

극한가뭄의 시공간적 특성에 대한 기후변화의 영향을 평가하기 위한 SAD 곡선의 적용

Application of SAD Curves in Assessing Climate-change Impacts on Spatio-temporal Characteristics of Extreme Drought Events

김호성* · 박진혁** · 윤재영*** · 김상단****

Kim, Hosung · Park, Jinhyeog · Yoon, Jaeyoung · Kim, Sangdan

Abstract

In this study, the impact of climate change on extreme drought events is investigated by comparing drought severity-area-duration curves under present and future climate. The depth-area-duration analysis for characterizing an extreme precipitation event provides a basis for analysing drought events when storm depth is replaced by an appropriate measure of drought severity. In our climate-change impact experiments, the future monthly precipitation time series is based on a KMA regional climate model which has a 27 km×27 km spatial resolution, and the drought severity is computed using the standardized precipitation index. As a result, agricultural drought risk is likely to increase especially in short duration, while hydrologic drought risk will greatly increase in all durations. Such results indicate that a climate change vulnerability assessment for present water resources supply system is urgent.

Keywords : climate change, drought, drought severity-area-duration curve, regional climate models, standardized precipitation index

요 지

본 연구에서는 현재 및 미래 기후에서의 가뭄심도-영향면적-지속기간 곡선의 비교를 통하여 극한 가뭄 사상에 대한 기후변화의 영향을 살펴보았다. 가뭄심도-영향면적-지속기간 곡선은 극한 호우사상을 특성화하기 위한 일반적으로 적용되는 우량깊이-영향면적-지속기간 곡선에서 우량깊이를 가뭄심도를 대표할 수 있는 적절한 지수로 대체함으로써 가뭄사상을 분석할 수 있는 도구를 제공한다. 미래 월 강수량 시계열은 27 km×27 km의 공간적인 해상도를 가지는 기상청 지역기후모형으로부터 획득되었으며, 가뭄심도는 표준강수지수를 이용하여 산출하였다. 분석 결과, 농업가뭄에 대한 위험성은 특히 단기간의 지속기간의 경우에 현재보다 심화될 수 있는 것으로 분석되었으며, 수문학적 가뭄의 경우는 가뭄지속기간에 상관없이 모두 현재보다 미래에 가뭄심도가 더 깊어질 가능성이 있는 것으로 예측되었다. 이에 따라 현재의 수자원 공급 시스템에 대한 기후변화 취약성 평가가 시급함을 제시하고 있다.

핵심용어 : 기후변화, 가뭄, 가뭄심도-지속기간-면적 곡선, 지역기후모형, 표준강수지수

1. 서 론

미래 기후에 대한 최근의 전지구기후모형(이후 GCMs, Global Climate Models)의 결과들을 살펴보면 기온과 강수 패턴에 있어서 많은 변화가 있을 것으로 예측되고 있다(Houghton *et al.*, 2001). 우리나라가 포함된 동아시아 지역은 최근 온난화가 가장 두드러진 지역 중 하나이며(Lal and Harasawa, 2001), 실제 최근 20년의 기온 상승폭은 관측 이래 가장 높았으며, 적어도 지난 1,000년간 이와 같은 기

온 상승을 겪은 사례가 없다(차유미 등, 2007). 또한 대기 중 이산화탄소 농도는 지난 420,000년 동안 현재의 농도를 넘어본 적이 없는 것으로 보고되고 있다(IPCC, 2001).

기후 학자들에 의해 예측된 지구 기온의 증가와 더불어 전 지구적인 수문 순환은 극한 현상이 더 빈번하게 더 강하게 발생할 것이라는 의견이 모아지고 있다(Hisdal *et al.*, 2001). 이 중 가뭄은 누적된 기후현상으로부터 발생하는 극한 기후재해 중 하나이다(Oliver, 2005). 일반적으로 가뭄은 비교적 긴 시간에 걸친 강수의 부족으로부터 발생하며, 재해

*부경대학교 환경공학과 석사과정 (E-mail : nijal209@nate.com)

**정희원 · 한국수자원공사 K-water 연구원 책임연구원 (E-mail : park5103@kwater.or.kr)

***고려대학교 환경공학과 부교수 (E-mail : jyyoon@korea.ac.kr)

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

의 시작을 정확히 감지할 수 없을 정도로 서서히 발생하는 재해이다. 전 지구적으로 볼 경우 가뭄은 가장 비용이 많이 드는 자연 재해로(Wilhite, 2000), 그 결과 선진 외국의 경우 가뭄 현상을 모니터링하고 예측하는데 많은 노력을 기울이고 있다(Svoboda *et al.*, 2002).

전술한 비와 같이 가뭄은 정의 자체가 매우 난해한 기후재해이기 때문에 이를 수치적으로 특성화하기 위한 많은 지수들이 개발되어왔다(Keyantash and Dracup, 2002; Heim, 2002). 이들 중 비교적 가장 널리 알려진 가뭄지수로는 Palmer(1965)에 의해 개발된 PDSI(Palmer Drought Severity Index; Palmer 1965)와 McKee *et al.*(1993)에 의해 개발된 SPI(Standardized Precipitation Index)가 대표적이다. 이들 지수에 대한 보다 상세한 설명은 Alley(1984)를 참조할 수 있다. 그러나 PDSI의 경우에는 미국을 대상으로 계수 및 PDSI 공식, 기후특성인자를 계산하게 되는데, 따라서 우리나라에 맞도록 지역을 선정하고 대부분의 계수 및 기후특성인자를 우리나라에 맞도록 재산정할 필요가 있다. 이에 비하여 SPI는 선정된 기간(일반적으로 1개월에서 24개월) 동안의 누가 강수량을 표준 정규 확률밀도함수의 분위수로 전환한 값이라 정의할 수 있으며, 월강수량 자료만 가지고 비교적 간단하게 가뭄의 정도를 나타낼 수 있어, 이와 관련된 많은 연구들(Hayes *et al.*, 1999; Lana *et al.*, 2001; Seiler *et al.*, 2002; Rouault and Richard, 2003; Vicente-Serrano *et al.*, 2004; 경민수 등, 2007; 유철상 등, 2006; 장연규 등, 2006)이 있으며, 우리나라를 비롯하여 U.S. Drought Monitor(<http://drought.unl.edu/dm>) 및 North American Drought Monitor(<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/monitoring/drought/nadm>) 등과 같은 가뭄 모니터링 시스템에서도 중요한 지수로 고려되고 있다. 미국의 경우 전미대륙 SPI 지도(<http://www.drought.unl.edu/monitor/spi.htm>)가 일반에 공개되고 있다.

이에 본 연구에서는 표준강수지수(SPI)를 기준으로 김보경 등(2006)이 적용한 가뭄심도-가뭄면적-가뭄지속기간(Severity-Area-Duration, 이후 SAD) 곡선을 이용하여 지속기간 및 면적에 따른 미래의 수문학적 건조 상태를 살펴보고자 한다. 표준강수지수를 산정하기 위해서는 30년 이상의 연속적인 월 강수량 자료만이 요구되므로 비교적 간단하게 지점의 수문학적 건조 상태를 살펴볼 수 있는 장점이 있으며, 더구나 국립기상연구소(2007)에서 제공하는 지역기후모형의 산출자료(이후 KMA RCM, Korea Meteorological Administration Regional Climate Model)는 한반도 영역에 대한 격자 형태의 미래 월 강수량 자료를 제공하고 있기 때문에 면적에 따른 수문학적 건조 상태를 파악하기에 매우 유리한 자료구조를 가지고 있다. 따라서 지역기후모형의 산출자료 결과의 현재 강수량 모의 자료(1971-2000년)로부터 도출된 SAD 곡선과 미래 강수량 모의 자료(2011-2040년, 2041-2070년, 2071-2100년)로부터 도출된 SAD 곡선을 비교함으로써 극한 가뭄에 대한 기후변화의 영향을 살펴보고자 한다.

2. 연구방법

2.1 KMA RCM

GCMs는 온실가스 배출 시나리오를 바탕으로 기후를 예측하는 중요한 도구이다. 하지만 모형이 산출해 내는 결과의

공간적인 해상도는 특정 연구에서 필요로 하는 해상도와 차이를 보이기도 한다. 즉, 어떤 특정 지역(예를 들어, 한반도)을 분석할 경우에 그 지역의 특성을 표현하기에는 GCMs가 갖는 해상도가 너무 낮다. 이러한 불일치를 극복하기 위하여 해상도를 증가시키는 방법론이 개발되었는데, 그 중 하나가 RCMs이다. RCMs는 관심 있는 일부지역을 더욱 세밀하게 분석하기 위하여 GCMs 결과물을 기반으로 하여 관심지역의 해상도를 높여 모의한 결과라 볼 수 있다. 이러한 규모내림 기법(downscaling)을 기반으로 세계 각국은 자국의 물 환경 자원에 대한 기후변화의 영향을 다양한 각도로 분석하고 있으며, 우리나라에서도 기후변화와 관련된 연구가 최근 활발히 진행되고 있다(Han *et al.*, 2009; Choi *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2010; 김문성 등, 2009; 한수희 등, 2009; 최대규 등, 2010).

KMA RCM은 국립기상연구소 기후연구팀에서 유엔기후변화협약의 일반의무 수행 및 기후변화 영향평가에 활용할 수 있도록 한반도 지역 기후변화 시나리오 산출기술 개발 사업을 수행하기 위하여 개발한 지역기후모형로서(국립기상연구소, 2007), IPCC 온실가스 배출 시나리오에 관한 특별 보고서 중에서 A1B 시나리오를 독일 막스플랑크 기상연구소에서 개발한 전지구기후모형인 ECHO-G에 적용하여 생산된 자료를 기반으로 하고 있으며, 한반도의 지형적 특성을 반영하기 위하여 미국 국립기상연구소센터와 펜실베이니아 주립대학에서 공동 개발한 지역기후모형인 MM5를 적용하여 기후변화 시나리오 자료를 생산하였다. 입력된 온실가스 증가 시나리오에는 주요 온실가스인 이산화탄소, 메탄, 아산화질소를 비롯한 총 19종의 온실가스와 황산염 에어러솔 효과가 포함되었다.

KMA RCM은 한반도 영역(32.968°N-43.426°N, 122.935°E-131.447°E)을 44행 36열의 공간적 해상도(위경도 27 km

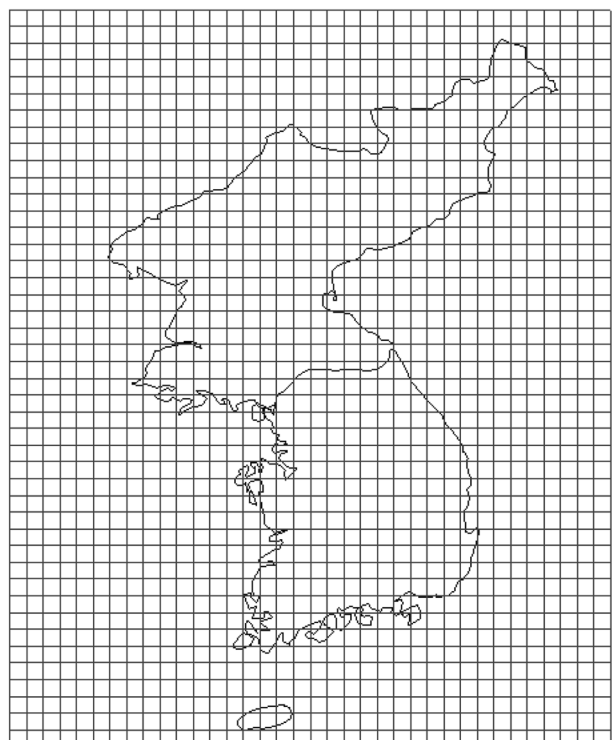


Fig. 1 KMA RCM grid structure

간격)로 자료를 제공하고 있으며(Fig. 1 참조), 자료의 형태 및 기간은 1971~2000년 기후평균에 대한 2001~2100년간의 월별 편차(%)이다.

2.2 표준강수지수

표준강수지수는 월강수량만을 고려하여 해당 지점의 수문학적 건조 상태를 정량화하여 보여주는 간단한 방법이다. SPI를 계산하기 위해서는 적용목적에 따라 다양한 지속시간이 고려되는데, 그 산정 절차는 다음과 같다.

최소 30년 이상의 각 격자별 월 강수량 시계열을 특정 지속시간 단위에 대하여 이동 평균한다. 일반적으로 적용되는 지속시간 단위는 분석 목적에 따라 3, 6, 9, 12, 24, 48개월 중 선택할 수 있다. 이렇게 획득된 이동 평균 강수 시계열을 월별로 분석하여 월별 최적의 확률분포 형을 결정한다. 우리나라의 강수량은 월별로 매우 다른 특성을 나타내므로, 이러한 강수량의 월별 특성을 반영하기 위하여 월별로 최적 확률분포 형을 결정하게 되는데, 매월 동일한 확률분포 형을 선정하였다 하더라도, 각 월의 통계특성치가 다르기 때문에 월별로 각기 다른 확률밀도함수가 선정된다. 1월부터 12월까지 월별로 산정된 확률밀도함수를 이용하여 앞서 추정된 이동 평균 강수시계열에 대응하는 누기확률을 산정한다. 이 누기확률 값을 표준정규누기확률함수에 역으로 적용시켜 구한 값이 표준강수지수(SPI)이다.

SPI 값은 양수와 음수를 모두 갖는데, 음수는 건조 상태를 나타내고, 양수는 습윤 상태를 나타낸다. 만약 0(zero) 값을 갖는다면 이는 평균(normal) 상태를 나타내는 것이다. 즉 0에서 떨어진 정도가 클수록 건조 또는 습윤 상태가 강한 것을 의미한다. 이와 같은 방식으로 SPI는 유역의 습윤 및 건조 정도를 표현하게 되는데, 따라서 SPI는 강수량이 절대적으로 많고 적음에 따라 유역의 습윤 및 건조 정도를 표현하는 것이 아니라 강수량이 시기별 평균 대비 얼마나 많이 내렸는지 또는 적게 내렸는지에 따라 유역의 습윤 및 건조 정도를 표현하는 상대적 지수라 할 수 있다. SPI 값을 시계열로 나타내 보면, 0을 기준으로 진동하는 시도표를 얻을 수 있는데, 이를 분석하면 건조 시기와 습윤 시기, 건조 또는 습윤의 강도 및 그에 따른 지속시간을 얻을 수 있다. 일반적으로 이동평균 시 적용되는 특정 지속시간 단위(즉, 3, 6, ..., 48개월)가 길어질수록 SPI 시계열 시도표의 진동 주기가 길어지며 건조 또는 습윤한 정도가 지속되는 기간 또는 길어지게 되고 SPI 값 자체는 0과 가까운 값을 갖게 된다. Table 1은 계산된 SPI 값에 따른 유역의 습윤 또는 건조

Table 1. SPI moisture condition

SPI value	Moisture
More than 2.00	Extremely wet
1.50-1.99	Severe wet
1.00-1.49	Wet
-0.99-0.99	Normal
-1.49-1.00	Dry
-1.99-1.50	Severe dry
Less than -2.00	Extremely dry

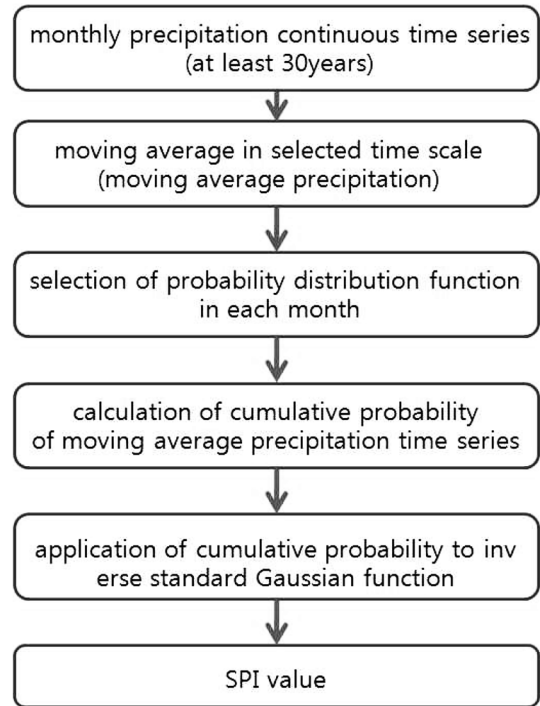


Fig. 2 SPI computation procedure

정도를 나타내고 있으며, Fig. 2에 SPI의 계산 절차를 도식적으로 나타내었다.

2.3 가뭄심도-영향면적-지속시간 곡선

가뭄은 공간적으로 국지적이며 시간적으로 순간적인 홍수와는 달리 가뭄의 심도뿐만 아니라 가뭄이 지속되는 기간 및 가뭄에 영향을 받는 지역에 대한 이해가 매우 중요하다. 홍수사상의 경우 다양한 크기의 유역면적에 여러 지속시간을 고려하고 호우사상의 발생에 따라 예상되는 지속시간별 최대강우를 작성한 최대평균우량깊이-영향면적-지속시간 관계곡선에서 착안하여, 가뭄사상에 대해서 최대평균우량깊이를 가뭄심도로 대체함으로써 가뭄심도-영향면적-지속시간 곡선을 작성할 수 있다. 따라서 SAD 곡선은 다양한 크기의 면적에 다양한 지속시간을 가진 최대가뭄심도를 산정하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 또한 가뭄은 절대적인 양적 개념이 아니라 시공간적으로 상대적이고 개념이며, 지점별 순간별 사상이 아니기 때문에 영향면적 및 지속시간을 고려한 극한 사상으로 정의하는 것이 보다 바람직할 것이다. 이러한 관점에서 본 연구에서 적용한 가뭄심도-영향면적-지속시간 곡선을 통한 가뭄해석의 접근은 극한가뭄사상의 평가를 위해 적절하게 적용될 수도 있을 것이다.

KMA RCM 월 강수량 자료의 공간적 해상도인 남북방향 44개 격자, 동서방향 36개 격자의 각 격자별로 계산된 SPI 시계열로부터 SAD 곡선을 작성하기 위한 절차를 서술하면 아래와 같다.

1) 먼저 각 격자별로 구성된 SPI 시계열 $S(x, y, t)$ 을 이용하여 지속시간별 이동평균 시계열 $S_d(x, y, t)$ 을 아래 식 (2)과 같이 작성하게 된다.

$$S_d(x, y, t) = \frac{1}{d} \int_{t-d}^t S_d(x, y, \tau) d\tau \quad (1)$$

여기서 d 는 지속시간이다.

2) 시계열 $S_d(x, y, t)$ 은 대상으로 각각의 지속기간에 대하여 영향면적별로 공간적인 이동평균 자료 시계열 $S_{a,d}(x, y, t)$ 을 아래 식 (3)과 같이 계산한다.

$$S_{a,d}(x, y, t) = \frac{1}{a^2} \int_{x-a}^x \int_{y-a}^y S_d(\zeta, \xi, t) d\zeta d\xi \quad (2)$$

여기서 a^2 는 영향면적이다.

3) 지속기간별 영향면적별 공간 이동평균 자료 $S_{a,d}(x, y, t)$ 로부터 최소 SPI 값을 찾아내면 그 값이 해당 지속기간에 대한 해당 영향면적을 대표하는 가뭄심도 $s(a, d)$ 로 정의하게 된다. 즉,

$$s(a, d) = \min[S_{a,d}(x, y, t)] \text{ for all } x, y, t \quad (3)$$

이를 각각의 지속기간별 영향면적별로 도시하게 되면 최종적인 SAD 곡선이 작성된다.

이상을 종합하여 본 연구의 적용절차를 정리하면 아래와 같다.

- 1) KMA RCM 격자자료로부터 격자별 월 강수량 자료 추출
- 2) 격자별 SPI3 및 SPI12 월 시계열 계산
- 3) SPI 격자 시계열을 바탕으로 지속기간별 영향면적별 최소 SPI 산출

3. 결과 및 고찰

3.1 KMA RCM 연강수량 모의결과 분석

KMA RCM에 의한 현재 및 미래 연강수량 모의결과를 Fig. 3에 도시하였다. 이 때, 연 강수량은 KMA RCM의 각각의 격자점 중 우리나라 본토에 해당하는 격자점에서의 강수량들을 산술평균하여 산출하였다. 현재 자료인 1971-2000년의 자료와 미래 자료를 비교해보면, 2011-2040년의 경우 현재보다 연강수량이 약간 감소하는 것으로 예측되고 있으나 미래로 갈수록 강수량이 현재보다 많아지는 것을 알 수 있다. 이를 보다 명확하게 살펴보기 위하여 30년 단위로 시기를 나누어 연평균강수량과 표준편차를 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4에서 x축 0은 1971-2000년 강수량 자료를 의미하며, 1은 2011-2040년, 2는 2041-2070년, 3은 2071-2100년 강수량 자료를 각각 의미한다. 2000년대 후반으로

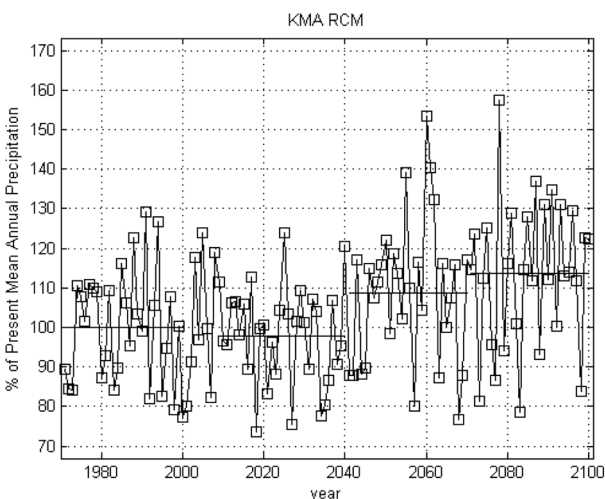


Fig. 3 Yearly precipitation time series from KMA RCM

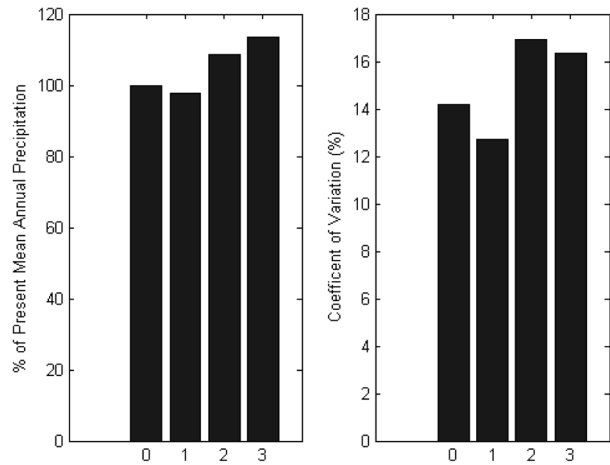


Fig. 4 Comparison between present and future mean annual precipitation (0: 1971-2000, 1: 2011-2040, 2: 2041-2070, 3: 2071-2100)

갈수록 강수량의 증가와 함께 변동계수 또한 증가하는 것을 살펴볼 수 있다. 연강수량의 증가와 그에 따른 변동계수의 증가로부터 지금보다 강수량의 연간변동성이 더 커질 가능성이 있는 것으로 해석할 수 있다.

3.2 SPI 산정

SPI를 산정하기 위해서는 먼저 전술한 바와 같이 KMA RCM에서 제공되는 각 격자별 월 강수량 시계열을 특정 지속시간 단위에 대한 이동평균 시계열을 작성하여야 한다. 이때, 한 가지 언급할 사항으로는 일반적으로 기후변화 시나리오 자료는 편의가 발생하며, 분석결과와 본 연구에서 적용된 KMA RCM의 경우에도 현재기후모의결과와 관측 자료 사이에 많은 차이가 있음을 발견할 수 있었다. 이를 다소나마 완화시키기 위한 방편으로 본 연구에서 적용한 방법은 현재 및 미래 격자별 월자료 즉, 1,560개월을 모두 이용하여 SPI 산정을 위한 확률밀도함수를 산정하는 것이다. 이러한 방법을 통하여 현재기후모의자료와 관측자료 사이의 편의보정에 따른 미래모의자료의 보정 절차를 취하지 않으면서도, 현재 기후조건과 비교하여 미래기후조건에서 가뭄거동이 어떻게 달라지는 지를 살펴볼 수 있었다.

한편, 본 연구에서는 농업가뭄을 대변하는 것으로 알려진 3개월 지속시간 SPI(이후 SPI3)와 수문학적 가뭄을 대변하는 것으로 알려진 12개월 지속시간 SPI(이후 SPI12)를 기준으로 하여 추후 분석을 실시하였다. Meke *et al.*(1993)에 따르면 SPI의 계산을 위하여 지속기간으로 3, 6, 12, 24, 48개월이 적용될 수 있으며, 지속기간의 선택은 적용하고자 하는 가뭄의 형태에 따라 결정된다. 농업가뭄은 기상학적 가뭄의 다양한 특성들 중에서 강우부족, 실제 및 잠재증발산간의 차이, 토양수분 부족, 저수지 또는 지하수위의 저하 등에 초점이 맞추어지며, 곡물 발달의 여러 단계 동안 곡물의 물에 대한 다양한 민감성을 충분히 고려할 수 있어야 하기 때문에 비교적 지속기간이 짧으면서 곡물의 성장에 영향을 미치는 3개월 또는 6개월 지속시간의 SPI를 적용하는 것이 적절하며, 수문학적 가뭄은 수자원 공급 시스템에 대한 강수량의 부족과 관련이 있어 일반적으로 농업가뭄의 발생시기와 비교할 때 일정 정도의 시간적인 지체를 가지게 되므로 1년

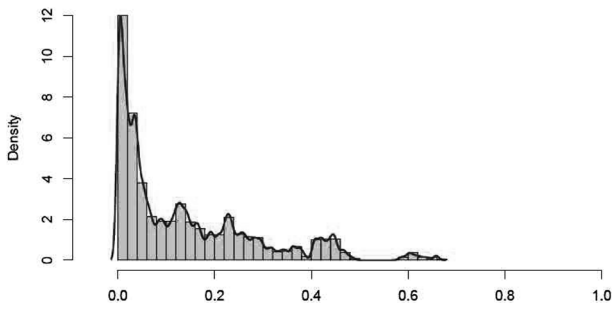


Fig. 5 Kernel smoothing method

이상의 지속시간을 가진 SPI를 적용하는 것이 추천된다 (http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/drought/drght_spi.html). 그러나 단순히 1개월 SPI는 기상학적 가뭄, 3개월은 농업가뭄, 12개월은 수문학적 가뭄이라 단정 지을 수는 없음을 미리 밝혀둔다.

다음 절차는 작성된 이동평균 시계열을 월별로 분석하여 월별 최적의 확률분포 형을 결정하는 것인데, 본 연구에서는 비모수적 통계기법 중 하나인 Kernel smoothing density estimate(Silverman, 1986)를 이용하여 월별 확률밀도함수를 추정하였다(Fig. 5 참조). 참고로 본 연구에서는 MATLAB의 ksdensity 함수를 이용하여 수행하였는데, ksdensity 함수는 정규분포를 추정하기 위해 가장 최적인 주파수 대역폭을 sample 자료로부터 자동적으로 제공하는 장점이 있다. 보다 상세한 사항은 MathWorks 사의 관련 웹페이지(<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/stats/ksdensity.html>) 및 그에 따른 참고문헌을 참조할 수 있다.

월별로 추정된 확률밀도함수를 이용하여 앞서 작성된 이동평균 강수시계열에 대응하는 누가확률로부터 표준정규누가확률함수에 역으로 적용시켜 SPI3 및 SPI12 시계열을 각각 산정하였다. Fig. 6에 KMA RCM 격자체계에서 우리나라 주요 도시인 서울, 부산, 대전, 광주가 포함된 격자에서 산출된 SPI3 시계열을 각각 도시하였으며, Fig. 7에 우리나라 본토에서 가장 외곽에 있는 관측점들인 포항, 목포, 여수, 속초가 포함된 격자에서 산출된 SPI12 시계열을 각각 도시하였다. 일반적으로 이동평균 시 적용되는 기준 지속시간 단위(즉, 본 연구의 경우 3개월과 길어질수록 SPI 시도표 상에서의 진동 주기가 길어지며 건조한 정도가 지속되는 기간 또한 길어지게 됨을 살펴볼 수 있다. 다시 말하면, 수문학적 가뭄을 대변하는 SPI12의 경우가 농업가뭄을 대변하는 SPI3에 비하여 가뭄 단계로 접어들 확률이 떨어지는 반면에 한번 가뭄이 발생하게 되면 보다 장기간에 걸쳐 영향력을 지속하는 특성이 가지고 있게 된다.

3.3 SAD 곡선

격자별로 계산된 SPI 시계열 $S(x, y, t)$ 로부터 지속시간을 1개월, 3개월, 6개월, 9개월, 12개월, 24개월을 적용하여 지속기간별 이동평균 시계열 $S_d(x, y, t)$ 을 작성하였다. 작성된 시계열 $S_d(x, y, t)$ 로부터 각각의 지속시간에 대하여 영향면적으로 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 SPI 값을 찾아 내어 지속기간별 영향면적별 가뭄심도 $s(a, d)$ 을 결정하였다.

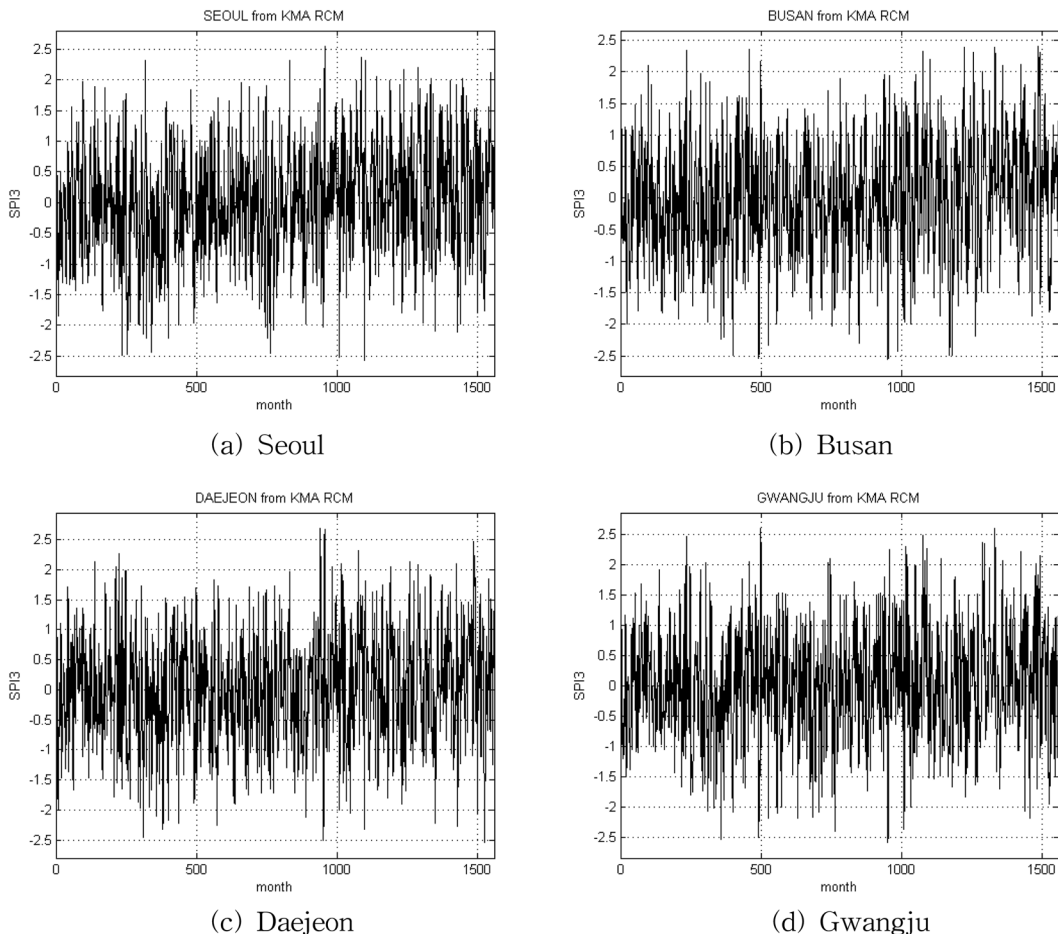


Fig. 6 SPI3 time series (from January 1971 to December 2100)

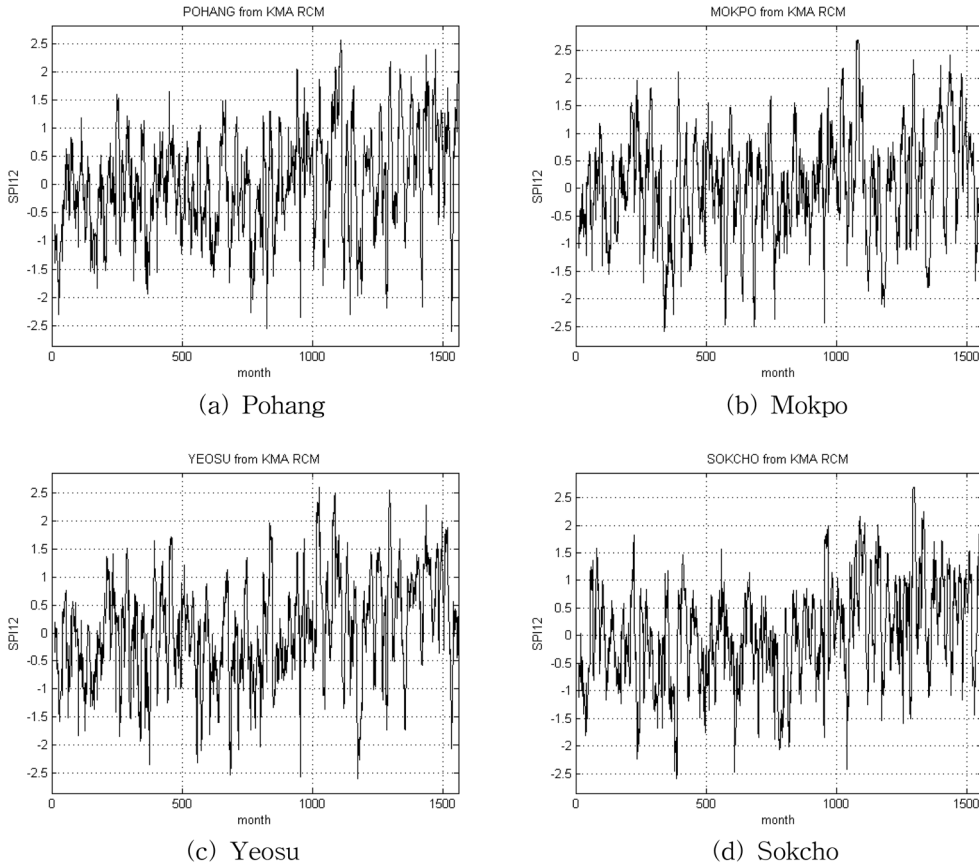


Fig. 7 SPI12 time series(from January 1971 to December 2100)

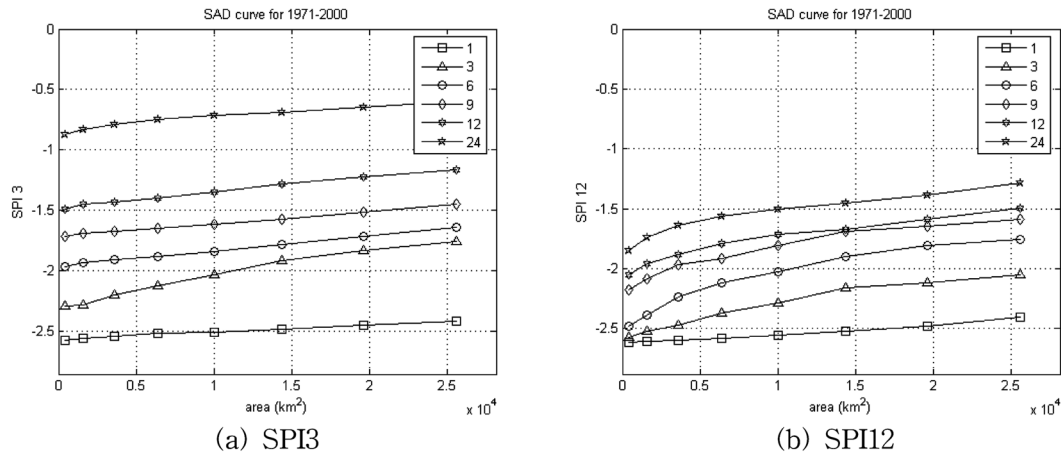


Fig. 8 SAD curves for 1971-2000

이 때, 본 연구에서는 KMA RCM의 전체 공간적인 영역이 한반도 및 주위 해안을 모두 포함하고 있으므로, SAD 곡선의 작성 시에 공간적인 범위를 우리나라 본토 영역으로 제한하여 결과를 도출하였다. Fig. 8은 SAD 곡선의 작성 시에 시간적인 범위를 현재 상태인 1971-2000년으로 한정하여 작성된 SPI3 및 SPI12에 대한 SAD 곡선을 나타내고 있다. 지속기간이 1개월에서 24개월로 길어질수록, 그리고 고려되는 가뭄 영향면적이 커질수록 가뭄심도가 감소하고 있음을 살펴볼 수 있다. 또한 SPI3과 SPI12를 비교하여 볼 때, 지속기간이 짧고 고려하고 있는 영향면적이 작을 경우에는 큰 차이를 보이고 있지 않으나 지속시간이 길어질수록 그리고 영향면적이 커질수록 두 곡선 사이의 차이가 크게 벌어지고 있음을 확인할 수 있다. 이는 SPI3의 경우 이동평균구간이 3개월로 상대적으로 짧음에 따라 지속기간별 가뭄

심도의 변화가 크게 나타나는 반면에, SPI12의 경우 이동평균구간이 상대적으로 길기 때문에 지속기간별 가뭄심도의 변화가 작게 나타나기 때문이다. 즉, Fig. 6과 7에 도시된 바와 같이 SPI3의 경우 고빈도 특성이 보다 강한 시계열의 특성을 보이며, SPI12의 경우 저 빈도 특성이 보다 강한 시계열임에 따라 지속시간이 길어질수록 영향면적이 길어질수록(즉, smoothing window가 커질수록) SPI3과 SPI12 사이의 차이가 크게 벌어지게 된다. SPI3의 경우에는 SPI12의 경우보다 상대적으로 극한가뭄의 지속기간이 작음을 알 수 있으며, 이는 농업가뭄의 경우 지금과 같은 소규모 농업용 저수지 또는 하천에서의 소규모 저류용 구조물에 의한 용수공급이 유효한 대응수단임을 의미한다. 그러나 1개월 또는 2개월의 짧은 지속기간에 대한 SPI3의 결과를 보면 고려대상 영향면적이 커짐에 따라 가뭄심도의 감소율이 그다지 크지 않음을 볼 수 있

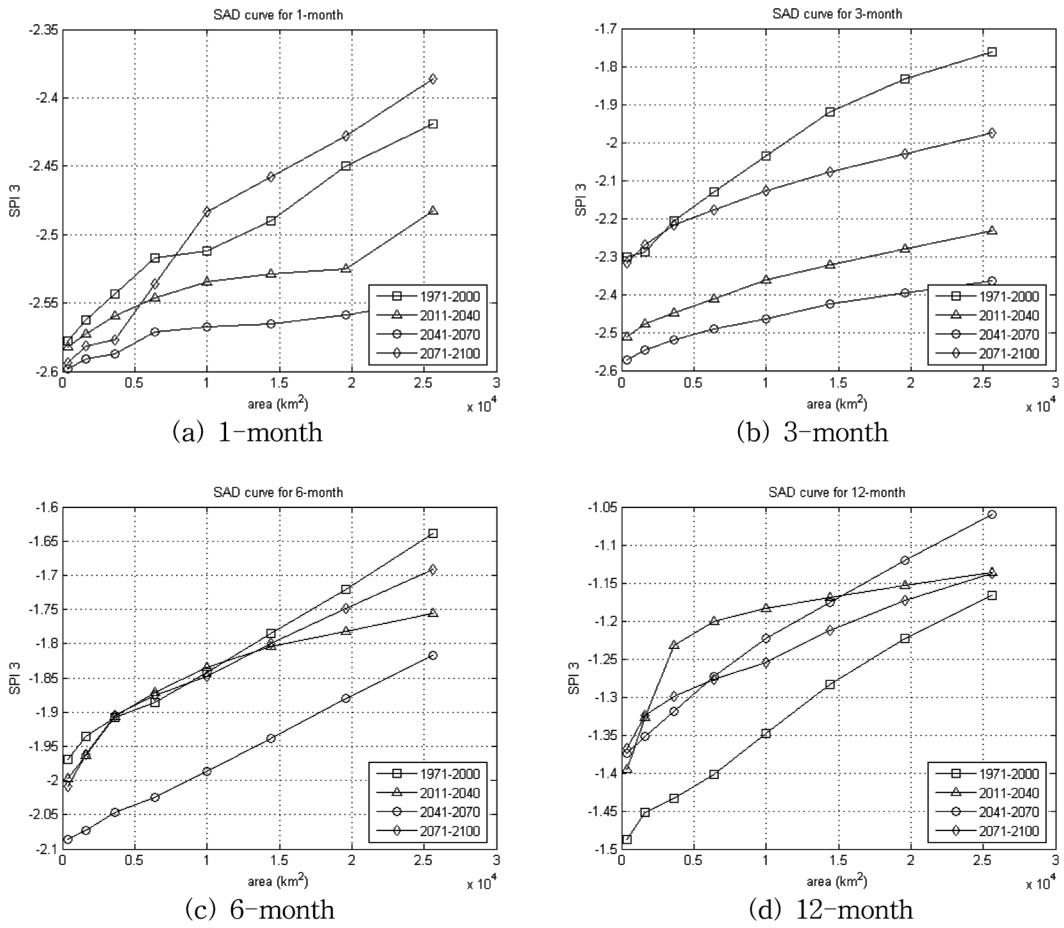


Fig. 9 SAD curves for SPI3

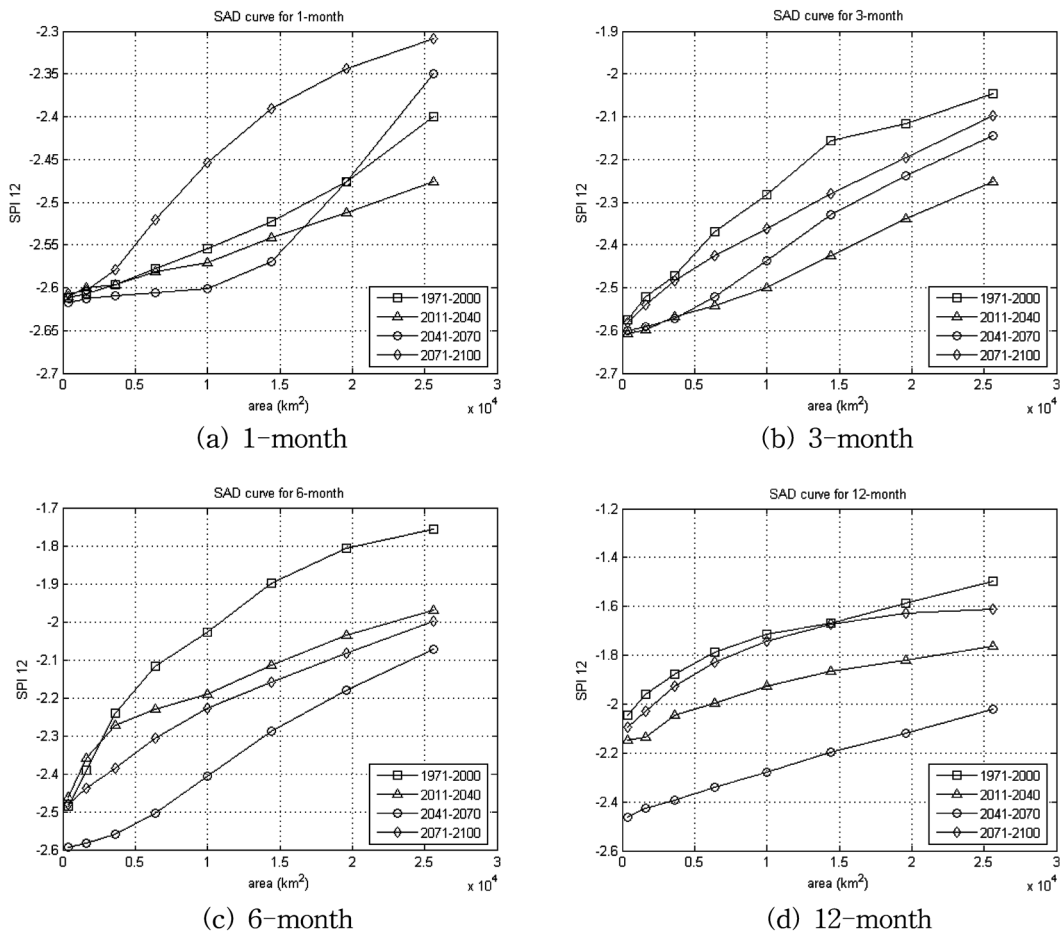


Fig. 10 SAD curves for SPI12

으며, 이는 짧은 기간 동안에는 전국에 걸친 심각한 농업가뭄을 경험할 수 있음을 나타내는 것으로 지금까지 우리나라에서 경험에 왔던 사실과 잘 부합하는 결과라 할 수 있다. SPI12의 경우에는 가뭄 지속기간이 길어짐에 따른 가뭄심도 저감율이 SPI3의 경우보다 상대적으로 작음을 알 수 있으며, 이로부터 국가 전체적인 용수공급의 경우 대규모 다목적댐에 의한 용수공급시스템의 구축이 보다 적절한 가뭄대응수단이 되고 있음을 간접적으로 살펴볼 수 있다. 또한 비교적 장기간에 걸쳐 지속되는 가뭄사상의 영향면적 또한 상대적으로 크게 형성되고 있음을 살펴볼 수 있다.

Fig. 9는 SAD 곡선의 작성 시에 시간적인 범위를 1971-2000년, 2011-2040년, 2041-2070년, 2071-2100년으로 분할하여 각각의 기간을 기준으로 작성된 SPI3 대한 SAD 곡선을 나타내고 있다. 곡선들은 모두 지속기간이 길어질수록 영향면적이 커질수록 가뭄심도가 감소하는 형태를 보여주고 있으나, 지속기간별로 살펴볼 경우 차이를 발견할 수 있다. 즉, 상대적으로 장기간의 지속기간(12개월)을 갖는 가뭄의 경우 현재보다 가뭄심도가 현재보다 다소 완화될 것으로 분석되고 있지만, 단기간(1개월, 3개월, 6개월)의 가뭄의 경우에는 현재보다 가뭄이 심화될 수 있는 것으로 예측되고 있다. 특히 농업용수 공급에 중요한 지표인 3개월 평균 강수량의 경우(즉, SPI3) 심각한 강수량 부족이 3개월에서 6개월 이상 지속될 경우 현재의 농업용 저수지 또는 하천에서의 소규모 저류용 구조물이 제 기능을 할 수 없음을 상기하여볼 때, 2041-2070년의 결과는 이에 대한 대비가 시급함을 보여준다 하겠다.

Fig. 10은 SAD 곡선의 작성 시에 시간적인 범위를 1971-2000년, 2011-2040년, 2041-2070년, 2071-2100년으로 분할하여 각각의 기간을 기준으로 작성된 SPI12에 대한 SAD 곡선을 나타내고 있다. SPI3의 결과와는 달리 SPI12에 대한 SAD 곡선은 지속기간에 상관없이 모두 현재보다는 미래에 가뭄 심도가 더 깊어질 것임을 보여주고 있다. 특히, 주목해야 할 사항은 지속기간이 길어질수록 현재대비 미래의 가뭄심도가 더 극심해짐에 유의해야 한다. 즉, 고려된 최대 영향면적을 기준으로 지속기간이 1개월일 경우에는 현재와 미래의 가뭄심도 편차가 0.07정도인 반면에 지속기간이 3개월일 경우에는 0.25, 6개월일 경우에는 0.3, 12개월일 경우에는 0.5까지 편차가 벌어지게 된다. 국가 전체 수자원공급에 중요한 지표인 12개월 평균 강수량의 경우(즉, SPI12) 도출된 결과와 같은 극심한 강수량 부족이 1년 이상 이상 지속될 경우 현재의 수자원 공급 시스템이 제 기능을 할 수 있을 것인지 또는 어느 정도의 피해가 예상되는 지, 그리고 그에 대한 대비방안 마련에 대한 추가적인 연구가 앞으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 국립기상연구소(2007)에서 제공하는 지역기후모형의 미래 강수량 산출자료를 이용하여 격자별 표준강수지수를 산정한 후, 이를 기준으로 가뭄심도-가뭄면적-가뭄지속기간 곡선을 작성하여 지속기간 및 면적에 따른 극한 가뭄의 상태를 살펴보고자 하였다. 지역기후모형 결과의 현재상태의 월강수량 모의 자료로부터 도출된 가뭄심도-가뭄면

적-가뭄지속기간 곡선과 미래 월강수량 모의 자료로부터 도출된 곡선을 비교함으로써 극한 가뭄에 대한 기후변화의 영향을 살펴본 결과는 다음과 같다.

- 1) 농업가뭄의 경우 단기간의 지속기간을 갖는 가뭄의 경우에는 현재보다 가뭄이 심화될 수 있는 것으로 분석되었다.
- 2) 수문학적 가뭄의 경우 단기 및 장기간의 지속기간에 상관없이 모두 현재보다는 미래에 가뭄심도가 더 깊어질 가능성이 있음이 분석되었다.

농업가뭄의 지표로 적용되는 3개월 이동평균 강수량을 기준으로 한 분석결과 현재보다 더 심각한 강수량 부족이 3개월에서 6개월 이상 지속되는 것으로 예측되고 있으며, 이는 현재의 농업용 저수지 또는 하천에서의 소규모 저류용 구조물을 통한 농업용수 공급능력에 대한 점검이 필요함을 시사한다 할 수 있다.

또한 수문학적 가뭄의 지표로 적용되는 12개월 이동평균 강수량을 기준으로 분석한 결과로부터 도출된 지속기간이 길어질수록 현재대비 미래의 가뭄심도의 극심함이 더 증폭된다는 사실은 기후노출에 대한 우리나라 수자원 공급 시스템의 취약성 평가가 시급함을 나타내고 있으며, 그에 따른 대비책을 강구할 필요가 있음을 알 수 있다.

한 가지 주의해야 할 사항은 본 연구의 결과는 모두 국립기상연구소(2007)에서 제공하는 지역기후모형의 미래 강수량 산출 자료에 따른 것이므로 본 연구에서 제시하고 있는 가뭄심화의 원인은 모의된 강우의 특성 변화에 기인한 것이 될 것이다.

마지막으로 모든 기후변화 관련 연구가 그러하듯이 본 연구에서 도출된 결과에는 많은 불확실성이 내재되어 있을 것이다. 미래 시나리오의 구성과 전구기후모형을 이용한 전 지구기후모의, 지역기후모형을 이용한 규모 내림 등에는 여러 가정과 불확실성이 내재되어 있기 때문이다. 또한 본 연구에서 적용한 표준강수지수를 이용한 분석에는 유역 물 순환에서 또 하나의 중요한 성분인 증발산과 토양수분이 전혀 고려되지 않아 실제적인 수자원 공급을 고려한 수문학적 가뭄을 평가하는 면에서는 미흡한 단점을 가지고 있다. 즉, 미래 기후변화 시나리오에서 가장 확실한 정보 중 하나인 기온 증가와 대기 중 이산화탄소 농도의 증가는 유역에서의 증발산에 매우 큰 영향을 미칠 수 있으므로 수문학적 가뭄지수인 SWSI나 국토해양부에서 최근 개발하고 있는 수문학적 지수 등을 활용한 가뭄 분석이 앞으로 수행되어야 할 필요성이 있다고 할 수 있다. 또한 본 연구에서 적용한 국립기상연구소의 지역기후모형 이외에도 다양한 GCMs로부터의 결과물을 활용한 분석을 수행하는 것도 미래 가뭄에 대한 대비책 마련에 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국수자원공사 ‘2008년 1차(상반기) 물산업핵심분야 연구개발비 지원사업(기후변화에 따른 수자원영향평가 및 관리방안 수립)’의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

경민수, 김상단, 김보경, 김형수(2007) 군집분석을 통한 수문학적

- 가뭄의 가뭄심도-가뭄면적-가뭄지속기간 곡선의 작성, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권 제3B호, pp. 267-276.
- 국립기상연구소(2007) **기후변화 협약 대응 지역기후시나리오 활용 기술 개발(III)**. 국립기상연구소 연구보고서 MR070C70, pp. 559.
- 김문성, 고익환, 김상단(2009) CGCM의 미래 기후 정보를 이용한 기후변화가 낙동강 유역 유휴에 미치는 영향분석, **수질보전 한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제25권, pp. 863-871.
- 김보경, 김상단, 이재수, 김형수(2006) 가뭄의 시공간적 분포 특성 연구: 가뭄심도-가뭄면적-가뭄지속기간 곡선의 작성, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권 제1B호, pp. 69-78.
- 유철상, 김대하, 김상단(2006) EOF 해석 및 다변량시계열 모형을 이용한 농업기름 대비능력의 평가, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, pp. 617-626.
- 장연규, 김상단, 최계운(2006) SPI 가뭄지수의 EOF 분석을 이용한 가뭄의 시공간적인 특성 연구. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, pp. 691-702.
- 차유미, 이효신, 문자연, 권원태, 부경은(2007) ECHO-G/S를 활용한 미래 동아시아 기후 전망. **대기**, 제17권, pp. 55-68.
- 최대규, 안재현, 조덕준, 김상단(2010) 토양수분 확률밀도함수로 살펴본 가뭄발생에 대한 기후변화의 영향, **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제43권, pp. 709-719.
- 한수희, 유가영, 김상단(2009) 식생 물 부족지수의 추계학적 거동과 기후변화가 그에 미치는 영향, **수질보전 한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제25권, pp. 507-514.
- Alley, W.M. (1984) The palmer drought severity index: limitations and assumptions. *J. Clim. Appl. Meteor.*, Vol. 23, pp. 1100-1109
- Choi, D., Jun, H., Shin, H.S., Yoon, Y.S., and Kim, S. (2010) The effect of climate change on Byeongseong stream's water quantity and quality, *Desalination and Water Treatment*, Vol. 19, pp. 105-112.
- Han, S., Shin, H.S., and Kim, S. (2009) Temporal downscale for hourly rainfall time series using correlated Neyman-Scott rectangular pulse point rainfall model, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 13, pp. 463-469.
- Hayes, M.J., Svoboda, M.D., Wilhite, D.A., and Vanyarkho, O.V. (1999) Monitoring the 1996 drought using the Standardized Precipitation Index. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, Vol. 80, pp. 429-438.
- Heim, R.R. (2002) A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, Vol. 83, pp. 1149-1165.
- Hisdal, H., Stahl, K., Tallaksen, L.M., and Demuth, S. (2001) Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent. *Int. J. Climatol.*, Vol. 21, pp. 317-333.
- Houghton J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., and Xiaosu, D. (2001) Climate 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.
- IPCC (2001) *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. J.T. Houghton et al. (eds.). Cambridge University Press, NY.
- Keyantash, J. and Dracup, J.A. (2002) The quantification of drought: an evaluation of the drought indices. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, Vol. 83, pp. 1167-1180.
- Kim, S., Han, S., and Kim, E. (2010) Stochastic modeling of soil water and plant water stress using cumulant expansion theory. *Ecohydrology*, in press, doi: 10.1002/eco.127.
- Lal, M. and H. Harasawa (2001) Future climate change scenarios for asia as inferred from selected coupled atmosphere-ocean global climate models. *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 79, pp. 219-227.
- Lana, X., Serra, C., and Burgueno, A. (2001) Patterns of monthly rainfall shortage and excess in terms of the standardized precipitation index for Catalonia (NE Spain). *Int. J. Climatol.*, Vol. 21, pp. 1669-1691.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1993) Drought monitoring with multiple timescales. Preprints, Eighth Conf. on Applied Climatology, Anaheim, CA, Am. Meteor. Soc., pp. 179-184.
- Oliver, J.E. (2005) *Encyclopedia of world climatology*. Encyclopedia of Earth Sciences Series, Springer, Berlin Heidelberg New York, pp. 855.
- Palmer, W.C. (1965) Meteorological drought. Weather Bureau, Research Paper No. 45, U.S. Dept. of Commerce, Washington, DC, pp. 58.
- Rouault, M. and Richard, Y. (2003) Intensity and spatial extension of drought in South Africa at different time scales. *Water SA*, Vol. 29, pp. 489-500.
- Seiler, R.A., Hayes, M. and Bressan, L. (2002) Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring. *Int. J. Climatol.*, Vol. 22, pp. 1365-1376.
- Silverman, B.W. (1986) *Density estimator for statistics and data analysis*. New York, Chapman and Hall.
- Svoboda, M.D., LeCompte, D., Hayes, M.J., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., Rippey, B., Tinker, R., Palecki, M., Stooksbury, D., Miskus, D., and Stevens D. (2002) The drought monitor. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, Vol. 83, pp. 1181-1190.
- Vicente-Serrano, S.M., González-Hidalgo, J.C., de Luis, M., and Raventós J. (2004) Drought patterns in the Mediterranean area: the Valencia region (eastern Spain). *Clim. Res.*, Vol. 26, pp. 5-15.
- Wilhite, D.A. (2000) Drought as a natural hazard: concepts and definitions. In: Wilhite D.A. (ed) *Drought: a global assessment*, Routledge, pp. 3-18.

(접수일: 2010.4.1/심사일: 2010.4.30/심사완료일: 2010.9.17)