개념적인 토양수분 모의모형을 이용한 미래 극한 가뭄사상의 시공간적 해석

Spatio-Temporal Analysis of Future Extreme Drought Events Using a Conceptual Soil Water Model

김상단* · 이아연** · 이재운*** · 김태웅****

Kim, Sang Dan · Lee, A Yeon · Lee, Jae Woon · Kim, Tae Woong

Abstract

In this study, the impact of climate change on the spatio-temporal behavior of extreme drought events is investigated by comparing drought severity-area-duration curves under present and future climate conditions. In order to consider future increasing trends in air temperature, the standardized soil water index is introduced. The standardized soil water index is calculated using a conceptual soil water model forced by daily air temperature and daily precipitation data. In our climate-change impact experiments, the future climate is based on two GCMs(CGCM3.1-T63 and CSIRO-MK3.0). As a result, in both cases of CGCM3.1-T63 and CSIRO-MK3.0 the future drought risk is likely to increase. Such results indicate that a climate change vulnerability assessment for present water resources supply system is urgent.

Key words : Climate change, Drought severity-area-duration curve, Soil water, Standardized soil water index

요 지

본 연구에서는 현재 및 미래기후에서의 가뭄심도-영향면적-지속기간 곡선의 비교를 통하여 극한 가뭄사상의 시공간적 거동에 대한 기후변화의 영향을 살펴보았다. 미래의 기온상승경향을 고려하기 위하여 표준토양수분지수가 제안된다. 표준토양수분지수는 일평균기온과 일강수량 자료가 반영된 개념적인 토양수분모형으로부터 산출된다. 미래기후는 CGCM3.1-T63과 CSIRO-MK3.0으로부터 획득되었다. 분석 결과 CGCM3.1-T63 및 CSIRO-MK3.0 모두 미래가뭄이 현재보다 더 극심해질 것으로 예측되었다. 이에 따라 현재의 수자원 공급 시스템에 대한 기후변화 취약성 평가가 시급함을 제시하고 있다.

핵심용어 : 기후변화, 가뭄심도-면적-기간 곡선, 토양수분, 표준토양수분지수

1. 서 론

미래기후에 대한 최근의 GCMs(General Circulation Models) 결과들을 살펴보면 기온과 강수패턴에 있어서 많은 변화가 있을 것으로 예측되고 있다(Houghton et al., 2001). 기후학자들에 의해 예측된 지구 기온의 증가와 더불어 전 지구적인 수문 순환은 극한 현상이 더 빈번하게 더 강하게 발생할 것이라는 데 의견이 모아지고 있다(Hisdal et al., 2001). 이 중 가뭄은 누적된 기후현상으로부터 발생하는 극한 기후재해 중 하나이며(Oliver, 2005), 일반적으로 평균 이하의 강수량이 지속적으로 보이는 지역에서 이 현상이 나타나며 재해의 시작을 정확히 감지할 수 없을 정도로 서서히 발생하는 재해이다.

일반적으로 가뭄을 해석하기 위하여 가뭄심도, 빈도, 면적과 기간의 영향을 고려한 가뭄지수를 이용하며, 이는 가뭄지수가 강수 및 기타 기상인자는 물론 가뭄의 특성상 현재와 가까운 과거의 기상상태로 현재 가뭄 상황을 설명하기 때문이다. 다양한 가뭄지수들이 개발되어 왔으며 본 연구에서는 표준토양수분지수(Standard Soil Water Index, SSWI)를 이용하여 우리나라의 농업가뭄 및 수문학적 가뭄 심도에 대한 영향면적과 지속기간의 관계를 분석하고자 한다.

그동안 가뭄을 정량화시키기 위한 많은 시도가 있어왔으며, 우리나라의 경우 주로 강수량자료의 분석에 기초를 둔 연구가 주를 이루고 있다(변희룡, 1996; 이동률, 1998; 한국수자원공사, 2002; 경민수 등, 2007). 이러한 시도들은 가뭄을 정량화하는

*정회원 · 부경대학교 환경공학과 부교수(E-mail : skim@pknu.ac.kr, 교신저자)

**국립환경과학원 낙동강물환경연구소 연구원

***국립환경과학원 낙동강물환경연구소 연구관

****정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 조교수

데 있어서 어느 정도의 성과가 있는 것도 사실이나 온실가스 증가에 따라 예상되는 미래 기후변화는 우리나라의 기온 및 강수패턴에 영향을 주어 이에 따른 수문학적 수분상태의 변화가 예상되고 있다. 따라서 강수자료의 분석만으로는 미래 가뭄상황의 정확한 평가가 곤란할 것으로 예상되어 기온과 강수의 변동을 가장 잘 반영하는 수문성분 중 하나인 토양수분을 선택하여 우리나라 가뭄영향평가를 실시하였다. 토양수분은 강수-침투-유출-증발산의 수문순환에 있어서 연결고리 역할을 하는 수문성분으로서, 지면과 대기를 연결하는 중간층에 위치함으로써 기후변화에 따른 수문학적 평가에 있어서 매우 중요한 수문성분으로 인식되고 있다(Entekhabi and Rodriguez-Iturbe, 1994; Daly and Porporato, 2006, 한수희 등, 2009).

모형화의 관점에서 보면, 토양수분 동역학을 구성하는 다양한 지구물리학적 프로세스들의 연계작용과 각각의 프로세스가 가지고 있는 고도의 비선형성, 수문 및 생태환경 자체의 시공간적 변동성 때문에 적용 목적에 따라 다양한 정확도 수준에서의 단순화 가정이 필요하게 된다. 이에 본 연구에서는 강수로 인한 토양수분의 공급 및 증발산과 침투를 통한 손실이 고려된 토양수분의 시간적 거동에 관한 지배방정식을 구성하여 토양수분을 모의하고자 한다. 모의된 지점별 토양수분 자료를 바탕으로 일반적으로 가뭄을 나타내기 위하여 많이 적용되는 표준강수지수와 같은 개념의 3개월 및 12개월 지속기간의 표준토양수분지수가 고안되며, 최치현 등(2010)에 의해 연구된 가뭄심도-영향면적-지속기간 곡선을 작성하여 지속기간 및 면적에 따른 미래가뭄의 거동을 평가하고자 한다. 미래기후정보는 캐나다에서 개발한 CGCM3.1-T63과 호주에서 개발한 CSIRO-MK3.0 전구기후모형에 A1B 온실가스 배출시나리오를 적용하여 산출된 결과가 이용된다. 이 때, 기후변화로 인한 영향을 보다 명확하게 파악하기 위하여 토양, 식생, 토지이용 등과 같은 지표면의 조건은 공간적으로 모두 균일한 것으로 가정한다.

2. 연구방법

2.1 미래기후정보

본 연구에서 두 가지 전구기후모형을 적용하였다. 첫 번째

GCM은 CCCma(Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis)에서 제공하는 CGCM3.1이다. CGCM3.1은 T47과 T63의 해상도에서 실행되는데, 본 연구에서는 지표면 해상도 $2.81^{\circ} \times 2.81^{\circ}$, 해양 해상도 $1.4^{\circ} \times 0.94^{\circ}$ T63이 적용된다. 두 번째 전구기후모형은 호주 CSIRO(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation)에서 개발한 CSIRO-MK3.0이다. CSIRO-MK3.0 또한 CGCM3.1-T63과 같은 정도의 해상도에서 실행된다. 또한, 본 연구에서는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 제공하는 SRES(Special Report on Emissions Scenarios) A1B 온실가스 배출시나리오를 대상으로 하였으며, 시간적으로는 2011-2040년, 2041-2070년, 2070-2100년으로 구분된 미래에 대하여 1971-2000년의 현상태의 GCMs 모의 결과와 비교하였다.

하지만 전구기후모형의 해상도가 너무 크기 때문에 이를 추후 적용할 토양수분수지모형에 직접적으로 적용할 수는 없다. 본 연구에서는 강수량 자료만을 이용하여 미래의 가뭄을 평가한 결과와의 직접적인 비교를 위하여 최치현 등(2010)에서 적용한 미래 강수량을 그대로 적용하였으며, 평균 기온 또한 최치현 등(2010)에서 적용한 방법과 동일한 기법을 통하여 산출한 자료를 이용하였다. 참고로 Fig. 1에 편의보정과정을 거친 A1B 온실가스 배출시나리오에 따른 CT63(CGCM3.1-T63)과 CSMK(CSIRO-MK3.0)의 연평균기온 시계열 예측결과를 도시하였다. 2071-2100년의 경우, CT63은 현재대비 2.7°C , CSMK는 2.4°C 정도 증가할 것으로 예측되고 있음을 살펴볼 수 있다.

2.2 개념적인 토양수분수지 모형

본 연구에서 적용한 토양수분수지 모형은 아래와 같은 동역학 지배방정식에 기초하고 있다.

$$nZ_r \frac{ds}{dt} = W(P, s) - V(s) - K(s) \quad (1)$$

여기서 n 은 토양의 공극비이며, Z_r 은 지표면 근처 식생뿌리가 존재하는 토양층의 두께이다. W 는 강수량 P 로부터 토양에 공급되는 수분 양, 즉 습윤량(wetting)이며, V 은 토양 및 식생 조건에 따른 토양수분의 대기 중으로의 손실 양, 즉 기

Fig. 1. Future projection of air temperature

화량(vaporization)이다. K 는 지표면 근처 토양층으로부터 보다 깊은 토양층으로 토양수분이 손실되는 양이며, s 는 토양수분, t 는 시간으로 본 연구에서는 일 단위를 기준으로 하였다.

습윤량은 강수 직전의 선행 토양수분과 강수량에 따라 아래와 같이 결정된다.

$$W(P, s) = P \quad \text{for } P \leq (1 - s)nZ_r \quad (2)$$

$$= (1 - s)nZ_r \quad \text{for } P > (1 - s)nZ_r$$

따라서 강수일의 습윤량은 유효토양깊이 nZ_r 과 선행 토양수분의 양에 따라 달라지며, 무 강수일의 습윤량은 0이 된다. 이때, 유효토양깊이는 식생에 따라 다양한 값을 가질 수 있을 것이며, 또한 식생의 성장에 따른 계절적인 변동성을 가지고 있게 된다.

기화량 V 는 토양수분의 상태에 따라 아래와 같이 개념화된다.

$$V(s) = \frac{V_{\max}}{s^*} s \quad \text{for } s < s^* \quad (3)$$

$$= V_{\max} \quad \text{for } s > s^*$$

여기서, $V_{\max}$ 는 최대 기화량으로 흔히 언급되는 잠재 증발산량과 같은 개념으로 볼 수 있으며, s^* 는 토양수분 임계값으로 식생에 따라 계절에 따라 다양한 값을 갖게 된다. 즉, 기화량은 기상학적으로 요구되는 $V_{\max}$ 와 식생별 고유한 값을 갖는 s^* 두 가지 매개변수의 함수로 표현될 수 있으며, $V_{\max}$ 와 s^* 모두 계절적인 변동성을 갖고 있으므로 기화량 또한 계절적인 변동성을 나타낸다고 볼 수 있다.

깊은 토양층으로의 손실량 K 는 아래와 같이 모의된다.

$$K(s) = K_s \cdot s^\beta \quad (4)$$

여기서, K_s 는 포화투수계수를 의미하며, β 는 토양수분에 따른 손실지수이다. K_s 및 β 는 토양 고유의 특성으로 볼 수 있을 것이며, 토양특성의 계절적 변동성은 상대적으로 크지 않다고 가정한다면 깊은 토양층으로의 손실량의 함수형태는 연중 일정하다고 할 수 있다. 기화량 V 와 깊은 토양층으로의 손실량 K 를 도시하면 Fig. 2와 같다. 식 (1)에 따라서 제안된 모형을 모의하기 위해서 초기 토양수분량을 0.5로 가정하고 1년간의 warming-up 기간을 수행하여 초기값에 대한 영향을 배

Fig. 2. Vaporization and percolated loss

제하고자 하였다.

2.3 표준토양수분지수 및 가뭄심도-영향면적-지속기간 곡선

일반적인 가뭄지수로 많이 적용되고 있는 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)의 개념을 이용하여 본 연구에서 착안한 표준토양수분지수(Standardized Soil Water Index, SSWI)는 월평균 토양수분을 고려하여 해당 지점의 수문학적 건조 상태를 정량화하여 보여주는 방법이다. SPI가 강수량만을 가지고 해당 지점의 수문학적 건조 상태를 표현하기 때문에 미래의 기온상승효과를 적절하게 고려할 수 없는 단점을 보완할 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 앞서 설명한 개념적인 토양수분지수모형을 통한 토양수분 계산 시에 필요한 매개변수 중 하나인 최대기화량 $V_{\max}$ 는 기온의 함수로 표현되기 때문에 미래의 기온상승에 영향을 반영할 수 있기 때문이다. SSWI의 계산을 위해서는 SPI와 마찬가지로 적용목적에 따라 다양한 지속시간이 고려될 수 있는데, 그 산정 절차는 다음과 같다.

- 1) 장기간(본 연구의 경우 30년)의 지점별(본 연구의 경우 60지점) 월 단위 평균 토양수분을 모의하여 토양수분 월 시계열을 작성하고,
- 2) 지점별 월 단위 토양수분 시계열을 이용하여 특정 지속시간에 대한 이동평균시계열을 작성한다. 본 연구에서는 식생의 물에 대한 스트레스에 따른 가뭄을 나타내기 위하여 3개월 지속시간 SSWI(이후 SSWI3)와 사회경제적인 수문학적 가뭄을 표현하기 위하여 12개월 지속시간 SSWI(이후 SSWI12)를 기준으로 하여 분석을 실시하였다.
- 3) 이렇게 획득된 이동 평균 토양수분시계열을 월별로 분석하여 월별 최적의 확률분포형을 결정한다.
- 4) 월별로 산정된 누가확률밀도함수를 이용하여 이동평균시계열에 대응하는 누가확률시계열을 작성한다.
- 5) 누가확률시계열을 표준정규누가확률밀도함수에 역으로 적용시켜 SSWI3 및 SSWI12 시계열을 각각 산정한다.

참고로 분석에 적용된 60개 지점의 목록을 Table 1에 수록하였다. 상기와 같이 산정된 지점별 SSWI 시계열을 이용하여 가뭄심도-영향면적-지속기간(Severity-Area-Duration, SAD) 곡선을 작성하기 위해서 먼저 지점별로 계산된 SSWI 시계열 대상으로 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function, EOF) 분석이 필요하다. EOF 분석의 기본 식은 아래와 같다.

$$A = U \times S \times V^T \quad (5)$$

여기서, 행렬 U 의 열들은 A 의 EOF이며 각각의 EOF는 서로 독립적인 성분이다. 행렬 S 의 대각요소들은 고유값으로써 이는 EOF가 설명하는 원자료 분산값으로 모든 EOF의 고유값을 더하면 원자료의 분산이 된다. 행렬 V 의 각 열은 시계열의 계수로 행렬 U 의 열에 대응하는 EOF의 시간적 전개를 나타낸다. 행렬 A 는 관측소의 개수(M , 60개)와 SSWI의 시간적 길이(N , 360개월)로 구성되어 $M \times N$ 크기를 지니며, 행렬 U 는 $M \times M$ 크기로 표현된다. 행렬 S 는 $M \times N$ 크기로 대

Table 1. Observation network

No	Observation	No	Observation	No	Observation	No	Observation
1	Sokcho	16	Daegu	31	Inje	46	Chungju
2	Daegwallyeong	17	Jeonju	32	Hongcheon	47	Yeongju
3	Chuncheon	18	Ulsan	33	Jecheon	48	Munkeong
4	Gangneung	19	Gwangju	34	Boeun	49	Munkeong
5	Seoul	20	Busan	35	Cheonan	50	Uiseong
6	Incheon	21	Tongyeong	36	Boryeong	51	Gumi
7	Ulleungdo	22	Mokpo	37	Buyeo	52	Yeongcheon
8	Suwon	23	Yeosu	38	Buan	53	Geochang
9	Seosan	24	Wando	39	Imsil	54	Hapcheon
10	Ulsan	25	Jeju	40	Jeongeup	55	Miryang
11	Cheongju	26	Seogwipo	41	Namwon	56	Sancheong
12	Daejeon	27	Jinju	42	Suncheon	57	Geoje
13	Chungcheong	28	Ganghwa	43	Jangheung	58	Namhae
14	Pohang	29	Yangpyeong	44	Haenam	59	Wonju
15	Gunsan	30	Icheon	45	Goheung	60	Geumsan

각 요소는 각 EOF의 비정적치로 원자료의 분산값을 표현하며 각 EOF의 시계열 자료인 행렬 I 는 $N \times N$ 크기로 구성된다.

SSWI의 EOF 분석한 결과는 EOF 시계열에 의한 공간적 패턴을 정량화한 것으로 가뭄심도-영향면적-지속기간 곡선을 작성하기 위해서는 이를 공간적으로 확장할 필요가 있다. 본 연구에서는 Kriging 기법을 이용하여 각각의 EOF들을 공간적으로 확장하였다. 이 때, 우리나라 영역이 모두 포함되도록 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 격자망을 구성한 뒤, 이 중 도서지역을 제외한 본토 지역의 격자만을 분석대상으로 하였다. 이와 같이 공간적으로 확장된 각각의 EOF들로부터 EOF 역변환을 통하여 공간적으로 확장된 SSWI 시계열을 얻을 수 있게 된다.

공간적으로 확장된 SSWI 시계열로부터 SAD 곡선을 작성하는 절차를 설명하면 아래와 같다.

1) 격자별로 계산된 SSWI 시계열 $S(x, y, t)$ 로부터 지속기간을 1개월, 3개월, 6개월, 9개월, 12개월, 24개월, 36개월, 48개월을 적용하여 지속기간별 이동평균 시계열 $S_d(x, y, t)$ 를 작성한다.

2) 작성된 $S_d(x, y, t)$ 로부터 각각의 지속기간에 대하여 영향면적으로 400, 1600, 3600, 6400, 10000, 14400, 19600, 25600 km^2 을 각각 적용하여 공간적인 이동평균 자료 시계열 $S_{a,d}(x, y, t)$ 을 계산한다.

3) $S_{a,d}(x, y, t)$ 로부터 지속기간별 영향면적별 최소 SSWI 값을 찾아내어 지속기간별 영향면적별 가뭄심도 $s(a, d)$ 를 결정한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 토양수분 모의결과

제안된 토양수분모형은 수문기상학적인 입력 자료로 일강수량과 일 최대 기화량을 필요로 하게 된다. 일강수량의 경우에는 지점별로 기상청 관측자료 및 상기 설명한 미래기후 정보로부터 획득할 수 있으며, 일 최대 기화량의 경우에는

각 지점에서의 일 평균 기온, 상대습도, 풍속, 일사량, 일조시간 등의 자료로부터 Penman 방법을 이용하여 산출하여 적용하였다.

제안된 토양수분모형의 실행을 위한 유역의 토양 및 식생 관련 입력변수들은 포화투수계수 K_s , 손실지수 β , 유효토양 깊이 nZ_r , 토양수분 임계값 s^* 가 된다. 이 중 포화투수계수와 손실지수는 토양특성이라 볼 수 있으며, 토양특성은 계절에 따라 크게 변하지 않으므로 연 중 일정한 값을 갖는 것으로 가정하였으며, 반면에 유효토양깊이의 경우 식생이 자라는 시기에는 뿌리가 내려가는 깊이에 비례하여 증가하므로 여름철에 최대값을 가지며 겨울철에 최소값을 갖는 주기적인 특성이 보이며, 토양수분 임계값의 경우에는 식생에 따라 변동하므로 주기적인 특성을 갖는 것으로 판단하였다. 따라서 유효토양깊이와 토양수분 임계값의 경우 아래와 같은 주기함수의 형태를 갖는 것으로 개념화하였다.

$$nZ_r(t) = A_s \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{12}[t-t_s]\right) + \overline{nZ_r} \quad (6)$$

$$s^*(t) = A_s \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{12}[t-t_s]\right) + \overline{s^*} \quad (7)$$

여기서 t 은 월(month)이며, 유효토양깊이 nZ_r 의 연평균 값은 $\overline{nZ_r}$, A_s 는 연 평균값으로부터 최대 및 최소 편차, t_s 는 nZ_r 이 최대가 되는 월이 된다. 마찬가지로 토양수분 임계값 s^* 의 연평균 값은 $\overline{s^*}$, A_s 는 연 평균값으로부터 최대 및 최소 편차, t_s 는 s^* 가 최대가 되는 월을 의미한다. 이로부터 제안된 모형은 일 년을 주기로 매 월별로 다른 유효토양깊이 및 토양수분 임계값을 갖게 되도록 고려하였음을 살펴볼 수 있다(Fig. 3 참조). 따라서 모형의 토양 및 식생관련 매개변수는 총 8개($K_s, \beta, A_s, t_s, \overline{nZ_r}, A_s, t_s, \overline{s^*}$)가 된다.

지점별로 다양한 생태환경에 놓이기 때문에 지점별로 각각 다른 매개변수 값이 설정될 수 있을 것이나, 본 연구에서는 기후변화로 인한 영향을 보다 명확하게 파악하기 위하여 토

Fig. 3. Parameter estimation

Fig. 4. Soil water simulation at Chuncheon

양, 식생, 토지이용 등과 같은 지표면의 조건은 공간적으로 모두 균일한 것으로 가정하였으며, 따라서 토양 및 식생 관련 매개변수는 안동호 유역을 대상으로 이아연 등(2010)에 의해 추정된 매개변수 값들을 다른 지점에 모두 동일하게 적용하여 추후 분석을 실시하였다. Fig. 3에 적용된 매개변수들을 월별로 도시하였다. 유효토양깊이는 최소 23.9 mm에서 최대 60.1 mm로 8월에 최대가 되며, 토양수분 임계값의 경우 0.319에서 0.777의 값으로 12월에 최대가 되는 것으로 입력되었으며, 포화투수계수의 경우 116 mm/day, 손실지수는

34.1을 적용하였다.

Fig. 4에 토양수분의 일부 모의결과를 정리하여 도시하였다. Fig. 4는 춘천지점을 대상으로 관측 자료와 현재 및 미래기 후정보로부터 도출된 토양수분 모의결과와 확률밀도함수를 보여주고 있다.

3.3 SSWI 산정 및 SAD 곡선 작성결과

상기 산출된 토양수분자료를 바탕으로 전국 60개 지점에 대하여 30년간의 시기별로 SSWI3와 SSWI12를 각각 산정하였으며, Fig. 5에 산출된 관측 및 현재, 미래 SSWI 시계열 중 서울지점과 부산지점의 결과를 도시하였다.

일반적으로 이동평균시 적용되는 지속시간 단위가 길어질수록 진동주기가 길어지며 건조한 정도가 지속되는 기간 또한 길어지게 됨을 살펴볼 수 있다. 즉, 사회경제적인 수문학적 가뭄을 표현하고자한 SSWI12의 경우가 식생의 물에 대한 스트레스에 따른 가뭄을 대변하는 SSWI3에 비하여 가뭄 단계로 접어들 확률이 떨어지는 반면에 가뭄이 발생하게 되면 보다 장기간에 걸쳐 지속되는 특성을 가진다.

상기 산출된 지점별 SSWI 시계열은 EOF-Kriging 과정을 거쳐 10 km×10 km 해상도의 공간분포자료로 확장되었으며, 이와 같이 확장된 SSWI 시계열을 대상으로 가뭄심도-영향면적-지속기간 곡선을 작성하였다. 이 때, 영향면적은 400, 1600, 3600, 6400, 10000, 14400, 19600, 25600 km²을 각각 적용하여 공간적인 이동평균 자료 시계열 $S_{a,d}(x, y, t)$ 을 계산하였으며, 이들로부터 최소 SSWI 값을 찾아내어 지속기간별 영향면적별 가뭄심도 $s(a, d)$ 를 결정하였다.

먼저 전구기후모형-통계학적 규모내림과정으로부터 획득한 자료의 신뢰정도를 파악하기 위하여 관측 자료로부터 산출된 SAD 곡선과 전구기후모형-통계학적 규모내림과정으로부터 도출한 현재기후조건으로부터 산출된 SAD 곡선을 비교하였으며, 이를 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6(a)에서 ‘observed’는 과거 관측 자료로부터 도출된 SSWI3의 SAD 곡선 중 지속기간 6개월 곡선이며, ‘CT63’과 ‘CSMK’는 각각 CT63과 CSMK로부터의 결과이다. Fig. 6(b)도 같은 방법으로 작성되었는데 SSWI12의 SAD 곡선 중 지속기간 3개월의 결과를

(a) SSWI3 at Seoul from CT63 A1B

(b) SSWI12 at Busan from CSMK A1B

Fig. 5. SSWI time series

(a) SSWI3

(b) SSWI12

Fig. 6. Verification of future climate information

(a) CT63 for 3-month

(b) CT63 for 6-month

(c) CSMK for 3-month

(d) CSMK for 6-month

Fig. 7. SAD curves for SSWI3

도시하였다. Fig. 6으로부터 전구기후모형-통계학적 규모내림 과정으로부터 획득한 자료가 어느 정도 신뢰성을 갖고 있음을 간접적으로 살펴볼 수 있다.

Fig. 7은 SSWI3를 대상으로 CT63과 CSMK로부터 모의된 자료를 대상으로 현재, 2011-2040년, 2041-2070년, 2071-2100년의 시기별로 작성된 SAD 곡선을 나타내고 있다. CT63 및 CSMK 모두 미래에 보다 심각한 가뭄이 국지적으로 또한 광역적으로 발생할 가능성이 있는 것으로 예측되고

있다. 식생의 물에 대한 스트레스를 표현하기 위한 SSWI의 경우 심각한 수분부족상태가 3개월에서 6개월 이상 지속될 경우 현재의 농업 관련 관개시스템이 제 기능을 할 수 없음을 상기하여볼 때, 이러한 결과는 이에 대한 대비가 시급함을 보여준다 하겠다.

Fig. 8은 SSWI12를 대상으로 CT63과 CSMK로부터 모의된 자료를 대상으로 1971-2000년(현재), 2011-2040년, 2041-2070년, 2071-2100년의 시기별로 작성된 SAD 곡선을 나타

(a) CT63 for 3-month

(b) CT63 for 6-month

(c) CSMK for 3-month

(d) CSMK for 6-month

Fig. 8. SAD curves for SSWI12

(a) CT63 A1B

(b) CSMK A1B

Fig. 9. Future projection of mean annual precipitation

내고 있다. SSWI3와 비슷하게 CT63 및 CSMK 모두의 경우에 대하여 미래에 보다 심각한 가뭄이 국지적으로 또한 광역적으로 발생할 가능성이 있는 것으로 예측되고 있다. 사회경제적인 수문학적 가뭄을 나타내는 SSWI12의 경우, 극심한 토양수분부족상황이 3개월에서 6개월 이상 지속될 경우 주요 대형저류시설 및 하천으로부터의 수자원 공급 시스템에 문제가 발생할 가능성이 있을 것이다. 따라서 현재의 시스템이 설계된 기능을 발휘할 수 있을 것인지 또는 어느 정도의 피해가 예상되는 지, 그리고 그에 대한 대비를 위해서는 어느

정도로 용수공급능력을 증대시켜야 하는 지에 대한 추가적인 연구가 앞으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

지금까지 전기후모형을 달리하여 작성된 SAD곡선을 비교해보았다. 한가지 의미있는 사항은 CT63 및 CSMK 모두 정도차이는 있으나 미래에 강수량이 증가하는 것으로 예측되고 있다는 사실이다(Fig. 9). 따라서 기온증가경향을 반영할 수 없는 SPI를 이용하여 미래가뭄을 평가할 경우 강수량 증가경향에 따라 과소평가된 가뭄을 예측할 수도 있을 것이다(최치현 등, 2010). 따라서 미래 가뭄에 대한 해석을 위해서

는 강수량뿐만 아니라 기온에 대한 고려가 반드시 필요함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 기온과 강수의 변동을 가장 잘 반영하는 수문성분 중 하나인 토양수분을 선택하여 개념적 토양수분모형을 이용하여 가뭄에 대한 기후변화의 영향을 모형화하고, 모형으로부터의 결과를 분석하였다. 미래의 기온상승경향을 고려하기 위하여 표준토양수분지수가 제안되었으며, 미래기후는 CGCM3.1-T63과 CSIRO-MK3.0으로부터 획득되었다. 격자별 표준토양수분지수를 산정한 후, 이를 기준으로 가뭄심도-영향면적-지속기간 곡선을 작성하여 지속기간 및 면적에 따른 극한 가뭄의 상태를 살펴보고자 하였다.

식생의 물에 대한 스트레스에 따른 가뭄을 표현하기 위하여 3개월 지속시간 SSWI를 분석하였으며, 분석결과 현재보다 심한 가뭄이 일어날 것으로 예측되었다. 또한 사회경제적인 수문학적 가뭄을 표현하기 위하여 12개월 지속시간 SSWI를 기준으로 한 분석에서도 현재보다 심한 가뭄이 발생할 것으로 예측된 바, 현재의 소규모 및 대규모 수자원 공급 용량이 이러한 가뭄에 대처할 수 있을 것인지에 대한 분석을 필요할 것으로 판단되었다.

또한 적용된 미래기후정보의 경우 모두 강수량 증가가 예측되었음에도 불구하고 기온상승경향으로 인하여 가뭄이 보다 심각해질 것으로 예측되었다는 점은 미래 가뭄분석 시에 강수량뿐만 아니라 기온증가에 대한 고려가 반드시 반영되어 함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업 [NEMA-자연-2011-40] 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 경민수, 김상단, 김보경, 김형수 (2007) 군집분석을 통한 수문학적 가뭄의 가뭄심도-가뭄면적-가뭄지속기간 곡선의 작성, **대한토목학회논문집**, 27, pp. 267-276.
- 변희룡 (1996) 한반도에 가뭄을 초래하는 대기 순환, **한국기상학회지**, 32, pp. 455-469.
- 이아연, 김상단 (2010) 표준토양수분 모의 모형을 이용한 미래 극한 가뭄사상의 시공간적 해석, **대한토목학회 2010년 학술발표대회 논문집**.
- 이동률 (1998) 엘리노/남방진동과 한국의 가뭄과 관계, **대한토목학회논문집(III)**, pp. 67-70.
- 최치현, 최대규, 김용석, 김상단 (2010) SAD 해석을 이용한 기후변화가 가뭄의 시공간적 거동에 미치는 영향분석, **한국방재학회논문집**, 10, pp. 653-651.
- 한국수자원공사 (2002) 가뭄관리 종합대책 수립연구, 한국수자원공사, 대전, pp. 554.
- 한수희, 안재현, 김상단 (2009) 토양수분의 추계학적 거동과 기후변화가 미치는 영향, **한국수자원학회논문집**, 42, pp. 433-443.
- Daly, E. and Porporato, A. (2006) Impact of hydroclimatic fluctuations on the soil water balance. *Water Resour. Res.*, 42 W06041, doi:10.1029/2005WR004606
- Entekhabi, D. and Rodriguez-Iturbe, I. (1994) Analytical framework for the characterization of the space-time variability of soil moisture, *Adv. Water Resour.*, 17 pp. 35-45
- Hisdal, H., Stahl, K., Tallaksen, L.M. and Demuth, S. (2001) Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent, *Int. J. Climatol.*, 21, pp. 317-333.
- Houghton J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J. and Xiaosu, D. (2001). *Climater change 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 944.
- Oliver, K.E. (2005) *Encyclopedia of world climatology. Encyclopedia of Earth Sciences Series*, Springer, Berlin Heidelberg New York, pp. 58.

◎ 논문접수일 : 11년 11월 18일
◎ 심사의뢰일 : 11년 11월 22일
◎ 심사완료일 : 11년 12월 02일