr@hanmail.net)

Ph.D. Course student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

\*\* 교신저자, 세종대학교 물자원연구소 · 건설환경공학과 교수(e-mail: dhbae@sejong.ac.kr, Tel: 02-3408-3814)  
Corresponding Author, Prof. Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

\*\*\* 서경대학교 이공대학 토목공학과 부교수 (e-mail: wwrr@skuniv.ac.kr)

Associate Prof., Dept. of Civil and Architectural Engrg., Seokyeong Univ, Seoul 139-704, Korea

화, 증발산량의 증가 및 유출의 시공간적 변동 등을 초래하여 미래의 수문순환 과정이 다른 패턴으로 변화할 수 있다고 알려져 있으며(IPCC, 2001), 이러한 변화는 가물에도 큰 영향을 미칠 것으로 전망되고 있다. Dai et al. (2004)은 과거 PDSI (Palmer Drought Severity Index)를 분석한 결과 인간 활동에 기인한 지구온난화가 가물의 위험도를 증가시키고 있다는 결론을 제시한바 있으며, Sheffield and Wood (2007)은 기후변화로 인해 전 세계적으로 가물 발생 빈도가 증가할 것으로 전망하였다. 또한 Bae et al. (2007)은 미래 봄철에 증발산량 증가와 유출량 감소가 더욱 심화될 것으로 전망한바 있어 기후변화에 따른 가물 대응을 위한 노력이 필요하다.

통상, 가물은 해석 관점에 따라 기상학적, 수문학적, 농업적 가물 등으로 구분된다. 기상학적 가물은 특정 지역 및 기간 동안의 강수량 부족 및 무강수 일수의 지속, 수문학적 가물은 지표 및 지하수 수분, 하천유량 및 저수지의 부족, 농업적 가물은 농작물 생육에 관계되는 토양수분의 부족에 의한 경우에 해당되며(Wilhite and Glantz, 1985; American Meteorological Society, 2004), 이를 해석하기 위해서는 주로 가물지수가 활용된다. 가물지수는 가물의 정도를 정량적으로 제시하는 도구로써, 특정 기간과 과거 수십년(30년 이상) 동안의 수문기상인자(강수량, 유출량, 토양수분량, 증발산량, 저류량 등)와의 비교를 통해 산정된다(Kwon et al., 2006; Yoo et al., 2010; Kwon et al., 2013).

기후변화에 따른 가물 영향 평가는 주로 가물지수가 활용되며, 이와 관련하여 그동안 많은 연구가 수행되어 왔다. Blenkinsop and Fowler (2007)은 여러 기후시나리오와 GCMs 자료를 이용하여 기상학적 가물지수인 DSI (Drought Severity Index)를 산정하고 가물의 빈도, 심도, 지속기간의 변화를 평가하였다. Burke et al. (2010)과 Burke and Brown (2010)은 비정상성 극치값 분석을 통해 3, 6, 12, 18 개월 지속기간의 가물지수를 산정하여 영국전역에 기후변화에 따른 가물의 영향을 분석하였다. Wang et al. (2011)은 SPI와 수문학적 및 농업적 가물지수인 SRI, SSWI (Standardized Soil Water Index)를 이용하여 가물의 강도, 빈도, 지속기간의 변화를 평가하였다. Tigkas et al. (2012)은 SDI (Streamflow Drought Index)를 이용하여 기후변화에 따른 좁은 소유역 지역에서의 가물 영향을 평가하였다. Jung and Chang (2012)는 다수의 기후시나리오와 단일 수문해석모형으로부터 rSPI (relative Standardized Precipitation Index), rSRI (relative Standardized Runoff Index)를 산정하고 가물의 공간적인 발생 패턴을 전망하였다. 국내의 경우 Kim et al. (2010)은 미래 시나리오로부터

SPI 지수를 산정하고 SAD (Severity-Area-Duration)곡선을 유도하여 미래 가물의 변화를 전망하였다. Kim et al. (2011)은 기상청 RCM (Regional Climate Model)으로부터 전국에 SPI를 산정하고 가물의 발생빈도의 변화를 전망하였으며, Lee and Kim (2012a)은 3개 GCMs로부터 SPI를 산정하고 SDF (Severity-Duration-Frequency) 곡선을 유도 및 전망하였다.

이처럼 기후변화에 따른 가물 전망에 관해 여러 연구가 수행되어 왔으며, 주로 미래의 불확실성을 고려하기위해 다수의 GCMs의 결과를 활용하고, 기상, 수문 및 농업 등 다양한 가물지수를 활용하는 것으로 조사되었다. 그러나 국내에서는 다수의 GCMs를 활용하는 추세이나, 아직은 기상학적 가물지수에 많이 의존하고 있는 실정이다. 기후변화가 기온 및 강수의 변화를 야기한다고 볼 때, 이에 대한 가물전망을 위해서는 기상학적 가물지수 뿐만 아니라, 수문학적 및 농업적 가물 지수도 같이 활용되어야 할 것이다. 또한, 미래의 불확실성 측면에서 여러 모형의 결과를 활용하는 것이 적절할 것이다(Jung et al. 2013). 따라서 본 연구에서는 다수의 기후 및 수문모델에 의한 기상학적, 수문학적 및 농업적 가물지수 생산을 통해 우리나라의 가물을 전망하고 각 전망결과에 따른 차이를 검토하고자 한다.

## 2. 연구수행 방법

본 연구에서는 미래 기후 및 수문시나리오를 이용하여 국내 가물전망정보를 생산 및 분석하고자 하며, 연구수행 절차는 다음 Fig. 1과 같다. 본 연구의 대상유역은 우리나라 109개 중권역이며, 사용된 미래 기후 및 수문성분 자료는 1976~2099년까지의 기온, 강수량, 유출량, 증발산량 및 토양수분량이다. 평가기간은 과거(historical) 기준기간 30년(1976~2005년)과 미래 2020s (2010~2029년), 2050s (2030~2069년), 2080s (2070~2099년)의 3기간으로 구분하였다. 5개의 성분들 중 강수, 유출 및 토양수분량 정보로부터 전체 기간에서의 가물지수를 산정하고자하며, 과거기간 대비 미래기간의 가물 경향성 및 발생빈도 분석을 통해 변화를 전망하고자 한다.

### 2.1 기후 및 수문시나리오

기후시나리오를 생산하는 가장 보편화된 방법은 GCM의 실험결과를 사용하는 방법으로 온실가스배출시나리오를 GCM의 경계 자료로 입력하여 시나리오에 따른 기후의 변화를 모의하는 것이다(Bae et al. 2008). IPCC

Data Distribution Center (<http://www.ipccdata.org>)에서는 SRES (Special Report on Emission Scenarios)를 기초로 생산된 23개 GCMs 결과를 제공하고 있다. 본 연구에서는 온실가스 배출에 관한 규제가 적용되지 않았을 경우의 고배출시나리오인 A2 (2100년 기준 CO<sub>2</sub>농도 830 ppm)를 이용하였다. 또한, 확률론적 불확실성 분석을 통해 가뭄 모의에 적합한 GCM을 평가하였으며, Table 1과 같이 영국 UKMO의 HadCM3, 프랑스 CNRM의 CM3와 IPSL의 CM4가 선정되었다(National Emergency Management Agency, 2013). GCM 선정의 자세한 사항은 Jeong et al. (2004), Le and Bae (2013), NEMA (2013)을 참조하길 바란다. 국내지역을 평가하기 위해 GCM 결과를 상세화하였으며, 상세화 기법은 전이함수를 이용하여 공간적으로 상세화하고 일기상발생기를 이용하여 시간적으로 상세화하는 조합(hybrid) 기법을 사용하였다. 사용한 전이함수는 주성분분석 기법 중 하나인 CSEOF (CycloStationary Empirical Orthogonal Function)와 다중선형회귀분석을 이용하여 100~350 km의 GCM 결과를 국내 기상관측소 54개 지점으로 공간적으로 상세화하였으며, 일기상발생

기는 Lee et al. (2010)이 제안한 시공간적 상관을 고려한 일기상발생기를 이용하여 월단위 기후시나리오를 일단위로 상세화하였다. CSEOF분석은 특정주기를 가지는 패턴(연주기, 경년주기 등)을 가장 잘 추출할 수 있는 기법 중 하나로, 추출된 주성분 시계열을 이용하면 광역규모 변수와 지역규모 변수사이의 물리적·역학적 연관성을 파악할 수 있다(Shin et al., 2009).

수문시나리오 생산을 위해 국내 수문모형에 대한 적용 사례를 검토하였다. 특히 최근 연구들에서 미래 수문 전망 시 수문모형의 구조 및 매개변수에 따라 불확실성이 나타나며, 특히 저유량 모의 시 그 불확실성이 더욱 크다는 결과들이 제시되고 있다(Jiang et al., 2007; Bae et al., 2011; Velazquez et al., 2013). 따라서 본 연구에서는 국내 적용성이 검토되고 최근 기후변화 영향평가에 많이 적용되고 있는 PRMS (Leavesley et al., 1983), SWAT (Arnold et al., 1993), SLURP (Kite et al., 1994)로 총 3개의 수문모형을 선정하였다. 결론적으로 Fig. 2와 같이 3개 GCMs, 3개 수문모형의 총 9개 수문시나리오 결과를 생산하여 미래 가뭄 전망에 활용하고자 한다.

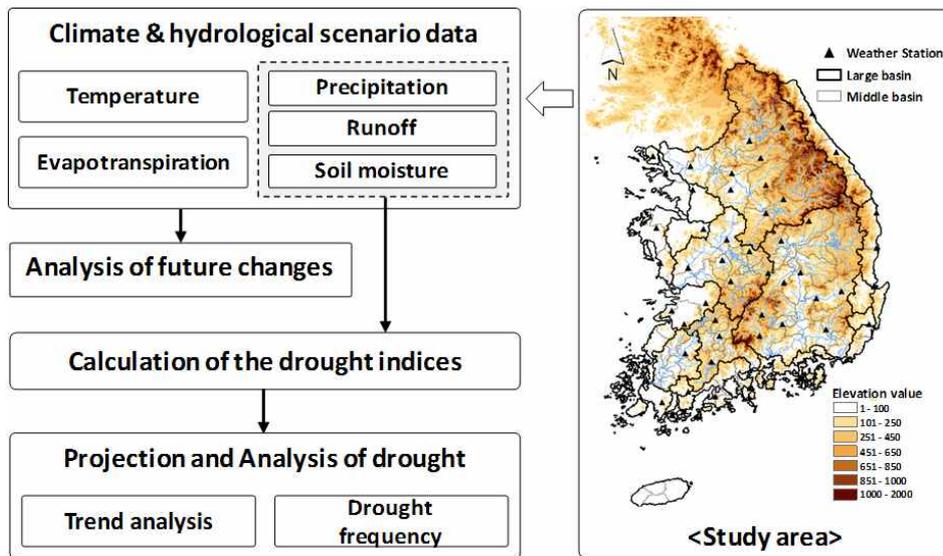


Fig. 1. Flow Chart of this Study

Table 1. Status of the Selected GCMs

No.	Model (agency: version)	Abb.	Country	Resolution	
				Atmospheric	Ocean
1	CNRM: CM3	CNR	France	128 × 64	180 × 170
2	UKMO: HADCM3	UKC	UK	96 × 73	288 × 144
3	IPSL: CM4	IPS	France	96 × 72	180 × 170

## 2.2 가뭄지수

미래 기후 및 수문정보로부터 가뭄을 전망하기 위해서는 가뭄해석 도구인 가뭄지수의 활용이 요구된다. 본 연구에서는 기상학적, 수문학적 및 농업적 가뭄에 분류되고 국내 가뭄해석에 적용성이 검증된 바 있는 SPI, SRI 및 SSI (Standardized Soil moisture Index)를 선정하였다 (Lee et al., 2006; Son et al., 2011; Wang et al., 2011; Bae et al., 2012). SPI는 강수량 부족에 대한 확률적 특성을 적용한 것으로 특정 월에 해당하는 과거(30년 이상) 강수량 자료에 대한 누가확률분포함수로부터 해당 월의 강수량에 대한 누가확률을 계산하고 표준화를 거쳐 최종 지수를 산출하는 방식이다(McKee et al., 1994). SRI 및 SSI는 입력 자료에서 유출량 및 토양수분량 정보가 활용되는 것 외에는 산정방식이 SPI와 동일하며, 여기서의 유출량은 인위적인 요인(댐, 저수지 등)이 배제된 자연 조건에서 발생하는 성분을 뜻한다. 다만, SRI는 지면에서의 지표 및 지하수 유출과 응설 등의 영향이 반영된 유출량의 거동, SSI는 토양에 침투, 증발산, 침투 등의 영향이 반영된 토양수분량의 거동을 가뭄해석에 고려하기위해 개발된 것으로 강수량만을 이용한 기존 SPI와는 그 개념이 다르다(Shukla and Wood, 2008; Son et al., 2011). SPI, SRI 및 SSI는 다양한 지속기간 구분(1, 3, 6, 12개월 등)이 가능하여 장단기 가뭄해석에 있어 유용하다. 국내에서는 지속기간 3개월의 SPI(3), SRI(3) 및 SSI(3)이 주로 활용되며(Bae et al., 2012; Kwon et al., 2013), 본 연구에서는 이를 이용하여 우리나라 109개 중권역 대해 가뭄지수를 생산하고자 한다. Table 2는 3개 지수값의 범위별 심도를 나타낸 것이다.

Fig. 2는 기후, 수문 시나리오로부터 SPI, SRI 및 SSI의 산정방법을 나타낸 것이다. 전체 기간인 1976~2099년 동안에 다수의 GCMs와 수문모형의 모의를 통해 강수(P), 유출(R) 및 토양수분량(S)을 생산한다. 가뭄지수 생산을 위해

각 자료로부터 연도별 과거 3개월 누적평균 값을 계산한다. 누가확률값의 추정을 위해 빈도해석이 요구되며, 적정확률 분포형은 기존 연구에서 활용되었던 Gamma 분포(강수), Log pearson type-3 분포(유출), Wakeby 분포(토양수분)를 이용하였다(Son et al., 2011). 해당월의 값으로부터 누가확률값을 산정한 후, 이를 표준정규분포상의 동일한 누가확률값에서의 X축 값을 읽어 최종 가뭄지수를 산정하게 된다.

## 2.3 미래 가뭄의 변화 분석

과거(1976~2005년) 및 미래기간(2010~2099년)에 생산된 가뭄지수로부터 미래 변화를 분석하기위해 본 연구에서는 가뭄의 경향성 및 발생빈도 분석을 수행하고자 한다. 경향성 분석의 경우 장기간의 시계열자료의 경향성을 분석하기 위한 비모수적 경향성 검정방법인 Mann-Kendall (M-K) test를 이용하였다(Gibsons, 1990). 다른 통계학적 검정방법들의 경우 표본크기 분산, 왜곡도와 같은 표본자료 특성에 영향을 받지만, 이 방법은 표본자료의 특성에 민감하지 않고 간편하면서도 강력한 경향성 분석 기능을

Table 2. Classification of Drought Severity for the Range of Indices Values

SPI, SRI, SSI values	Drought category
$2.00 \leq Z$	Extreme wet
1.99 ~ 1.50	Very wet
1.49 ~ 1.00	Moderately wet
0.99 ~ 0.00	Near normal
0.00 ~ -0.99	Mild Drought
-1.00 ~ -1.49	Moderate Drought
-1.50 ~ -1.99	Severe Drought
$-2.00 \geq Z$	Extreme Drought

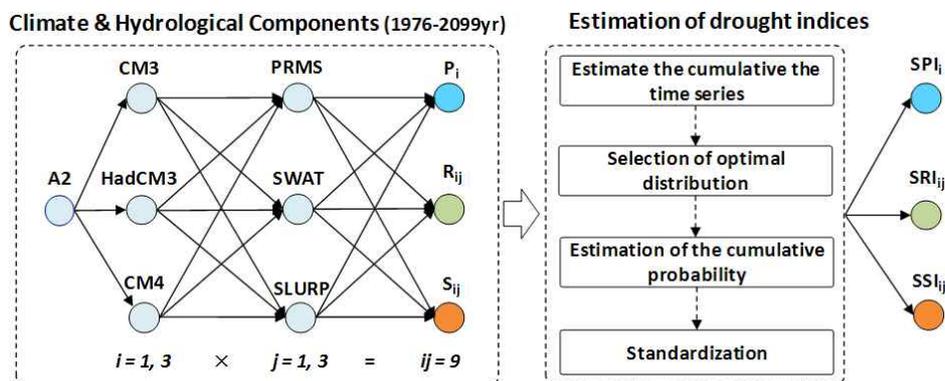


Fig. 2. Estimation Method of Future Drought Indices using Multiple Climate & Hydrological Model

갖는다. 또한, 결측치나 분석 한계를 벗어나는 자료에 대해서도 적용이 가능하여 수문기상 및 가뭄 변수들의 경향성 연구에 광범위하게 적용되고 있다(Lee et al., 2012). 본 연구에서는 M-K test를 이용하여 신뢰수준(significant level)을 95%에 대해 109개 중권역의 계절별 가뭄증감 경향을 분석하고자 한다. 발생빈도는 미래 3기간마다 각 기간별 지수가 가뭄으로 인지하는 -1.0 이하의 값의 횟수를 산정한 후, 기간 대비 백분율을 계산하여 얻게 되며 (Vidal and Wade, 2009; Jung and Chang, 2012), 본 연구에서는 Table 2의 가뭄심도별 과거대비 미래 가뭄의

발생빈도 변화와 공간적 분포를 통해 지역적인 가뭄변화를 분석하고자 한다.

### 3. 기후 및 수문정보의 변화 분석

본 연구에서는 A2 시나리오에 대해 3개 GCMs (CM3, HadCM3, CM4)의 기상전망 및 3개 수문모형(PRMS, SWAT, SLURP)의 수문전망 결과를 이용하였으며, 수문 모형의 지형 입력자료 및 매개변수는 기존 연구의 성과를 활용하였다(Bae et al., 2011). Fig. 3은 109개 중권역별

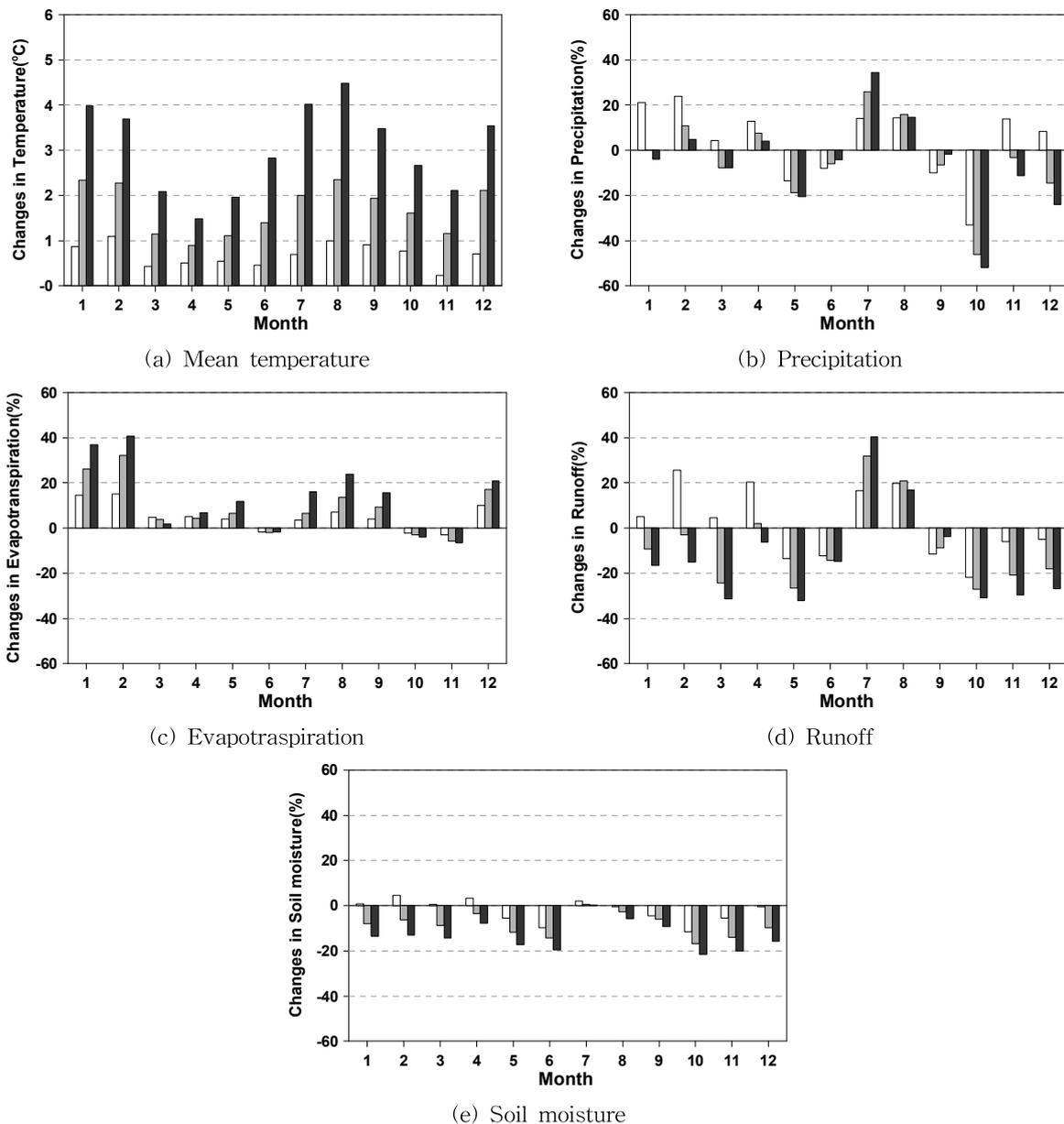


Fig. 3. Changes Analysis of Future Climate and Hydrological Components

1976~2099년 동안 강수, 평균기온, 유출량, 증발산량 및 평균토양수분량에 대한 과거(historical)대비 미래 3기간(2020s, 2050s, 2080s)의 월별 변화율을 각각 산정한 후, 이를 최종 평균하여 나타낸 것이다. 월별 평균기온은 미래 3기간 모두 상승하였으며, 2080s 기간의 7월, 8월, 9월에 4.0~4.5℃, 1월, 2월, 12월에 3.5~4.0℃로 상승폭이 가장 크게 나타났다. 강수량의 변화는 미래 3기간 모두 2월(4.8~23.8%), 4월(4.1~12.9%), 7월(14.1~34.4%) 및 8월(14.3~15.9%)에 증가, 나머지 월에서는 2020s 기간의 일부를 제외하고 강수량이 모두 감소하였으며, 특히 10월에 -33.1~-51.9%로 크게 감소하는 것으로 나타났다. 증발산량은 6월, 10월, 11월을 제외한 모든 월에서 증가하였으며, 겨울철인 1월이 미래 3기간 동안 14.7~36.9%, 2월이 15.1~40.8%로 증가율이 가장 높게 나타났다. 유출량은 7월 및 8월에 미래 3기간 모두 증가, 2020s 기간의 1월, 3월, 4월을 제외한 나머지 월의 유출량은 3기간 모두 감소하였으며, 2080s 기간에 10월, 11월 및 12월 유출량이 -28.3~-30.4%로 감소율이 가장 높았다. 토양수분의 경우 2020s 기간에 1~4월과 7월 및 8월에 강수량의 영향으로 0.5~4.5% 정도 증가하나 나머지 월에서는 -0.4~11.5%로 감소, 2050s 기간에서는 7월을 제외한 모든 월이 -2.8~-16.8%로 감소, 2080s 기간에서는 -5.8~-21.7%로 감소하는 것으로 전망되었다.

대체로 유출량은 강수량 변화와 유사하지만, 기온상승에 따른 증발산량 변화가 높은 월(1월, 2월 등)에서는 강수량이 증가할 지라도 유출량이 감소하였다. 또한 토양수분량은 2월과 같이 강수량이 증가하여도 증발산량의 증가로 감소하였으며, 반대로 6월과 같이 증발산량이 감소해도 강수량의 큰 감소로 양이 더욱 감소하는 것으로 나타났다. 결국 가뭄지수 산정에 활용되는 3개의 성분(강수, 유출 및 토양수분량)들 중에서 토양수분량의 감소가 가장

크며, 이로 인해 농업적 가뭄인 SSI의 변화에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

## 4. 가뭄전망 및 분석

### 4.1 경향성 분석

109개 중권역별 SPI, SRI 및 SSI를 산정하였으며, M-K test를 통해 미래의 계절별 가뭄지수의 증감의 경향과 통계적 유의수준을 분석하였다(Table 3). 표에서 ▲는 가뭄지수 값의 경향이 증가하고 유의수준이 95% 이상인 경우, △는 경향은 증가하지만 유의수준이 95% 이하인 경우, ▼는 경향이 감소하고 유의수준 95% 이상인 경우, ▽는 경향은 감소하지만 95% 이하인 경우를 의미한다. 경향이 증가함은 Table 2와 같이 지수의 값이 습윤(wet) 상태로의 변화로 가뭄이 약화, 경향이 감소함은 가뭄상태로의 변화로 가뭄이 심화됨을 의미한다. 또한, Table 안의 수치는 전체유역에서 각각의 수준을 만족하는 중권역 개수, 팔호안의 값은 개수의 비(해당유역의 개수/전체 유역의 개수)를 백분율(%)로 나타낸 것이다.

봄철(3월, 4월, 5월) SPI의 경우 유역 전체가 감소하는 경향이 나타났으나, 95%의 유의수준을 만족하지 못하였다. 이는 가뭄지수가 지속기간 3개월 자료를 활용함에 따라 Fig. 3에서와 같이 1월, 2월 및 4월 강수량 증가가 5월 강수량 감소의 영향보다 더 크기 때문이다. SRI는 1월, 2월, 3월 및 5월 유출량의 감소로 30.3%가 유의수준을 만족하는 감소의 경향을 보였으며, SSI는 봄철 토양수분량의 감소로 전 유역의 47.7%가 감소의 경향을 보였다. 겨울철(12월, 1월, 2월) SPI는 10~12월 강수의 감소로 유역의 56.9%가 유의수준을 만족하는 감소경향을 보였으며, SRI는 82.6%가 감소, SSI는 거의 모든 유역에서 유의수준 95% 이상의 감소경향을 보였다. 여름철(6월, 7월, 8월)

Table 3. Seasonal M-K Test Results of SPI, SRI and SSI

Period	SPI				SRI				SSI			
	▲	△	▽	▼	▲	△	▽	▼	▲	△	▽	▼
Spr	0 (0.0%)	0 (0.0%)	109 (100.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	76 (69.7%)	33 (30.3%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	57 (52.3%)	52 (47.7%)
Sum	2 (1.8%)	104 (95.4%)	3 (2.8%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	67 (61.5%)	42 (38.5%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	51 (46.8%)	58 (53.2%)
Aut	0 (0.0%)	80 (73.4%)	29 (26.6%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	3 (2.8%)	106 (97.2%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	94 (86.2%)	15 (13.8%)
Win	0 (0.0%)	0 (0.0%)	47 (43.1%)	62 (56.9%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	19 (17.4%)	90 (82.6%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	2 (1.8%)	107 (98.2%)

은 7월 및 8월의 강수량, 유출량의 증가로 SPI 및 SRI가 95.4%, 61.5%의 증가 경향이 있으나 모두 유의수준을 만족하지 못하였다. SSI의 경우 기온상승과 증발산량의 영향으로 53.2%가 감소 경향이 강하게 나타났다. 가을철(9월, 10월, 11월) SPI는 10월 강수가 크게 감소하였을 지라도 7월, 8월의 강수량 증가로 인해 26.6%가 유의수준을 만족하지 못한 감소 경향이 나타났으며, SRI도 이와 유사하였다. SSI는 86.2%가 감소의 경향을 보였으나, 통계적으로 유의하지 못하였다. SPI 및 SRI는 봄철 및 겨울철 가뭄 경향이 감소하였으며, 그 중, 겨울철 가뭄이 가장 심화될 것으로 전망되었다. SSI는 가을철을 제외한 나머지 계절에서 지수의 감소 경향이 강하게 나타나 3지수들 중에서 가뭄이 가장 심각할 것으로 전망되었다.

#### 4.2 심도별 가뭄 발생빈도의 변화 분석

Fig. 4는 109개 중권역별로 산정된 3개 가뭄지수를 과거 및 미래 3기간으로 구분한 후, 각 심도에 따른 기간별 가뭄 발생빈도의 변화를 Box-Whisker 그래프로 도시한

결과이다. 중간의 박스를 기준으로 최하단과 최상단 선은 자료의 최소값과 최대값을 나타내며, 박스의 상하단 경계는 초과확률 25% (first quartile)과 75% (third quartile)을 의미하고 박스 내의 선은 중앙(median)값을 나타낸다. 보통(Moderate) 가뭄의 경우 SPI는 평균적으로 과거기간 7.0%, 2020s 6.9%, 2050s 7.9%, 2080s 8.1%로 미래 3기간 모두 큰 차이가 없었으나, SRI는 과거 10.2%에서 2020s 기간에는 7.8%로 감소, 2050s 11.4%, 2080s 14.1%로 3.9% 정도 증가할 것으로 전망되었다. SSI는 과거 10.1%, 2020s 11.9%, 2050s 15.9%, 2080s 17.1%로 7.0% 증가할 것으로 전망되어 3지수들 중에서 발생빈도가 가장 높은 것으로 확인되었다. 심한(severe) 가뭄에서는 SPI의 경우 보통 가뭄에서와 같이 과거 및 미래 3기간의 차이가 미비하지만, SRI는 과거와 미래 3기간이 3.5%, 4.4%, 5.0% 및 5.5%, SSI는 4.7%, 5.0%, 6.1% 및 8.8%로 미래로 갈수록 빈도가 증가하였다. 극심한(extreme) 가뭄에서는 SPI의 발생빈도가 과거 3.6%에서 2020s, 2050s 기간에 감소, 2080s 기간에서 4.2%로 1.2% 증가하였으며, SRI는 과거

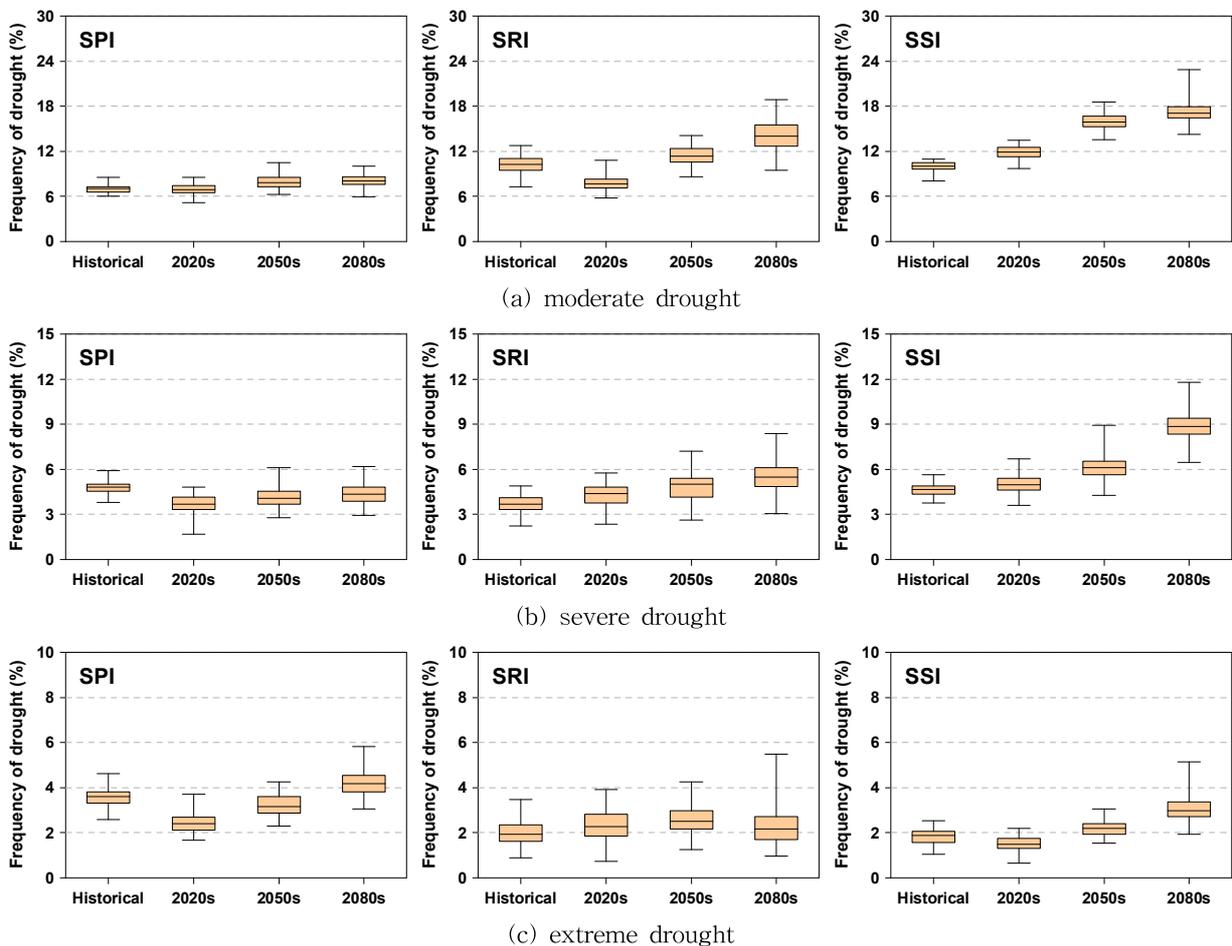


Fig. 4. Analysis of Future Drought Frequency for Given SPI, SRI and SSI

1.9%, 미래 3기간이 2.2%, 2.6%, 2.1%, SSI는 과거 1.9%, 미래 3기간이 각각 1.5%, 2.2%, 3.0%로 증가하였다. 대체로 3지수들 중 SSI의 가뭄 발생빈도가 가장 높으며, SPI는 보통 가뭄, 극심한 가뭄, SRI 및 SSI는 모든 심도에서 발생빈도가 증가하는 것으로 전망되었다. 이는 Fig. 3에서와 같이 토양수분, 유출량 및 강수량 순으로 토양수분의 감소율이 높기 때문이며, 감소율이 낮은 강수량의 영향으로 SPI의 가뭄 발생빈도는 낮게 추정되었다. 또한, SPI의 극심한 가뭄발생빈도의 증가는 감소가 큰 10월 및 12월 강수량에 의한 것으로 확인되었다.

### 4.3 지역적 가뭄 발생빈도의 변화 분석

경향성 분석 및 심도별 가뭄 발생빈도 분석을 통해 우리나라는 주로 봄철과 겨울철 가뭄이 증가하고 그 중, 2080s에 가뭄이 더욱 심화될 것으로 전망되었다. 2080s에 대한 봄철 및 겨울철의 가뭄 변화를 지역적으로 분석하고자 Fig. 5와 같이 과거 및 미래 기간의 가뭄발생빈도(-1.0 이하)를 계산하여 도시하였다. 한강, 낙동강, 금강 및 영산·섬진강 권역 순으로 과거대비 미래의 강수량, 유출량 및 토양수분량의 변화율과 가뭄발생빈도의 차이를 검토

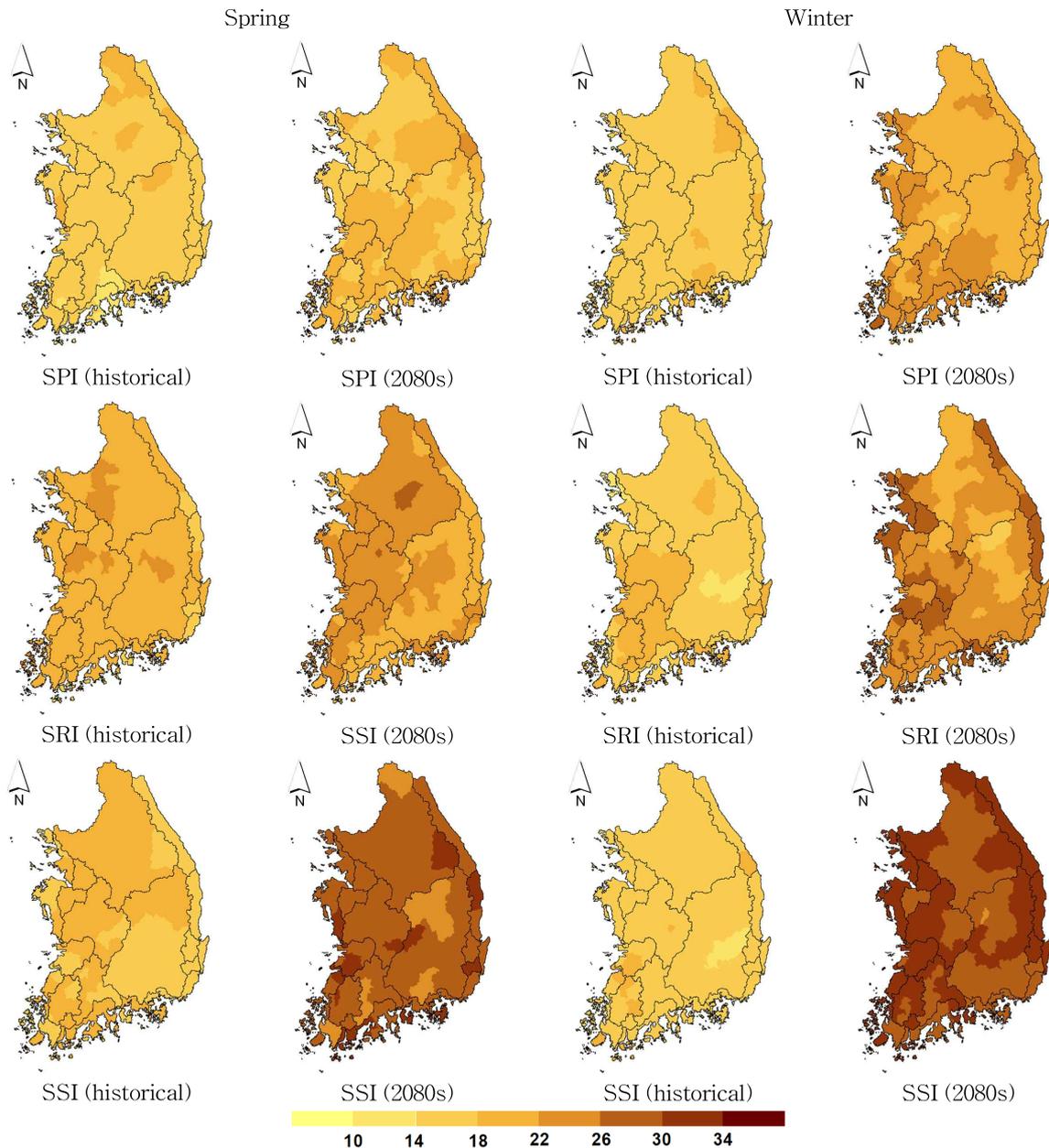


Fig. 5. Spatial Analysis of Drought Frequency in Spring And Winter

해보면 봄철의 경우 강수량은 -4.2%, -8.0%, -8.9% 및 -11.1% 감소, SPI는 0.4%, 2.5%, 2.7%, 3.6% 증가로 영산·섬진강 권역의 가뭄이 높게 증가할 것으로 전망되었다. 유출량은 권역별 -21.7%, -19.2%, -21.6% 및 -19.1% 감소, SRI는 3.1%, 2.0%, 3.9%, 2.0% 증가로 금강 권역의 가뭄빈도가 높으며, 토양수분량은 권역별 -17.6%, -19.5%, -20.5% 및 -15.7% 감소, SSI는 9.8%, 10.8%, 11.3%, 8.8% 증가로 금강 권역의 가뭄빈도가 높은 것으로 나타났다. 겨울철에는 권역별 강수량이 -7.2%, -9.6%, -10.0%, -12.1% 감소, SPI는 4.8%, 5.0%, 5.1%, 6.2% 증가, 유출량은 -7.7%, -22.8%, -23.0%, -25.0% 감소, SRI는 3.9%, 6.5% 6.7% 및 7.3% 증가로 영산·섬진강 권역의 가뭄발생빈도가 높으며, 토양수분량은 -20.9%, -21.1%, -18.8%, -18.1% 감소, SSI는 14.5%, 14.7%, 13.8%, 13.5% 증가로 낙동강 권역의 가뭄 발생빈도가 높게 나타났다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 IPCC SRES A2 시나리오 상황에서의 GCMs로부터 3개 수문모형을 이용하여 미래 기후·수문정보를 생산하였으며, 이를 통해 기상학적, 수문학적 및 농업적 가뭄으로 분류되는 SPI, SRI, SSI를 산정하여 미래 가뭄의 변화를 전망 및 분석하였다. 본 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 과거기간 대비 미래 2020s, 2050s, 2080s 기간에 대해 월별 기후 및 수문성분의 변화를 검토하였다. 기온은 미래 3기간 모두 상승하였으며, 2080s 기간에 7월, 8월, 9월에 4.1~4.5°C, 1월, 2월, 12월에 3.5~4.0°C로 상승폭이 가장 크게 나타났다. 강수량은 7월 및 8월을 제외하고 대체로 감소하였으며, 특히, 10월에 -33.1~51.9%로 크게 감소하는 것으로 전망되었다. 증발산량은 6월, 10월, 11월을 제외하고 모두 1.9~40.8%의 범위로 증가할 것으로 전망되었으며, 유출량은 7월, 8월과 2020s 기간의 일부 월을 제외하고는 -3.0~-32.1%의 범위로 감소할 것으로 전망되었다. 토양수분도 이와 유사하게 -0.4~-17.3%의 범위로 감소할 것으로 전망되었다.
- 2) 109개 중권역별 산정된 가뭄지수로부터 M-K test를 통해 계절별 미래 가뭄의 경향성을 분석하였다. SPI는 여름 및 가을철에 가뭄 악화되는 경향이 있으며, 봄철 전 유역에 가뭄이 심화되는 경향이 있으나 통계적으로 유의하지 못하였다. 겨울철에는 56.9% 지역의 가뭄이 심화되는 경향을 보이고 유의수준을

모두 만족하였다. SRI는 봄철 30.3%, 겨울철 82.6% 지역에서 가뭄이 심화되었으며, 통계적으로 유의하였다. SSI는 봄, 여름 및 겨울철에 대다수의 유역에서 가뭄이 심화될 것으로 전망되었고 통계적으로 유의하였다.

- 3) 심도별 미래 가뭄발생빈도의 변화를 분석하였다. 토양수분량 및 유출량에 비해 감소율이 낮은 강수량의 영향으로 SPI의 경우 보통 가뭄에서는 경미하게 증가하였고, SRI는 과거대비 미래 최대 3.8%, SSI는 최대 7.0%까지 증가하였다. 심한 가뭄에서는 SPI의 차이는 크지 않고, SRI가 2.0%, SSI가 8.8%로 미래로 갈수록 빈도가 증가하였다. 극심한 가뭄에서는 감소가 큰 10월 및 12월 강수량에 의해 SPI가 과거 3.6%에서 2020s, 2050s 기간에 감소하다가 2080s 기간에서 4.2%로 약 1.2% 증가하였으며, SRI는 과거 1.9%, 미래 3기간이 2.2%, 2.6%, 2.1%, SSI는 과거 1.9%, 미래 1.5%, 2.2%, 3.0%로 과거대비 증가하였다.
- 4) 권역별 봄철 및 겨울철 과거대비 미래(2080s)의 가뭄 발생빈도 변화를 분석하였다. 한강, 낙동강, 금강 및 영산·섬진강 권역 순으로 봄철에는 강수량의 -4.2%, -8.0%, -8.9% 및 -11.1% 감소로 SPI가 0.4%, 2.5%, 2.7%, 3.6% 증가, 유출량의 -21.7%, -19.2%, -21.6% 및 -19.1% 감소로 SRI가 3.9%, 2.0%, 3.1%, 2.0% 증가, 토양수분량의 -17.6%, -19.5%, -20.5% 및 -15.7% 감소로 SSI가 9.8%, 10.8%, 11.3%, 8.8% 증가하였다. 겨울철은 강수량의 -7.2%, -9.6%, -10.0%, -12.1% 감소로 SPI가 4.8%, 5.0%, 5.1%, 6.2% 증가, 유출량의 -7.7%, -22.8%, -23.0%, -25.0% 감소로 SRI가 3.9%, 6.5% 6.7% 및 7.3% 증가, 토양수분량의 -20.9%, -21.1%, -18.8%, -18.1% 감소로 SSI가 14.5%, 14.7%, 13.8%, 13.5%로 증가하였다. 대체로 봄철 보다는 겨울철 가뭄빈도가 높으며, SPI 및 SRI는 영산·섬진강 권역, SSI는 낙동강 권역에서 높게 증가할 것으로 전망되었다.

결론적으로 미래 기후변화에 따라 기상학적, 수문학적 및 농업적 가뭄이 다르게 발생하며, 특히, 농업적 가뭄 발생이 높고 봄철 및 겨울철에 더욱 극심해질 것으로 전망되었다. 이는 기후변화로 인한 기온상승이 기상학적 가뭄 보다는 수문학적 및 농업적 가뭄에 큰 영향을 미친다고 볼 수 있으며, 앞으로의 기후변화에 따른 가뭄전망은 본 연구에서와 같이 여러 가뭄지수의 활용이 필요하다고 사료된다. 본 연구의 결과는 현재 SRES 기반의 AR4 기후 시나리오를 활용한 것으로, 전 세계적으로 생산된 AR5

기반의 기후시나리오가 구축된다면 이에 대한 추가 분석을 수행하고자 한다. 또한, 해석된 가뭄정보는 용수이용 사항이 배제된 것으로 향후 이를 고려한 가뭄전망 및 분석을 수행하고자 한다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발사업(CATER 2012-3100)과 소방방재청 자연재해저감기술개발사업의 지원으로 수행한 ‘국가 가뭄재해 상황관리 정보시스템 구축’ [NEMA-자연-2011-40]과제의 성과이며, 이에 감사드립니다.

## References

- American Meteorological Society. (2004). Statement on meteorological drought, Bulletin of the American Meteorological Society.
- Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bernhardt, G. (1993). “A comprehensive surface-groundwater low model” *Journal of Hydrology*, Vol. 142, pp. 47-69.
- Bae, D.H., Jung, I.W., and Lettenmaier, D.P. (2011) “Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4 GCM simulation of the Chungju Basin, Korea.” *Journal of Hydrology*, Vol. 401, pp. 90-105.
- Bae, D.H., Jung, I.W., and Chang, H. (2008). “Potential changes in Korean water resources estimated by high-resolution climate simulation.” *Climate Research*, Vol. 35, pp. 213-226.
- Bae, D.H., Jung, I.W., and Lee, B.K. (2007). “Outlook on variation of water resources in Korea under SRES A2 Scenario.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 12, pp. 921-930.
- Bae, D.H., Son, K.H., Ahn, J.B., Hong, J.Y., Kim, G.S., Chung, J.S., Jeong, U.S., and Kim, J.K. (2012), “Development of real-time drought monitoring and prediction system on Korea & East Asia Region.” *Atmosphere, Korean Meteorological Society*, Vol. 22, No. 2, pp. 267-277.
- Bae, D.H., Son, K.H., and Kim, H.A. (2013). “Derivation & evaluation of drought threshold level considering hydro-meteorological data on South Korea.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 3, pp. 289-300.
- Blenkinsop, S., and Fowler, H.J. (2007). “Changes in drought frequency, severity and duration for the British Isles projected by the PRUDENCE regional climate model.” *Journal of Hydrology*, Vol. 342, pp. 50-71.
- Burke, E.J., and Brown, S.J. (2010). “Regional drought over the UK and changes in the future.” *Journal of Hydrology*, Vol. 394, pp. 471-485.
- Burke, E.J., Perry, R.H.J., and Brown, S.J. (2010). “An extreme value analysis of UK drought and projections of change in the future.” *Journal of Hydrology*, Vol. 388, pp. 131-143.
- Dai, A., Trenberth, K.E., and Qian, T. (2004). “A global dataset of palmer drought severity index: Relationship with soil moisture and effects of surface warming.” *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 5, pp. 1117-1129.
- Gibbons, J.D. (1990). *Handbook of statistical methods for engineers and scientists*. McGrawHill, ed Harroson M.W.
- IPCC (2001). Climate change 2001 : The Scientific Basis, IPCC Contribution of Working Group III of the inter-governmental Panel on Climate Change (Nakicenovic N and lead authors). Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Jeong, C.S., Heo, J.H., and Bae, D.H. (2004). “Uncertainty analysis of GCM information in Korea using probabilistic diagnostics.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 3, pp. 173-184.
- Jiang, T., Chen, Y.D., Xu, C., Chen, X., Chen, X., and Singh, V.P. (2007). “Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China.” *Journal of Hydrology*, Vol. 336, pp. 316-333.
- Jung I.W., Bae, D.H., Lee, B.J. (2013) “Possible change in Korean streamflow seasonality based on multi-model climate projections.” *Hydrological Processes*, Vol. 27, No. 7, pp. 1033-1045.
- 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*, DOI:10.1007/s00704-011-0531-8.
- Kim, H.S., Park, H.S., Yoon, J.Y., and Kim, S.D. (2010).

- “Application of SAD curves in assessing climate-change impacts on spatio-temporal characteristics of extreme drought events.” *Journal of Korean Society on Civil Engineering*, Vol. 30, No. 6B, pp. 561–569.
- Kite, G.W., Dalton, A., and Dion, K. (1994). “Simulation of streamflow in a macroscale watershed using general circulation model data.” *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 5, pp. 1547–1559.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2012). Development of Hydro-Meteorological Early Warning System for Response to Climate Change.
- Kwon, H.J., Park, H.J., Hong, D.O., and Kim, S.J. (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, J.J., Ahn, J.H., and Kim, T.W. (2013). “Development on classification standard of drought severity.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 2, pp. 195–204.
- Le, V.T., Bae, D.H. (2013). “Evaluating the utility of IPCC AR4 GCMs for watershed application in South Korea.” *Water Resource Management*, Vol. 27, No. 9, pp. 3227–3246.
- Leavesley, G.H., Lichty, R.W., Troutman, B.M., and Saindon, L.G. (1983). “Precipitation-runoff modeling system.” User’s manual, by Water-Resources Investigations, pp. 83–4238.
- Lee, D., An, H., Lee, Y., Lee, J., Lee, H., and Oh, H. (2010). “Improved multisite stochastic weather generation with applications to historical data in South Korea.” *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Science*, Vol. 46, No. 4, pp. 497–504.
- Lee, J.H., and Kim, C.J. (2012a). “A multimodel assessment of the climate change effect on the drought severity-duration-frequency relationship.” *Hydrological Process*, DOI:10.1002/hyp.9390.
- Lee, J.H., Cho, K.J., Kim, C.J., and Park, M.J. (2012b). “Analysis on trend, periodicities and frequencies of Korea drought using drought indices.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 1, pp. 78–89.
- Lee, J.H., Jeong, S.M., Kim, S.J., and Lee, M.H. (2006). “Development of drought monitoring system: I. Applicability of drought indices for quantitative drought monitoring.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 9, pp. 787–800.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1995). “Drought monitoring with multiple time scales preprints.” *9th Conference on Applied Climatology*, 15–20 January, Dallas, TX, pp. 223–236.
- National Emergency Management Agency (NEMA) (2013). Establishment of National Drought Disaster Information System.
- Sheffield, J., and Wood, E.F. (2008). “Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations.” *Climate Dynamics*, Vol. 31, pp. 79–105.
- Shin, J.H., Lee, H.S., Kwon, W.T., and Kim, M.J. (2009). “A study on statistical downscaling for projection of future temperature change simulated by ECHO-G/S over the Korean peninsula.” *Atmosphere, Korean Meteorological Society*, Vol. 19, No. 2, pp. 107–125.
- Shukla, S., and Wood, A.W. (2008). “Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought.” *Geophysical Research Letters*, doi:10.1029/2007GL032487.
- Son, K.H., Bae, D.H., and Chung, J.S. (2011). “Drought analysis and assessment by using land surface model on South Korea.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 8, pp. 667–681.
- Tigkas, D., Vangelis, H., and Tsakiris, G. (2012). “Drought and climatic change impact on streamflow in small watershed.” *Science of the Total Environment*, Vol. 440, pp. 33–41.
- Velazquez, J.A., Schmid, J., Ricard, S., Muerth, M.J., Gauvin St-Denis, B., Minville, M., Chaumont, D., Caya, D., Ludwig, R., and Turcotte, R. (2013). “An ensemble approach to assess hydrological models’ contribution to uncertainties in the analysis of climate change impact on water resources.” *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 17, pp. 565–578.
- Vidal, J.P., and Wade, S. (2009). “A multimodel assessment of future climatological droughts in the United Kingdom.” *International Journal of Climatology*, Vol. 29, pp. 2056–2071.

Wang, D., Hejazi, M., Cai, X., and Vaocchi, A.J. (2011). "Climate change impact on meteorological, agricultural, and hydrological drought in central Illinois." *Water Resources Research*, Vol. 47, No. 9, W09527

Wilhite, D.A., and Glantz, M.H. (1985). "Understanding the drought phenomenon: the role of definitions." *Water Int.* Vol. 10. pp. 111-120.

Yoo, J.Y., Choi, M., and Kim, T.W. (2010). "Spatial analysis of drought characteristics in Korea using cluster analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 1, pp. 15-24.

논문번호: 13-086	접수: 2013.10.21
수정일자: 2013.12.10	심사완료: 2013.12.10