



Analysis of drought characteristics depending on RCP scenarios at Korea

Kim, Jungho^a · Kim, Sangdan^b · Joo, Jingul^{c*}

^aCollege of Engineering, Colorado State University

^bDepartment of Environmental Engineering, Pukyong National University

^cDepartment of Civil Engineering, Dongshin University

Paper number: 15-106

Received: 28 December 2015; Revised: 4 February 2016 / 16 February 2016 / 22 February 2016; Accepted: 22 February 2016

Abstract

This study implemented a comparison of SPI characteristics in terms of quantitative and spatial analysis depending on four RCP scenarios. For this purpose, we compared quantitative characteristics of drought using standard precipitation index resulted from daily precipitation data reflecting future green gas concentration scenarios, and spatial distribution field of seasonal drought occurrence frequency and its duration, was analyzed to compare drought trends depending on the RCP scenarios. As a result, we found that SPI time series was quite different from each other and correlation coefficients were lower than 0.08. Depending on the RCP scenarios, spatial distribution results showed different trends in drought severity, frequency, and duration. The biggest reason of the difference is daily precipitation data based on the different greenhouse gas concentrations, but we could not find the effect of the concentration extent on drought occurrence projection. In addition, according to the results from this study, drought analysis results using single RCP scenario may have considerable uncertainty.

Keywords: Climate Change, drought, projection, RCP scenario

RCP 시나리오별 한반도 가뭄특성 분석

김정호^a · 김상단^b · 주진걸^{c*}

^a콜로라도주립대학교 공과대학, ^b부경대학교 환경공학과, ^c동신대학교 토목공학과

요 지

본 연구에서는 RCP 시나리오별 표준가뭄지수의 특성을 정량적인 측면과 공간적인 측면에서 상호비교 하였다. 이를 위해, 4개의 RCP 시나리오로부터 산정된 SPI를 기반으로 가뭄 특성을 정량적으로 비교하였고, 가뭄발생 횟수와 지속기간을 공간적으로 분석하였다. 결과적으로, RCP 시나리오별 SPI의 거동 특성은 매우 상이하고, 모든 상관계수가 0.08보다 낮은 것으로 나타났다. 또한 가뭄의 정도, 발생횟수, 그리고 지속기간에 대한 상이한 공간분포 경향을 확인할 수 있었다. RCP 시나리오별 상이한 가뭄발생전망 특성의 가장 큰 배경은 다른 온실가스 배출농도 시나리오 기반의 일 강수량을 들 수 있으나, 온실가스 배출농도 규모에 따른 영향은 명확하지 않았다. 아울러, 본 연구 결과를 통해 단일 RCP 시나리오 자료만 이용한 가뭄발생 전망에는 상당한 불확실성이 따를 것으로 판단된다.

핵심용어: 기후변화, 가뭄, 전망, 대표농도경로 시나리오

1. 서 론

우리나라의 연평균 강수량은 약 1,300 mm로 비교적 습윤

한 지역에 속하나 최근 30년 강수량의 발생경향에 따르면 50~60% 정도가 우기에 집중되고 있어 강수량의 계절별 불균등성이 뚜렷하다. 특히, 우기(6~9월)대비 봄철 강수는 연간 강수량의 약 20% 정도에 불과하며, 겨울철 강수 또한 대부분 강설에 의한 것이라 장기간의 무강우로 인한 가뭄발생 우려가 매우 크다. 대표적인 예로 2015년 6월 19일에는 겨울철에서

*Corresponding Author. Tel: +82-61-330-3137
E-mail: jgjoo@dsu.ac.kr (J. Joo)

봄철까지 지속된 강수량의 부족으로 발생한 가뭄으로 인해 소양강댐이 1978년 이후 역대 최저 수위에 도달하기도 하였으며, 이로 인해 내륙 곳곳에서는 물 부족 현상으로 인해 용수 공급 문제와 농업피해가 발생하였다.

일반적으로 가뭄은 비교적 긴 시간에 걸친 강수의 부족으로부터 발생하며, 재해의 시작을 정확히 감지할 수 없을 정도로 서서히 발생하는 재해이다(Kim et al. 2010). 또한 가장 비용이 많이 드는 자연재해로, 그 결과 선진 외국의 경우 가뭄현상을 모니터링하고 예측전망하는데 많은 노력을 기울이고 있다(Svoboda et al., 2002; Burke et al., 2006; Sheffield and Wood, 2008).

최근 들어, 우리나라에서는 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 발표한 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, 이하 RCP)를 활용한 연구가 활발하게 수행되고 있다(Kim et al., 2014; Ahn et al., 2015; Cook et al., 2015; Yoo et al. 2015; Joo et al., 2015; Kim et al., 2015; Kim and Joo, 2015; Park et al., 2015). 먼저, RCP 시나리오 자료의 기초연구 사례로, 보정방법 적용 및 기본특성 비교 연구가 있다. 대표적으로 Joo et al. (2015)는 우리나라를 대상으로 RCP 시나리오 일 강수량자료의 보정방법 제안 및 평가를 통해 RCP 자료의 적용성 향상에 기여를 하였다. Kim et al. (2015)과 Kim and Joo (2015)는 RCP 시나리오 자료에 영향을 미칠 수 있는 4개의 농도 시나리오, 지역기후모형별 상세화 기법, 그리고 보정방법의 적용유무 등 다양한 요소를 고려하여 RCP 일 강수량자료의 정량적 특성과 공간분포 경향을 비교하였다.

RCP 자료를 활용한 미래 가뭄관련 연구로는, 먼저, Kim et al. (2014)는 RCP 8.5 시나리오 기반의 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, 이하 SPI)와 표준강수증발산지수를 이용하여 미래 가뭄발생을 전망하였다. Ahn et al. (2015)는 금각유역을 대상으로 RCP 4.5/8.5 시나리오기반의 미래 기후변화가 농업용수 공급에 미치는 영향을 MODSIM와 SWAT 모형을 이용하여 연구하였으며, Yoo et al. (2015)는 이변수 가뭄빈도 곡선(bivariate drought frequency curve)을 이용하여 한반도의 미래 가뭄 위험도를 검토한 바 있다. Park et al. (2015)는 현재 및 미래기후에서의 SDF (Drought Severity-Duration-Frequency) 곡선의 비교를 통해 극한 가뭄사상에 대한 기후변화의 영향검토를 수행하였다. 선행연구들은 다양한 RCP 시나리오 활용방안을 통해 가뭄 전망 및 미래 위험도를 제시하였으나, 다양한 RCP 시나리오를 활용한 가뭄발생 특성 비교연구는 부족한 실정이다.

본 연구는 Kim et al. (2015)과 Kim and Joo (2015)의 후속

연구로서 RCP 시나리오의 가뭄전망 특성에의 영향을 검토를 목적으로 RCP 시나리오별 SPI의 특성을 정량적인 측면과 공간적인 측면에서 상호비교 하였다. 이를 위해, RCP 시나리오별 산정한 SPI를 기반으로 가뭄을 분류하고, 경년변동과 월별 변화에 따른 가뭄발생 특성을 정량적으로 비교하였다. 또한, 계절 및 기간별 가뭄발생 횟수와 가뭄지속기간을 공간적으로 분석하여 상이한 가뭄발생 특성을 RCP 시나리오별로 검토하였다. 연구수행을 위해 기상청 관측 지점 66개소를 대상으로 전망된 2012년~2100년 남한 상세 기후변화 앙상블 RCP 시나리오 일 강수량자료를 분석에 활용하였다.

2. 방법론

2.1 대표농도경로 시나리오

IPCC의 제5차 평가보고서에서는 기후변화에 대한 인간의 대응 및 정책수행에 따라 RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5 등 4개의 시나리오를 선정하였다(IPCC, 2014). RCP 시나리오의 숫자는 복사강제력, 즉 온실가스 등으로 에너지의 평형을 변화시키는 영향력의 정도를 의미하는 양으로서 단위는 W/m^2 지상에도 달되는 태양복사가 약 $238 W/m^2$ 이므로 RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5의 복사강제력은 입사 태양복사량의 약 1.1%, 1.9%, 2.5%, 3.6%에 해당된다. RCP 2.6은 온실가스의 농도가 가장 낮은 경우로 지구 스스로 인간 활동에 의한 영향을 회복한 시나리오이며, RCP 8.5는 온실가스의 농도가 가장 높은 경우로 어떠한 온실가스 저감 노력 없이 현재 추세로 배출되는 최악의 상황을 가정한 시나리오이다. RCP 4.5와 6.0은 온실가스 저감을 위한 노력이 일부 효과를 거둔 시나리오이다. 대표농도경로에 대한 보다 상세한 내용은 Kim et al. (2015)과 Kim and Joo (2015)에 수록되어 있다.

2.2 표준강수지수

본 연구에서는 다양한 가뭄지수(WADI, PDSI, MSWAS I, SMI, NDVI) 중 강수량만으로 산정이 가능한 SPI를 가뭄지수로 선정하였다. 미래 가뭄지수 산정에 다양한 전망자료가 입력자료로 사용될 경우에 미래 가뭄발생 특성결과에 불확실성을 가중시키는 요인으로 작용될 수 있기 때문이다.

일반적으로 SPI를 산정하기 위해서는 먼저 분석하고자 하는 시간단위(예를 들어 1, 3, 6, 9, 12, 24개월 등)에 따라 누가강수 시계열을 이동 누가방법으로 새로운 시계열을 작성한다. 작성된 시계열을 이용하여 해당 시계열과 적합한 확률분포형을 결정하며, 해당 확률분포형을 이용하여 각 변량에 대

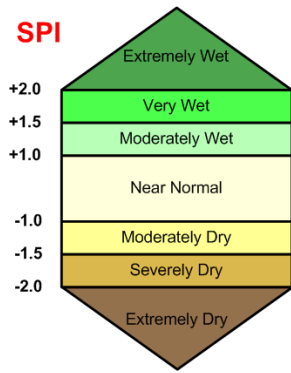


Fig. 1. Drought classification of SPI

한 누가 확률을 산정한다. 최종적으로 표준정규분포에서 동일한 누가확률을 갖는 Z값을 결정하면 이 값이 SPI가 된다 (Moon, 2010). 아울러, 산정된 SPI의 가뭄구분은 Fig. 1과 같이 정량적인 범위에 의해 나뉜다.

본 연구에서는 월별 최적 확률분포를 결정하는 대신에 비모수적 통계기법 중 하나인 커널밀도추정(Kernel Density Estimate, KDE) 법을 이용하여 월별 확률밀도 함수를 추정하였다(Park et al., 2015). 비모수적 통계기법은 사전적인 가정으로부터 발생할 수 있는 모형설정의 오류를 피할 수 있어, RCP 시나리오 자료와 같이 불확실성이 큰 자료를 이용할 경우에는 비모수적 통계기법이 모수적 통계기법보다 더 적합하다. 이에 대한 보다 상세한 내용은 Park et al. (2015)을 참고하기 바란다.

3. 대표농동경로 시나리오별 표준강수지수 전망 특성

3.1 관측 자료와 RCP 자료

본 연구에서는 RCP 전 시나리오(RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5)의 일 강수량 자료를 사용하여 SPI를 산정하고, RCP 시나리오별 가뭄발생 특성 분석에 활용하였다. 전국 기상청 관측 지점 66개소를 대상으로 2012년~2100년 남한 상세 기후변화 앙상블 시나리오 일 강수량 자료를 분석에 사용하였다. 남한상세 앙상블 전망자료의 경우, 제어적분 기간에 상관없이 RCP 시나리오 4.5와 8.5의 가용이 가능하며, 200년 제어적분 자료는 2011~2100년까지의 폭 넓은 기간의 전망자료가 제공되고 있다. 시간 및 공간 해상도는 각각 일(day)과 1 km로 지역별 상세한 기후변화 전망분석이 가능한 수준이다. 아울러, SPI 산정에 필요한 확률밀도함수는 1971~2010년까지 관측된 일 강수량 자료(40년 자료)로부터 결정되었다. 본 연구에서 사용한

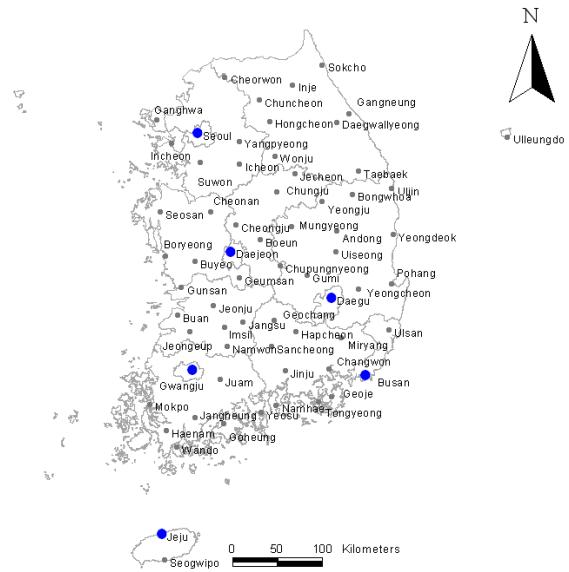


Fig. 2. Location of 66 gauge stations used in the Korean Peninsula

66개 관측지점의 위치를 Fig. 2에 표시하였다. 파란색 점은 대표 6개 지점(서울, 대전, 대구, 광주, 부산, 제주 지점)을 의미한다.

RCP 시나리오별 SPI의 본격적인 분석에 앞서 입력자료인 일 강수량 자료에 대한 비교군(관측 일 강수량 자료)과 실험군(RCP 일 강수량 자료)에 대한 비교분석이 필요하다. 이에 대한 내용은 Joo et al. (2015)에서 관측자료와 RCP 자료의 중복 기간인 2001~2013년에 대해 이미 수행한 바 있다. 결과를 간략하게 정리하면, 분석에 가용된 대표 6개 지점(서울, 대전, 대구, 광주, 부산, 제주)의 월별 강수량 분포는 관측자료와 매우 유사한 경향을 보였으며, 연평균 강수량 차이는 관측자료를 기준으로 평균 3.3%(최대 16.5%)정도뿐인 것으로 나타났다. 결과적으로 RCP 시나리오 자료가 실제 강우사상을 비교적 잘 재현하는 것으로 판단된다. 따라서 RCP 시나리오 일 강수량자료가 미래 가뭄전망에 충분히 가용될 수 있을 것으로 사료된다.

3.2 경년변동에 따른 표준강수지수

경년변동에 따른 강수량과 SPI의 거동특성을 검토하기 위해 월 강수량과 월별 산정된 SPI를 함께 도식화하였다. 본 연구에서 검토한 기간인 2012년 1월부터 2100년 12월까지에 대한 월 강수량과 SPI(6개월 분석시간단위, SPI-6months)를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 상단의 그림은 전체 기간에 대한 결과이며, 하단의 그림은 상세한 검토를 위해 2045년 1월부터 2055년 12월까지의 결과를 확대한 것이다.

그림을 살펴보면, 월 강수량의 증가와 감소 정도에 따라 SPI

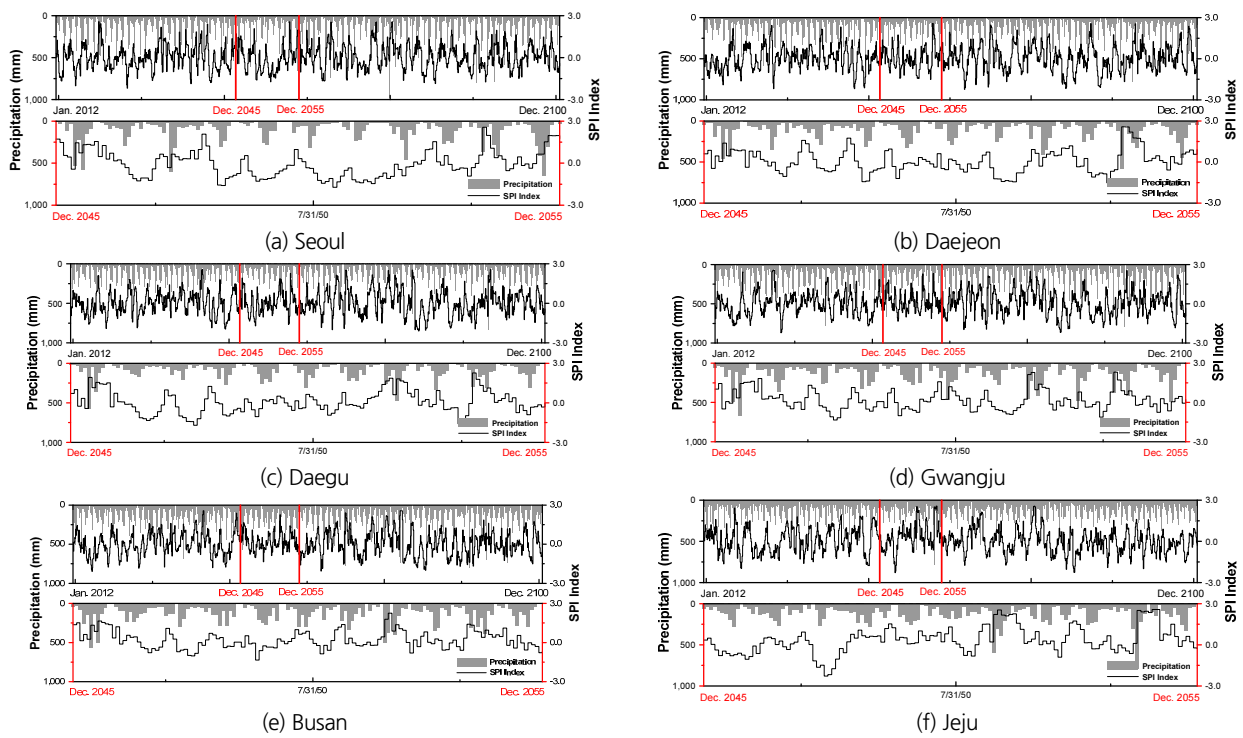


Fig. 3. SPI-6 months results from RCP 2.6 scenario in 2012~2100 year

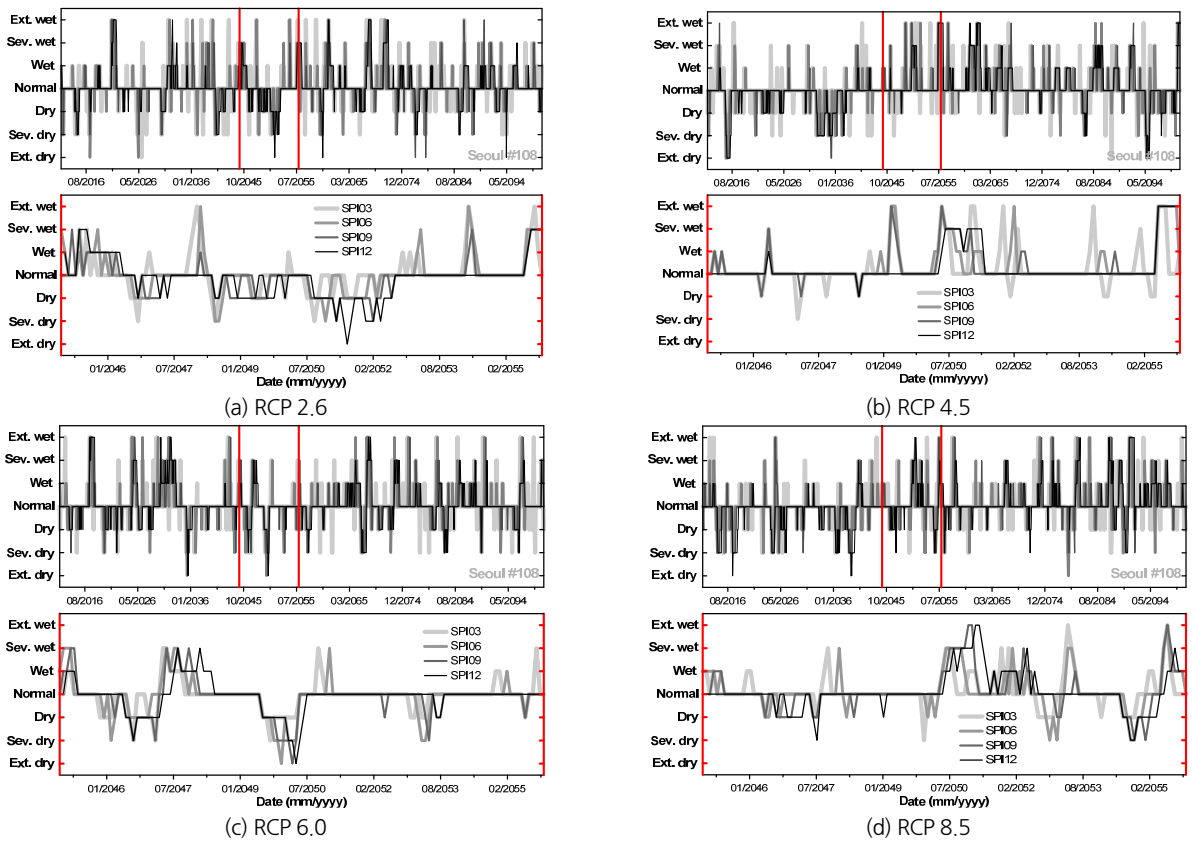


Fig. 4. SPI results according to various RCP scenarios (Seoul)

의 거동 또한 확연한 변화가 있는 것을 확인할 수 있다. 대부분의 결과에서 볼 수 있듯이, 강수량의 증가한 구간 뒤에는 SPI가 상대적으로 증가하는 경향을, 강수량이 비교적 적거나 무강우 기간이 발생한 구간 이후에는 SPI가 음수로 산정되었다. 이 같은 결과는 본 연구에서 적용한 66개 지점에서 모두 동일하게 나타났다.

3.3 대표농도경로 시나리오별 표준강수지수

RCP 시나리오별 SPI 산정결과를 검토하기 위해 SPI를 살펴보았다. 먼저, 분석시간단위별 SPI를 상호비교하기 위해 산정된 SPI를 기반으로 서울지역의 가뭄분류(건조상태: SPI 음수인 경우, 습윤상태: SPI가 양수인 경우) 결과를 Fig. 4에 도식화하였다. 사용된 분석시간단위는 3, 6, 9, 12개월이다. 상단의 그림은 2012년 1월부터 2100년 12월까지에 해당하는 SPI를, 하단의 그림에는 상세한 검토를 위해 2045년 1월부터 2055년 12월까지의 SPI를 확대하여 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면, 가뭄 분석시간단위에 따른 SPI는 전반적으로 동일한 전망 경향을 보이며 분석시간단위가 길어질수록 상대적으로

로 완만한 SPI를 전망하는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 다른 여러 연구에서 제시한 결과와 동일하며, 이 같은 분석시간단위별 SPI는 단기 혹은 장기 가뭄 전망목적에 따라 적절하게 사용되어질 수 있을 것으로 보인다.

다음으로 RCP 시나리오별 SPI의 특성을 상호비교하기 위해 동일한 분석시간단위에 대해 산정한 SPI를 기반으로 서울지역의 가뭄정도 전망결과를 Fig. 5에 도식화하였다. 앞서 검토한 Fig. 4의 결과와는 달리 RCP 시나리오별 건조와 습윤 상태는 시나리오별로 매우 상이한 거동특성을 보였다. 특히, 분석시간단위에 상관없이 모든 결과에서 RCP 시나리오에 따라 상반된 상태를 보이는 경우가 대부분이다. 예를 들어, SPI-3 months 결과의 2045년 1월부터 2055년 12월까지 결과에서 RCP 2.6 시나리오 결과가 건조상태인 경우 다른 RCP 시나리오 결과들의 가뭄분류는 보통 혹은 습윤 상태로 전망되었다. 이러한 양상은 다른 분석시간단위의 결과에서도 동일하다. 또한 상이한 RCP 시나리오가 건조 상태를 동일하게 전망하여도 그 심도가 다르고, 가뭄지속기간이 다른 경우가 대부분인 것으로 나타났다.

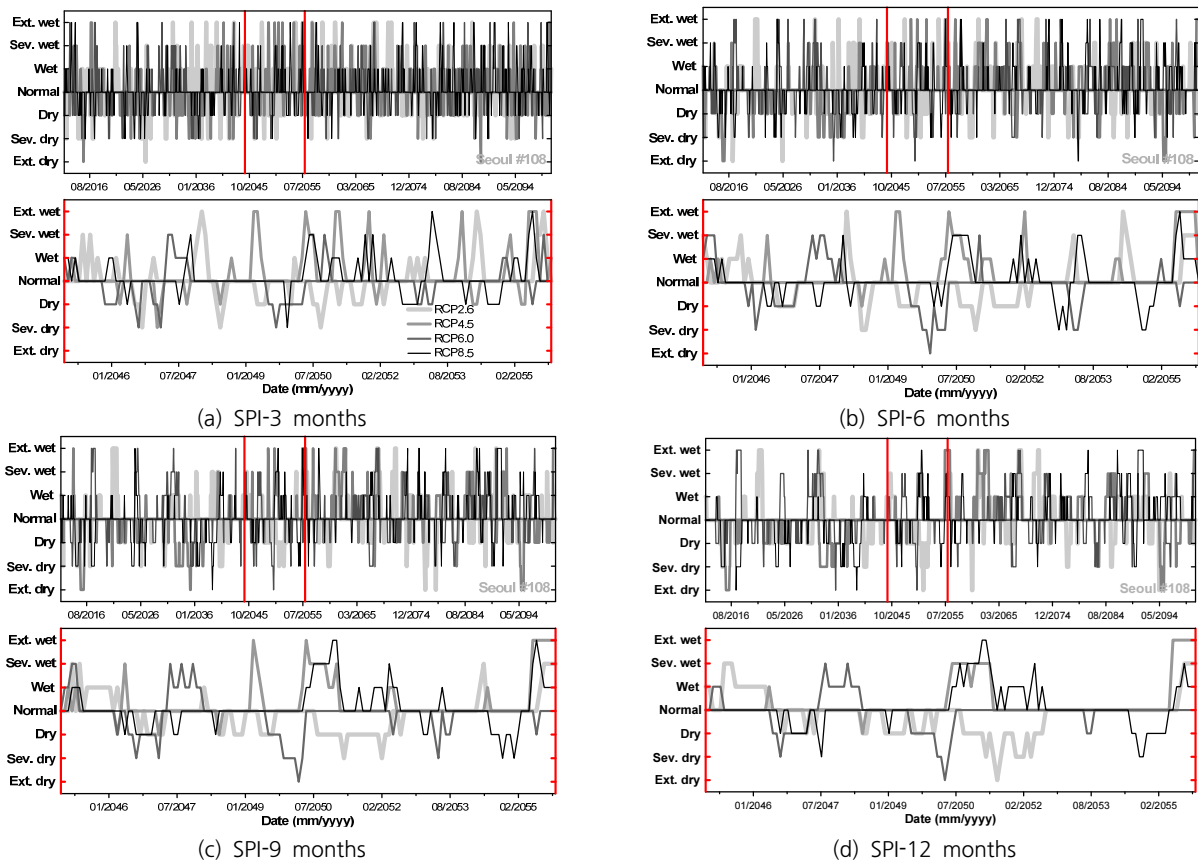


Fig. 5. SPI results according to various duration periods (Seoul)

Table 1. Correlation coefficient between SPI depending on the duration period and RCP scenarios

(a) Depending on the duration period					(b) Depending on the RCP scenarios				
	SPI-3	SPI-6	SPI-9	SPI-12		RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
SPI-3	1.00	0.66	0.53	0.43	RCP2.6	1.00	-0.02	0.01	-0.03
SPI-6	-	1.00	0.77	0.65	RCP4.5	-	1.00	0.07	0.02
SPI-9	-	-	1.00	0.85	RCP6.0	-	-	1.00	0.06
SPI-12	-	-	-	1.00	RCP8.5	-	-	-	1.00

앞서 검토한 분석시간단위별 그리고 RCP 시나리오별 SPI의 상관관계를 검토하기 위해 상관계수를 Table 1에 정리하였다. 분석시간단위별 SPI와 RCP 시나리오별 SPI 결과간의 상관관계를 비교한 결과, 분석시간단위별 SPI는 분석시간단위에 따라 상관계수 범위가 0.43~0.85인 반면에 RCP 시나리오별 SPI의 상관계수 범위는 -0.03~0.07로 나타났다. 즉, RCP 시나리오별 상관성은 거의 없는 것으로 판단된다. 이 같은 결과의 가장 근본적인 원인은 RCP 시나리오별로 상이한 온실가스 배출농도에 있으며, 이차적인 원인은 Park *et al.* (2015)와 Kim *et al.* (2015)에서 검토한 일 강수량의 시나리오별 상이한 거동 및 정량적 특성 차이로 판단된다. 또한, RCP 시나리오 일 강수량 자료의 생성과정 중 하나인(역학적, 통계학적) 상세한 과정에서 시나리오별 각기 다른 온실가스 배출농도의 영향이 SPI 산정에 반영되었을 가능성도 배제할 수 없다. 다음으로 가까운 미래에 대한 월별 SPI의 변동성을 검토하

고자 2016-2045년 SPI를 3개 구간(10년씩)으로 구분하여 Fig. 6에 box-whisker 그래프를 제시하였다. 대표적으로 서울 지점에 대한 3개월 분석시간단위 SPI-3 months 결과이다. 그래프에서 가장 명확한 점은 산정된 SPI의 월별 중앙값이 보통상태(SPI가 -0.99~+0.99인 경우)에 해당되는 ‘Near Normal’ 단계에 속하고 있으나, box-whisker 그래프의 1-3분위(25~75%) 범위와 최소-최대값이 RCP 시나리오별 다른 양상으로 나타났다는 것이다. 이러한 결과는 기본적으로 RCP 시나리오별 서로 다른 온실가스 배출농도 가정에서 비롯된 결과로 볼 수 있다. 하지만, 단순히 RCP 시나리오별 온실가스 배출농도 차이가 SPI 산정결과에 지배적으로 작용하였다고 보기는 어려울 것으로 판단된다. 한 예로, 단순히 RCP 8.5 시나리오의 온실가스 배출농도 규모가 다른 시나리오보다 높다고 모든 결과에 가뭄발생 가능성이 크거나 심도가 깊게 나타나지 않았기 때문이다.

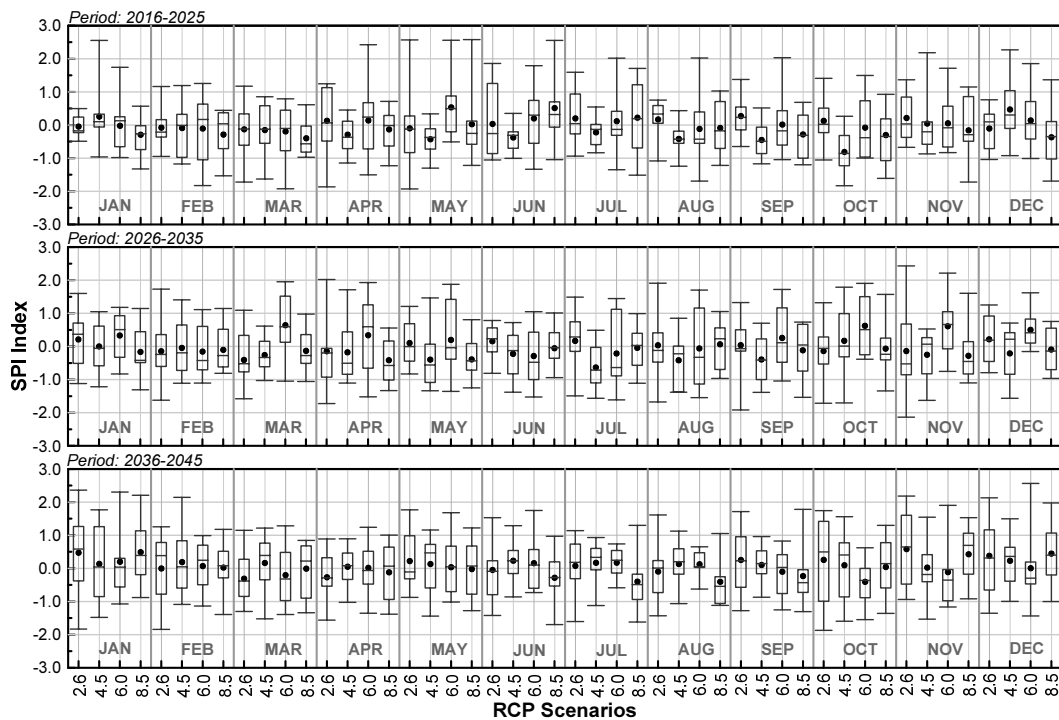


Fig. 6. Results of monthly SPI-3 months for Seoul gauge station

4. 대표농도경로 시나리오별 가뭄전망 공간분포

RCP 시나리오에 따른 SPI의 공간분포에의 영향을 검토하기 위해 RCP 2.6과 8.5 시나리오에 대한 월별 SPI 공간분포 결과를 상호 비교하였다. Fig. 7은 두 RCP 시나리오의 월별 SPI 공간분포 결과를 가뭄정도로 나타내었으며, 대표적으로 2016년에 대한 결과를 도식화한 것이다. 결과를 살펴보면, RCP 2.6과 8.5에 대한 월별 SPI 가뭄분류는 공간적으로 매우 상이한 것으로 나타났다. 특히, 우기인 6~8월에서 뚜렷하게 나타났으며, 그 밖에도 5월과 11월에서도 두 시나리오에 따른 가뭄발생 정도가 공간적으로 다르다.

다음으로 RCP 시나리오의 미래 가뭄발생 전망에의 영향을 계절별 가뭄 발생횟수의 공간분포를 통해 살펴보았다. 이를 위해 가뭄발생이 빈번한 봄과 가을 대상으로 가뭄 등급별

발생횟수를 공간적으로 분포시켰다. Fig. 8은 RCP 시나리오별 Moderately dry, Severely dry, 그리고 Extremely dry의 발생횟수를 봄철과 가을철에 대상으로 공간분포 시킨 결과이다. 참고로 66개 지점 자료를 크리깅 방법(kriging method)으로 1 km 해상도로 발생횟수를 공간적으로 분포시켰다. 3개월 분석 시간단위로 산정된 SPI를 사용하였다.

Fig. 8(a)의 봄철 결과를 살펴보면, 적용된 네 개의 RCP 시나리오별 가뭄발생 횟수의 공간적 분포가 상당히 상이한 것을 확인할 수 있다. 가뭄정도 중 Moderately Dry 경우를 보면, RCP 2.6 시나리오 결과는 동해와 남해안 지역을 중심으로 상대적으로 높은 가뭄발생 횟수가 전망된 반면에 RCP 4.5와 RCP 6.0 시나리오 결과에는 중부지역을 기점으로 가뭄발생이 전망되었다. 다른 가뭄정도인 Severely Dry의 공간분포 경향은 Moderately와 유사하였으며, Extremely Dry 결과에서

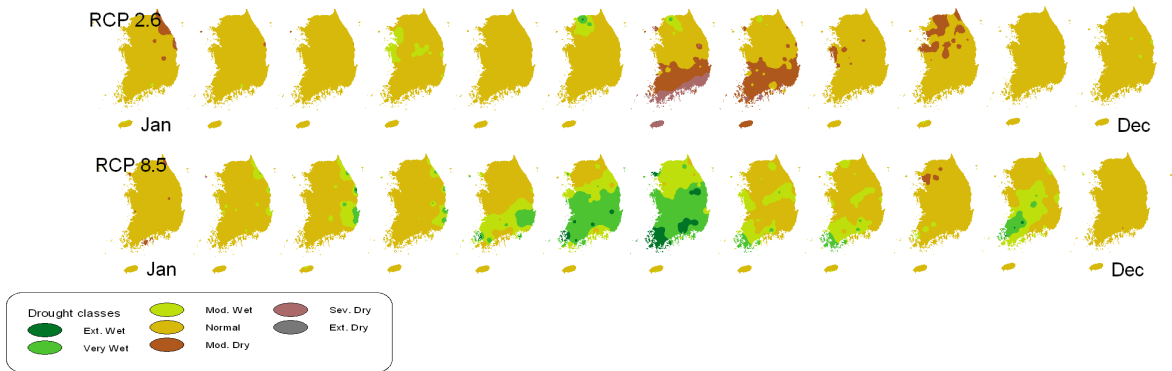


Fig. 7. Spatial distribution of SPI 3-months resulted from RCP 2.6 and 8.5 scenarios

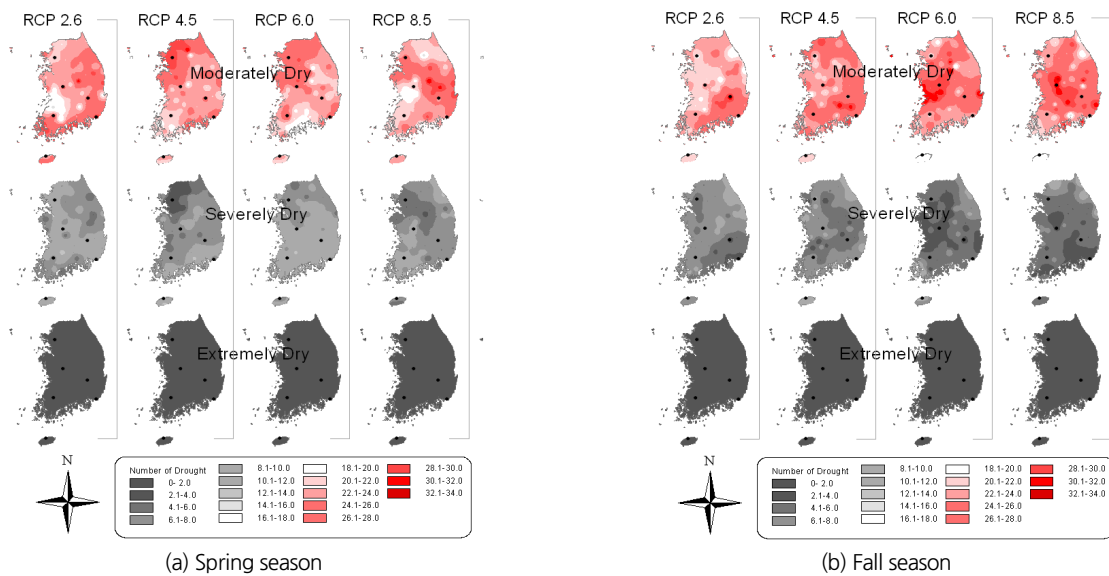
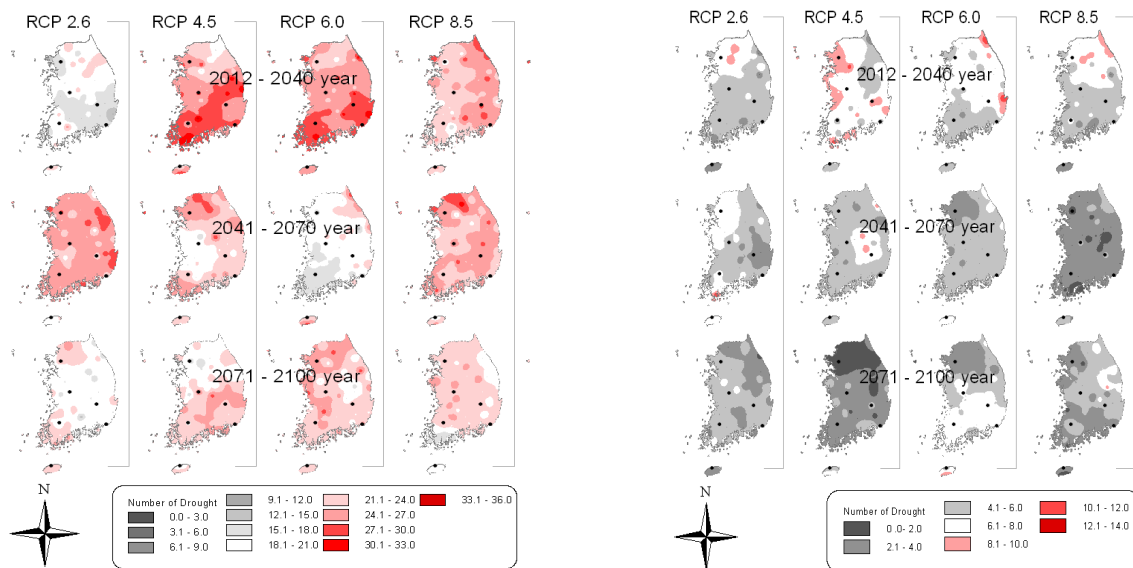


Fig. 8. Number of drought occurrence depending on the drought classification in 2012~2100 year

Table 2. Characteristics of the drought occurrence number depending on the RCP scenarios

		Spring				Fall				Winter			
		RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
Mod.	Seoul	20.0	30.0	26.0	25.0	19.0	20.0	20.0	24.0	22.0	22.0	28.0	25.0
	Daejeon	25.0	24.0	24.0	20.0	23.0	25.0	30.0	31.0	23.0	27.0	30.0	22.0
	Daegu	25.0	25.0	24.0	23.0	32.0	23.0	26.0	25.0	32.0	34.0	27.0	31.0
	Gwangju	26.0	20.0	29.0	20.0	24.0	25.0	21.0	22.0	29.0	29.0	23.0	24.0
	Busan	30.0	28.0	26.0	24.0	26.0	26.0	23.0	23.0	24.0	22.0	24.0	25.0
	Jeju	23.0	24.0	23.0	23.0	22.0	20.0	19.0	17.0	19.0	22.0	24.0	19.0
	66 sites	Min.	15.0	11.0	12.0	14.0	17.0	17.0	16.0	15.0	16.0	17.0	15.0
	Max.	31.0	32.0	30.0	32.0	32.0	32.0	34.0	33.0	34.0	37.0	33.0	33.0
	Ave.	23.7	23.7	23.1	23.2	23.2	24.5	25.1	25.1	26.4	26.3	25.8	24.9
Sev.	Seoul	9.0	2.0	7.0	4.0	5.0	9.0	5.0	6.0	7.0	7.0	4.0	4.0
	Daejeon	10.0	6.0	8.0	10.0	6.0	7.0	2.0	3.0	8.0	5.0	5.0	9.0
	Daegu	10.0	7.0	11.0	7.0	3.0	5.0	3.0	6.0	4.0	0.0	2.0	2.0
	Gwangju	7.0	7.0	8.0	11.0	8.0	8.0	6.0	6.0	3.0	5.0	9.0	7.0
	Busan	8.0	7.0	8.0	6.0	2.0	7.0	4.0	3.0	9.0	5.0	8.0	8.0
	Jeju	9.0	8.0	6.0	7.0	8.0	10.0	9.0	5.0	9.0	10.0	6.0	11.0
	66 sites	Min.	4.0	1.0	3.0	3.0	2.0	2.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0
	Max.	14.0	13.0	14.0	17.0	12.0	11.0	11.0	11.0	13.0	11.0	11.0	12.0
	Ave.	8.2	7.2	9.1	7.3	6.5	6.4	5.0	4.9	5.8	5.4	6.1	7.4
Ext.	Seoul	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Daejeon	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0
	Daegu	0.0	3.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Gwangju	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	1.0	1.0	0.0
	Busan	1.0	1.0	4.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
	Jeju	1.0	2.0	4.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	2.0	0.0	1.0	1.0
	66 sites	Min.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Max.	4.0	3.0	4.0	3.0	4.0	2.0	3.0	2.0	2.0	4.0	3.0	
	Ave.	1.1	1.1	0.9	0.7	0.6	0.4	0.2	0.4	0.6	0.6	0.2	



(a) more than 1 month duration

(b) more than 3 months duration

Fig. 9. Number of drought occurrence during more than 1 and 3 months period

는 대부분 4회 미만의 가뭄발생이 전망되어 모든 RCP 시나리오 적용결과에서 공간분포 경향이 매우 균등하게 나타났다. Fig. 8(b)의 가을철 결과에서도 RCP 시나리오별 가뭄발생 횟수의 공간분포 특성이 시나리오별로 상이하게 나타났다. 특이사항으로는 가을철 Severely Dry 가뭄발생 횟수가 봄철보다 높게 전망되었으며, Extremely Dry의 공간분포 결과는 봄철과 동일하게 균등한 특성을 보였다.

다음으로 봄철, 가을철, 그리고 겨울철 가뭄발생횟수의 특성을 정량적으로 검토하기 위해 Table 2에 대표 6개 지점인 서울, 대전, 대구, 광주, 부산, 제주도의 가뭄발생 횟수 전망결과와 66개소 전체 지점에 대한 최소, 최대, 평균값을 정리하였다. 먼저, 가장 발생빈도가 높은 Moderately Dry (표에서

Mod.)에 대한 가뭄발생 횟수를 분석해보면, RCP 시나리오별 전체 66개 지점의 평균값에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 다만, 각 지점별로 RCP 시나리오별 영향을 어느 정도 받는 것으로 나타났다. 봄철 서울지점은 RCP 시나리오에 따른 발생횟수 차이가 10회 이상으로 전망되었으며, 가을과 겨울철 결과에서도 서울, 대전, 대구 지점에서 상대적으로 높은 발생횟수 차이가 확인되었다. 발생횟수의 지점별 차이는 가뭄심도가 깊어질수록 작아졌으며, Extremely Dry 가뭄의 경우에는 발생하지 않는 경우가 대부분으로 나타났다. 계절별로는 봄, 가을, 겨울철 순으로 발생빈도가 높게 전망되었다.

RCP 시나리오의 가뭄지속기간에의 영향을 검토하기 위해, 총 3개 구간으로 기간을 설정하여 가뭄상태가 1개월 이상

Table 3. Characteristics of drought occurrence number depending on the RCP scenarios

		Drought occurrence duration periods											
		1 month				3 month				5 month			
		RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
2012 to 2040	Seoul	17.0	28.0	23.0	25.0	8.0	7.0	4.0	9.0	1.0	2.0	1.0	0.0
	Daejeon	20.0	24.0	20.0	28.0	4.0	5.0	4.0	8.0	1.0	1.0	3.0	0.0
	Daegu	18.0	22.0	18.0	25.0	5.0	3.0	5.0	9.0	2.0	0.0	0.0	1.0
	Gwangju	18.0	26.0	19.0	25.0	6.0	7.0	5.0	5.0	2.0	1.0	1.0	1.0
	Busan	15.0	22.0	18.0	30.0	6.0	6.0	5.0	5.0	3.0	1.0	0.0	1.0
	Jeju	22.0	20.0	24.0	22.0	3.0	6.0	4.0	4.0	0.0	2.0	1.0	0.0
	66 sites	Min.	12.0	19.0	14.0	18.0	2.0	2.0	1.0	2.0	0.0	0.0	0.0
	Max.	25.0	30.0	26.0	34.0	10.0	11.0	8.0	11.0	4.0	3.0	5.0	5.0
	Ave.	18.6	25.0	20.1	26.1	5.5	5.5	4.4	6.9	1.9	1.2	1.2	1.1
2041 to 2070	Seoul	27.0	17.0	22.0	17.0	4.0	1.0	6.0	4.0	0.0	0.0	2.0	1.0
	Daejeon	19.0	27.0	26.0	18.0	6.0	3.0	5.0	5.0	3.0	0.0	2.0	1.0
	Daegu	22.0	21.0	28.0	19.0	6.0	5.0	6.0	4.0	2.0	0.0	0.0	1.0
	Gwangju	23.0	20.0	29.0	17.0	4.0	3.0	6.0	4.0	0.0	0.0	1.0	1.0
	Busan	23.0	23.0	30.0	17.0	3.0	4.0	5.0	5.0	1.0	0.0	2.0	1.0
	Jeju	21.0	20.0	27.0	22.0	4.0	5.0	6.0	8.0	0.0	0.0	2.0	0.0
	66 sites	Min.	15.0	16.0	19.0	14.0	2.0	0.0	3.0	2.0	0.0	0.0	0.0
	Max.	30.0	28.0	31.0	28.0	10.0	8.0	12.0	8.0	3.0	2.0	4.0	3.0
	Ave.	22.7	22.1	26.2	19.7	5.1	3.0	6.2	4.8	1.2	0.2	1.9	0.7
2071 to 2100	Seoul	24.0	19.0	25.0	23.0	4.0	7.0	1.0	3.0	0.0	1.0	0.0	1.0
	Daejeon	22.0	24.0	26.0	24.0	6.0	5.0	5.0	5.0	2.0	2.0	1.0	0.0
	Daegu	22.0	28.0	25.0	24.0	6.0	5.0	5.0	4.0	4.0	2.0	1.0	0.0
	Gwangju	24.0	23.0	23.0	24.0	8.0	7.0	2.0	6.0	3.0	1.0	1.0	0.0
	Busan	25.0	26.0	21.0	23.0	6.0	5.0	3.0	3.0	0.0	0.0	2.0	1.0
	Jeju	23.0	25.0	19.0	19.0	5.0	3.0	5.0	3.0	1.0	2.0	0.0	0.0
	66 sites	Min.	17.0	16.0	18.0	15.0	2.0	2.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0
	Max.	30.0	30.0	32.0	27.0	10.0	10.0	6.0	9.0	4.0	4.0	2.0	3.0
	Ave.	22.9	23.9	24.2	21.9	5.6	5.6	3.0	4.2	1.7	1.4	0.8	0.4

과 3개월 이상 지속되는 사상의 발생횟수를 RCP 시나리오별로 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 구분된 3개 연도구간은 2012년에서 2100년까지 기간을 전반기(2012~2040년), 중반기(2041~2070년), 후반기(2071~2100)로 구분하여 각 구간별 RCP 시나리오에 따른 사상들의 발생횟수를 상세하게 비교하기 위함이다. 가뭄발생 여부는 SPI가 -1.0 이하인 경우로 설정하였다. 참고로 3개월 분석시간단위로 산정된 SPI를 사용하였다.

Fig. 9(a)를 살펴보면, RCP 시나리오별 전망된 가뭄발생 횟수의 정량적 수치와 공간분포의 상이성과 기간별 다른 결과를 확인할 수 있다. 대표적으로 2012-2040년의 구간의 경우, RCP 2.6 시나리오결과는 다른 3개 시나리오에 비해 상대적으로 가뭄발생 횟수가 적게 전망하였으며, 남해안 지역에 가뭄발생 횟수가 높게 전망한 RCP 4.5와 6.0 시나리오 결과와 달리 내륙 일부지역과 강원도 일부지역에 대해서만 21회 이상의 가뭄이 발생할 것으로 전망하였다. 3개월 이상 가뭄발생이 지속되는 횟수를 나타낸 Fig. 9(b)의 결과에서도 Fig. 9(a)와 같이 RCP 시나리오와 기간에 따라 가뭄발생 횟수와 공간분포가 상이하게 나타났다.

한편, RCP 2.6은 온실가스의 농도가 가장 낮은 경우로 지구 스스로 인간 활동에 의한 영향을 회복한 시나리오이며, RCP 8.5는 온실가스의 농도가 가장 높은 경우로 어떠한 온실가스 저감 노력 없이 현재 추세로 배출되는 최악의 상황을 가정한 시나리오이다. 이 같은 RCP 시나리오 가정을 고려할 때, RCP 2.6 시나리오 결과에서는 비교적 가뭄발생이 적게 발생하는 결과를, RCP 8.5 시나리오 결과에서는 가뭄발생이 상대적으로 높게 전망되는 결과를 기대할 수 있으나, 실제 결과에서는 이 같은 각 시나리오별 온실가스 농도에 따른 태양복사량의 증가에 따른 획일화된 결과는 명확하지 않는 것으로 판단된다.

Table 3은 Fig. 9의 결과를 대표 6개 지점과 전체 66개 지점에 대해 정리한 결과이며, 추가적으로 5개월 가뭄지속발생 횟수의 결과도 포함되어 있다. 결과를 살펴보면, 지점별, RCP 시나리오별, 그리고 기간별로 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다. 가장 가뭄발생 횟수가 높게 전망된 1개월 가뭄지속기간의 경우가 변동성이 가장 크며, 가뭄지속기간이 늘어날수록 그 차이 또한 줄어드는 것으로 확인되었다. RCP 시나리오별 66개 지점의 평균결과에서는 2041~2070년 구간과 2071~2100년 구간에서 RCP 2.6 시나리오 결과가 RCP 8.5 시나리오 결과보다 가뭄발생 횟수가 높게 전망되어 RCP 시나리오별 온실가스 농도와는 다른 양상을 보였다. 이 같은 결과는 3개월과 5개월 결과에서도 동일하게 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 RCP 시나리오의 가뭄전망 특성에의 영향을 검토를 목적으로 RCP 시나리오별 SPI의 특성을 정량적인 측면과 공간적인 측면에서 상호비교 수행하였다. 이를 위해, RCP 시나리오별 산정한 SPI를 기반으로 가뭄을 분류하고, 경년변동과 월별변화에 따른 가뭄발생 특성을 정량적으로 비교하였다. 또한, 계절 및 기간별 가뭄발생 횟수와 가뭄지속기간을 공간적으로 분석하여 상이한 가뭄발생 특성을 RCP 시나리오별로 검토하였다.

가뭄 분석시간단위에 따른 SPI는 전반적으로 동일한 전망 경향을 보이며 분석시간단위가 길어질수록 상대적으로 완만한 SPI를 전망하는 것으로 확인되었다. 반면에 RCP 시나리오별 건조와 습윤 상태는 시나리오별로 매우 상이한 거동특성을 보였다. 특히, 가뭄 분석시간단위에 상관없이 모든 결과에서 RCP 시나리오에 따라 상반된 상태를 보이는 경우가 대부분이다. 또한 상이한 RCP 시나리오가 동일하게 건조상태를 전망하였더라도 그 정도가 상이하며, 해당 상태가 지속되는 기간이 다르다. 아울러, RCP 시나리오간의 SPI 계수는 매우 낮아 상호간의 관계가 거의 없는 것으로 확인되었다.

계절별 가뭄 발생횟수의 공간분포 결과, Moderately Dry는 RCP 2.6 시나리오 결과는 동해와 남해안 지역을 중심으로 상대적으로 높은 가뭄발생 횟수가 전망된 반면에 RCP 4.5와 RCP 6.0 시나리오 결과에는 중부지역을 기점으로 가뭄발생이 전망되었다. Severely Dry의 공간분포 경향은 Moderately와 유사하였으며, Extremely Dry 결과에서는 대개 4회 미만의 가뭄발생이 전망되어 모든 RCP 시나리오 적용결과에서 공간분포 경향이 매우 균등하게 나타났다. 가을철 결과도 RCP 시나리오별로 상이한 공간분포 경향을 보여 RCP 시나리오가 가뭄전망에 미치는 영향을 확인할 수 있었다.

RCP 시나리오의 가뭄지속기간별 발생횟수의 공간분포 특성 결과에서도 가뭄발생 횟수의 공간분포 특성과 동일하게 RCP 시나리오별 상이한 공간분포 경향을 확인할 수 있었다. 특히, RCP 시나리오 가정을 고려할 때, RCP 2.6 시나리오 결과에서는 비교적 가뭄발생이 적게 발생하는 결과를, RCP 8.5 시나리오 결과에서는 가뭄발생이 상대적으로 높게 전망되는 결과를 기대할 수 있으나, 실제 결과에서는 이 같은 각 시나리오별 온실가스 농도에 따른 태양복사량과 전망된 가뭄발생횟수나 가뭄지속기간과의 명확한 관계는 확인되지 않았다.

본 연구결과를 통해 RCP 시나리오별 전망된 가뭄발생 특성은 경년변동이나 공간적으로 매우 상이한 전망특성이 제시될 수 있음을 확인하였다. 아울러, RCP 시나리오에서 가정한

온실가스 농도에 따라 가뭄발생 전망결과에 확연한 차이는 있으나, 이 차이가 단순히 온실가스 농도의 상대적인 차이에서 비롯된 것으로만 보기는 어렵다. 단순히 RCP 8.5 시나리오의 온실가스 배출농도 규모가 다른 시나리오보다 높다고 모든 결과에 가뭄발생 가능성이나 정도가 높게 나타

지 않았기 때문이다. 이 같은 현상을 물리적인 측면에서 보다 상세하게 밝혀내지 못한 점은 본 연구의 한계라 할 수 있겠으나, 다른 측면에서는 본 연구의 결과가 향후 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국민안전처 자연재해저감기술개발사업단(자연피해예측및저감연구개발사업)의 지원으로 수행한 ‘기후변화 적응을 위한 연안도시지역별 복합원인의 홍수 취약성 평가기술 개발 및 대응 방안 연구’ [MPSS-자연-2015-77]과제의 성과입니다.

References

- Ahn, S.R., Jeong, J.H., and Kim, S.J. (2015). Assessing drought threats to agricultural water supplies under climate change by combining the SWAT and MODSIM models for the Geum River basin, South Korea, *Hydrological Sciences Journal*, DOI:10.1080/02626667.2015.1112905.
- Burke, E.J., Simon, J.B., and Christidis, N. (2006). Modeling the recent evolution of global drought and projections for the twenty-first century with the Hadley Centre climate model. *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 7, No. 5, pp. 1113-1125.
- Cook, B.I., Toby R. Ault, and Jason E. Smerdon. (2015). Unprecedented 21st century drought risk in the American Southwest and Central Plains. *Science Advances*, Vol. 1, No. 1, DOI: 10.1126/sciadv.1400082.
- IPCC, (2014). Climate change 2014: synthesis report. contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Joo, J., Kim, S., Park, M., and Kim, J.-H. (2015). Evaluation and calibration method proposal of RCP daily precipitation data. *Journal of Korean Society Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 2, pp. 79-91.
- Kim, B., Park, I., and Ha, S. (2014). Future projection of droughts over South Korea using representative concentration pathways. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, Vol. 25, No. 5, pp. 673-688.
- Kim, H., Park, J., Yoon, J., and Kim, S. (2010). Application of SAD curve in assessing climate-change impacts on spatio-temporal characteristics of extreme drought events. *Journal of Korean Society Civil Engineering*, Vol. 30, No. 6B, pp. 561-569.
- Kim, J., and Joo, J. (2015). Characteristics of daily precipitation data based on the detailed climate change ensemble scenario depending on the regional climate models and the calibration. *Journal of Korean Society Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 4, pp. 261-272.
- Kim, J., Park, M., and Joo, J. (2015). Comparison of characteristics and spatial distribution tendency of daily precipitation based on the regional climate models for the Korean Peninsula. *Journal of Korean Society Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 4, pp. 59-70.
- Moon, J.W. (2010). Development of drought index based on hydrologic characteristics and water supply system in Korea. Master thesis, Korea University.
- Park, M., Sim, H.-J., Park, Y., and Kim, S. (2015). Drought severity-duration-frequency analysis based on KMA 1-km resolution RCP scenario. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 3, pp. 347-355.
- 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, No. 1, pp. 79-105.
- Svododa, M., Lecomte, D., Hyaes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., Rippey, B., Tinker, R., Palecki, M., Stooksbury, D., Miskus, D., and Stephens, S. (2002). The drought monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 83, No. 8, pp. 1181-1190.
- Yoo, J., Kwon, H., Lee, J., and Kim, T., (2015). Influence of evapotranspiration on future drought risk using bivariate drought frequency curves. *KSCE Journal of Civil Engineering*, DOI:10.1007/s12205-015-0078-9.