

SPI와 EDI를 이용한 충남 서부지역 과거와 미래 가뭄 평가

안효원^{1,2} · 하규철^{1,2,*}

¹한국지질자원연구원 지질환경연구본부 지하수연구센터

²과학기술연합대학원대학교 광물·지하수자원학

Evaluation of the Past and Future Droughts using Standardized Precipitation Index (SPI) and Effective Drought Index (EDI) in the Western Region of Chungnam Province

Hyowon An^{1,2} · Kyoochul Ha^{1,2,*}

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Department of Mineral & Groundwater Resources, University of Science and Technology

ABSTRACT

The drought has occurred from the past, and has caused a lot of damage. It is important to analyze the past droughts and predict them in the future. In this study, the temperature and precipitation of the past and the future from climate change RCP 4.5 and 8.5 scenarios were analyzed for Seosan and Boryeong in the western region of Chungnam Province, which is considered as a drought-prone area on the Korean Peninsula. Comparing Standardized Precipitation Index (SPI) and Effective Drought Index (EDI) based on the past droughts, EDI was verified to be more suitable for the drought assessment. According to RCP 4.5, the frequency and intensity of droughts in the early future (2021~2060) were expected to increase and to be stronger. Particularly, severe droughts were predicted for a long time from 2022 to 2026, and from 2032 to 2039. Droughts were expected to decrease in the late future (2061~2100). From RCP 8.5, drought occurrences were predicted to increase, but the intensity of the droughts were expected to decrease in the future. As a result of evaluation of the frequencies of droughts by seasons, the region would be most affected by fall drought in the early future and by spring drought in the late future according to RCP 4.5. In the case of RCP 8.5, the seasonal effects were not clearly distinguished. These results suggest that droughts in the future do not have any tendency, but continue to occur as in the past. Therefore, the measures and efforts to secure water resources and reinforcement of water supply facilities should be prepared to cope with droughts.

Key words : Drought, Climate change, Representative Concentration Pathway (RCP), Standardized Precipitation Index (SPI), Effective Drought Index (EDI)

1. 서 론

우리나라는 과거부터 현재까지 크고 작은 가뭄이 끊임 없이 발생되어 왔다. 우리나라의 가뭄기록은 삼국시대부터 존재하며 선조들은 가뭄을 대비하기 위해 수리시설을 새로 만들거나, 개축하였으며, 식량을 저장하고, 기상관측

을 실시하는 등의 노력들을 하였다(Kim, 1995).

가뭄은 학자들마다 다루는 관점에 따라 정의가 다르고, 각 지역의 수리적 환경에 따라 체감정도도 다르다. 예를 들면 비슷한 지형조건을 갖더라도 호수 및 대수층 등의 자연적인 수자원시스템 또는 댐과 같은 인위적인 수공구조물로 수해 혜택을 받는 경우, 그렇지 않는 경우와는 체감가뭄이 다르기 때문에 가뭄에 대한 명확한 정의는 어렵다(Kim, 2001). 가뭄에 대한 정의를 분명히 하기 위해 Wilhite and Glantz(1985)는 가뭄에 대한 여러 정의를 종합적으로 분석하여 기상학적, 농업적, 수문학적, 사회경제적 가뭄 등으로 구분하였다. 기상학적 가뭄은 주어진 강수량 또는 무강수 계수일수에 따라 정의되고, 수문학적 가

주저자: 안효원, 석사과정
*교신저자: 하규철, 책임연구원
E-mail: hasife@kigam.re.kr

Received : 2020. 9. 22 Reviewed : 2020. 9. 22 Accepted : 2020. 11. 5
Discussion until : 2020. 2. 28

뭍은 지표 및 지하수 수분의 부족량으로 정의된다. 농업적 가뭄은 실제 증발산량과 잠재 증발산량의 차이, 토양수분 부족 등으로 농작물의 피해와 생육에 직접 관계되는 가뭄이다. 사회경제적 가뭄은 물의 수요 및 공급과 관련되며, 사회나 산업이 요구하는 수준의 물을 충분하게 공급하지 못했을 때 발생 할 수 있다(Choi and Shim, 2000).

이러한 가뭄은 독립적으로 발생하는 것이 아니며 수문 순환과 밀접한 관련이 있다. 예를 들면 기상학적인 가뭄이 오래 지속되면 토양수분을 고갈시켜 농업가뭄이 유발되며 하천이나 저수지의 수량이 감소되어 수문학적 가뭄으로 이어지게 된다(Ryu et al., 2002). 이와 같은 특성 때문에 가뭄의 시간규모는 짧게는 한 계절에서 1년, 길게는 십 여년까지 지속되는 등 시작과 끝을 명확하게 규정하기 힘들다. 또한 지속적으로 누적된 효과가 천천히 나타나기 때문에 가뭄이 한참 진행된 뒤에야 가뭄을 인식하게 되어 그 피해가 커지는 경향이 있다(Choi, 1995).

이러한 문제에 대처하기 위해서 가뭄에 대한 평가 및 모니터링 연구, 미래 가뭄에 대비하기 위한 가뭄 예측에 대한 연구는 매우 중요하다고 할 수 있다. 기존의 가뭄평가는 강수량, 기온, 저류량 등의 다양한 인자 값들을 바탕으로 평가되었다. Palmer(1965)는 가뭄을 '장기간의 이상 수분부족'으로 정의하였으며, 가뭄의 심도를 수분부족량과 수분부족기간의 함수로 나타냈다. 이를 통해 강수량, 기온 및 유효 토양수분량 등을 사용하여 파머가뭄지수(Palmer Drought Severity Index, PDSI)를 고안하였다. Gibbs and Maher(1967)은 장기간의 강수량 자료를 확보해 강수량을 낮은 순으로 나열하여 10등급으로 나누고, 10등급 중 속한 범주에 따라 가뭄의 정도를 판단하는 십분위수(Deciles)를 개발하였다. Shafer and Dezman(1982)은 가뭄에 영향을 미치는 수문성분으로 강수, 적설, 하천유량, 저수지 저류량 등 4가지를 고려하였으며, 각 수문성분을 통계학적으로 해석하고 각 성분의 기여에 따른 가중치를 사용함으로써 지표수 물공급지수(Surface Water Supply Index, SWSI)를 제안하였다. Mckee et al.(1993)은 강수량의 부족이 적설량, 하천유출, 저수지 저류량, 토양수분, 지하수 등의 서로 다른 영향을 미친다는 것으로부터 표준 강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)를 개발하여 가뭄을 평가하였다. Kwon et al.(2006)은 SWSI를 우리나라 특성에 맞게 보완하여 지표 및 지하수 수문 모두 고려할 수 있는 수문학적 가뭄평가 방법을 제안하였다. 이 중 SPI는 강수량 자료만을 이용하기에 자료 취득에 대한 제약조건이 적고, 계산과정이 간단하여 효과적인 가뭄진단 지표로 널리 사용되고 있다. 또한 다양한 기간단

위로 가뭄상황을 판단할 수 있어 단기적 평가와 장기적 평가에 동시에 활용될 수 있다는 장점이 있다(Park et al., 2006). 이와 관련하여 Kim and Lee(2011)는 단기 가뭄의 표현을 위해 SPI 3, 장기 가뭄의 표현을 위해 SPI 9, SPI 12를 사용하여 가뭄을 평가한 바 있다. Byun and Wilhite(1999)은 SPI와 같은 방법에서 사용하는 단순 누적된 강수량으로는 실제로 남아 있는 물의 양을 제대로 평가하기 어렵다고 하여 유출량과 증발산량을 고려한 누적유효강수량의 개념을 도입하였고, 이를 통해 유효가뭄지수(Effective Drought Index, EDI)를 개발하였다. 이후 SPI와 EDI를 비교 분석하여 SPI의 한계와 EDI의 활용성을 검증한 바 있다(Kim et al., 2009). 하지만 실제 피해가 발생한 가뭄사례를 바탕으로 비교 및 분석한 연구는 많지 않아, 보다 정확한 가뭄분석과 EDI 방법의 검증을 위해선 가뭄 사례와의 비교 및 분석은 필요하다. 또한 가뭄피해는 주로 농번기에 체감하기에 겨울철 가뭄의 체감은 상대적으로 매우 적어 계절별 가뭄을 파악하는 것은 실제 가뭄을 대비하는 것에 도움을 줄 수 있지만 이와 관련된 연구는 현저히 적다.

한편, 앞서 설명한 여러 가지 가뭄지수들을 활용하여 Representative Concentration Pathway(RCP) 기후변화 시나리오에 적용한 미래 가뭄에 대한 예측 연구가 수행되어 왔다(Kim et al., 2013; Kim and Jin, 2015; Park et al., 2015; Kwak et al., 2016; Gwak et al., 2018). 하지만 기존의 가뭄 전망에 관련된 선행 연구들은 한반도 및 남한 범위의 국가 단위의 가뭄평가가 주를 이루었다. 지역별 가뭄 대응을 위해서는 보다 상세한 가뭄평가 및 예측이 필요하다고 할 수 있다. 우리나라 여러 지역 중 충남 지역은 2015년부터 강수가 평년에 비해 지속적으로 적게 발생하여, 2017년 6월에 보령댐의 수위가 역대 최저로 낮아지는 등 가뭄이 심했던 지역이다(Gwak et al., 2018).

본 연구에서는 한반도에서 가뭄이 취약한 지역으로 꼽히는 충남 서부지역의 온도 및 강수량의 경향성을 파악하고, 실제 피해가 발생한 과거 가뭄사례를 바탕으로 SPI와 EDI를 비교하여 어떤 방법이 국내 가뭄평가의 적용에 더 적합한지 검증하고자 하였다. 또한 미래 기후변화에 따른 단기, 장기 가뭄을 예측하고 과거와 비교하여 가뭄의 빈도에 따른 계절별 영향을 분석하고자 하였다. 본 연구에서는 온도 및 강수량의 경향성을 파악하기 위해 모수적방법의 선행회귀분석법과 비모수적방법의 Mann-Kendall 검정법을 활용하였다. 또한 가뭄 평가를 위해 단기 가뭄평가에 SPI 3, 장기 가뭄평가에는 SPI 12, 그리고 EDI를 활용하여 가뭄을 비교 및 분석하였다. 본 연구의 결과는

기후변화에 따른 지역적 가뭄 대응을 위한 정책수립에 유용하게 활용 될 수 있을 것이다.

충남 서부지역은 해안에 위치하고, 평야지대로 논농사 등 다양한 작물이 재배되는 곳이고, 과거 가뭄피해가 빈번히 발생하고 있는 곳으로 보다 정확한 가뭄평가가 필요한 곳이다. 기존 충남서부 지역에 대한 가뭄평가 연구는 Lee(2016)에 의하여 이루어진 바 있는데, SPI를 이용하여 충남 지역의 과거와 미래 가뭄을 평가하였고 태안, 서산, 보령, 예산 등의 충남 서부 지역이 주로 가뭄에 취약하다는 결과를 보여주었다. 하지만, 여기에서 기후변화 시나리오는 제어적분 200으로 도출된 것을 이용하였다. 따라서 정확한 평가를 위해서는 제어적분 400에 의한 분석도 이루어져야 하며(NIMR, 2012), SPI 이외의 지수를 이용한 가뭄의 경향성을 좀 더 자세히 고찰할 필요가 있다.

2. 연구 지역

충남지역은 최근 2012~2018년까지 강수량 부족에 따른 가뭄이 빈번하게 발생하였다. 특히 2015년에는 충남의 누적강수량은 평년에 비해 50% 미만 수준을 보여주었고, 이로 인한 농업용수 부족으로 태안군 전체 벼 재배면적 약 8%의 면적이 가뭄으로 인해 모내기를 실시하지 못하였으며, 간척지 농업용수의 염도 상승으로 인해 농작물 피해가 발생하여 13.37백만 원의 복구비가 소요되었다. 충남의 여러 지역 중에서도 충남 서부지역은 2015년에 보령댐의 저수율이 예년대비 22.1%까지 떨어지고, 서산지역의 대호간척지는 염도의 증가로 벼가 고사되어 20~70% 가량 피해를 보기도 하였다(Lee, 2016).

충남 서부지역의 과거와 미래 가뭄 평가를 위해 충남 서부지역을 대표하는 관측소로써 기상자료가 가장 많이 축적된 서산, 보령 관측소를 선정하였다(Fig. 1). 기상자료는 기상청의 중관기상관측장비(ASOS, Automated Synoptic Observing System)를 통해 수집되었고, 1980년부터 2019년까지의 40년 자료를 사용하였다. 한반도 기후변화 전망

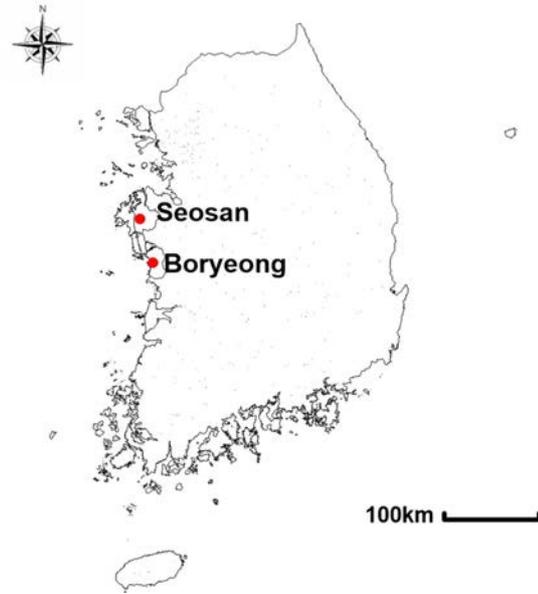


Fig. 1. The location of the meteorological weather station for the drought assessment in the western region of Chungnam Province.

분석서(KMA, 2018)에 따른 남한 연평균기온 및 연평균 강수량(1981~2010)은 12.5°C, 1,308 mm 이다. 서산(1981~2010)의 경우 연평균기온 및 연평균강수량은 11.9°C, 1,286 mm이고, 보령(1981~2010)의 연평균기온 및 연평균 강수량은 12.4°C, 1,244 mm로 각 지역의 기상특성은 남한의 평균과 큰 차이가 없다.

Table 1은 2018 국가가뭄정보통계집(Ministry of the Interior and Safety et al., 2020)을 바탕으로 충남지역의 최근가뭄과 그 피해를 편집한 자료이다. Table 1에서 ‘가뭄 기간’은 가뭄 중에서도 실제로 가뭄에 의해 피해를 입은 기간을 의미하고, 주로 여름철에 가뭄 피해를 입은 것으로 나타난다. 주요 피해를 살펴보면 2012년에는 농작물, 2014년에는 제한급수, 2015년에는 농작물, 제한급수, 공급조정 등의 가장 극심한 피해를 입었다. 또한 2016년에는 농작물 및 제한급수, 2017년에는 제한급수로 인한 피해를 입었다.

Table 1. Recent droughts in Chungnam Province

Year	Drought period (month)	Damage
2012	5-6	Crop
2014	7	Restricted water supply
2015	7-9, 11	Crop, restricted water supply, water supply method adjustment
2016	8,9	Crop, restricted water supply
2017	6-7	Restricted water supply

*Source : Modified from the 2018 National Drought Information Statistics (Ministry of the Interior and Safety et al., 2020)

3. 연구 방법

3.1. 경향성 분석

3.1.1. 모수적 경향분석 - 선형회귀분석

선형회귀분석은 선형추세분석이라고도 하는데, 일정 기간 동안 자료의 통계적인 단순 증가 또는 단순 감소에 대한 경향성을 분석하는데 사용할 수 있다. 선형회귀분석은 최소제곱법(Least squares method)을 이용하여 그린 직선의 기울기로서 선형회귀직선의 부합 정도는 결정계수(Coefficient of determination, R^2)이며, 결정계수가 1에 가까울수록 회귀곡선에 의한 관측 값을 잘 설명할 수 있다(KIGAM, 2011). 본 연구에서는 연 시계열 자료와 5년 이동평균법을 통해 나타난 강수량 자료에 선형회귀분석을 적용하였다.

3.1.2. 비모수적 경향분석 - Mann-Kendall 검정법

Mann-Kendall 검정법은 비모수적 통계방법 중 하나로 Mann(1945)에 의해 제안되었으며, Kendall(1975)의 추가적인 연구를 통해 개선되었다(Yun et al., 2015). Mann-Kendall 검정법은 관측 값의 서열 또는 변동 기울기를 이용하여 경향성을 분석하는 방법으로 아래와 같은 방법을 통해 계산할 수 있다.

$$sgn(X_{i'} - X_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } X_{i'} - X_i > 0 \\ 0 & \text{if } X_{i'} - X_i = 0 \\ -1 & \text{if } X_{i'} - X_i < 0 \end{cases} \quad (1)$$

어떤 시점 $i(1 \leq i \leq n)$ 에서의 관측 값을 X_i 라고 하면 관측 값 X_i 는 n 개가 된다. 여기서, $sgn(X_{i'} - X_i)$ 은 자료간의 차이를 증가(1), 감소(-1), 상등(0)로 표현하여 식 (2)를 통해 추정 통계치 S 를 도출한다.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{i'=i+1}^n sgn(X_{i'} - X_i) \quad (2)$$

추정 통계치에 대한 분산 $VAR(S)$ 은 식 (3)을 이용하여 산정한다. 식 (3)의 q 는 관측 값이 같은 모임의 개수이며 t_p 는 p 번째 모임의 관측 값 개수이다.

$$VAR(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (3)$$

다음으로 식 (4)에 의하여 표준정규변량 Z 를 산정한다. Z 가 양의 값이면 상승추세, 음의 값이면 감소추세, 0이면

추세가 없는 것이다. 본 연구에서는 MAKESENS 프로그램을 이용하여 Mann-Kendall 검정을 수행하였다.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

3.2. 기후변화 시나리오

IPCC 5차 평가 보고서에는 인간 활동이 기후 시스템에 명백한 영향을 미치고 있고, 인위적으로 배출된 온실가스를 주요 원인으로 가장 높게 평가하고 있다(IPCC, 2014). 이에 따라 기후변화를 전망하기 위해 온실가스 농도에 따른 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP) 시나리오를 구성하였다. 기후변화시나리오를 생성하기 위해 여러 가지 실험을 하는데 순서를 요약하자면 제어적분, 과거기후 모사실험, 미래기후변화전망으로 구분할 수 있다. 먼저 제어적분 실험은 1860년의 온실가스 농도로 고정하여 200년 또는 400년 적분하는 실험으로 전지구 기후모델을 준평형상태로 안정화시키고 인위적 강제력이 배제된 모델의 내부변동을 이해하기 위한 실험이다. 이를 통해 대기와 해양의 준평형상태를 산출한다. 과거기후 모사실험은 제어적분을 통해 산출된 대기와 해양의 준평형상태를 초기조건으로 하여 온실가스, 에어로졸, 오존, 태양복사, 화산폭발 등의 대한 강제력으로 1860~2005년간의 과거기후를 재현한다. 미래 기후변화 전망은 과거기후 모사실험의 마지막 상태(2005년)를 초기조건으로 하여 온실가스 농도조건에 따라 미래기후를 산출한다. 또한 제어적분 200년과 400년 중에서 400년의 제어적분을 통해 산출한 결과가 과거기후 모사 성능이 더욱 우수하다(National Institute of Meteorological Sciences, 2012).

본 연구에서는 기상청에서 제공하는 기후변화 시나리오 중 400년 제어적분을 통해 산출된 시나리오 결과의 자료를 사용하였고, 그 중 온실가스 저감정책이 일부 실현되는 경우를 가정한 RCP 4.5(CO₂ 농도가 2100년에 540 ppm까지 증가하는 경우)와 저감정책 없이 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우를 가정한 RCP 8.5(CO₂ 농도가 2100년에 940 ppm까지 증가하는 경우)를 통해 산출된 2021~2100년까지의 자료를 사용하였다. 또한 과거 기간(40년)과 동일하게 기후변화 시나리오의 자료를 전기(2021~2060년), 후기(2061~2100년)로 40년씩 구분하여 연구를 진행하였다.

Table 2. The classifications of drought intensity by SPI and EDI

SPI, EDI	Classifications
0 ~ -0.99	Normal
-1.0 ~ -1.5	Moderate dry
-1.5 ~ -2.0	Severe dry
< -2.0	Extreme dry

3.3. 표준강수지수(SPI)

표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)는 강수량 자료만을 가지고 월별, 연별 가뭄을 평가할 수 있는 대표적인 가뭄 평가지수이다(Mckee et al., 1993). SPI를 산정하기 위해 먼저 산정할 SPI의 시간척도(1개월, 3개월, ..., 12개월 등)를 결정하고, 결정된 시간척도에 대한 누적 강수량 시계열 자료를 구성한다. 이 시계열을 월별로 분석하여 Gamma 분포를 활용해 누적 확률분포 값으로 변환한다. 이후 표준정규분포에 적용시켜 표준강수지수를 산정하게 된다. 가뭄지수 범위에 따른 가뭄정도는 Table 2에 나타내었다. 본 연구에서는 SPI Generator 프로그램을 이용하여 단기가뭄을 나타낼 수 있는 SPI 3과 장기가뭄을 나타낼 수 있는 SPI 12를 통해 가뭄을 분석하였다.

3.4. 유효가뭄지수(EDI)

Byun and Wilhite(1999)는 강수로 인해 발생하는 가용수자원으로부터 시간의 지남에 따라 늘어나는 유출 및 증발에 의한 손실을 고려하면서 일 년 이상의 기간 동안 누적하여 평년치와 비교하여 일별 가뭄정도를 계산할 수 있는 유효가뭄지수(Effective Drought Index, EDI)를 개발하였다.

$$EP_i = \sum_{n=i}^i \left[\left\{ \sum_{m=1}^n P_m \right\} / n \right] \tag{5}$$

$$DEP = EP - MEP \tag{6}$$

$$EDI = DEP / ST(DEP) \tag{7}$$

여기서, 식 (5)의 EP(Effective Precipitation)는 특정일로부터 *i*일 동안의 누적 유효강수량을 의미하며, *P_m*은 특정일로부터 *m*일 전의 일강수량을 나타낸다. *n*은 강수량 합산 기간을 나타내며, 최소 365일 이상의 값을 가지고, 본 연구에서는 *i*를 365로 하였다. 식 (6)을 통해서 EP의 기후학적 평균 강수량(Mean of Effective Precipitation, MEP)과 편차 값(Deviation of Effective Precipitation, DEP)을 계산할 수 있으며, 이는 어떤 특정기간과 공간에

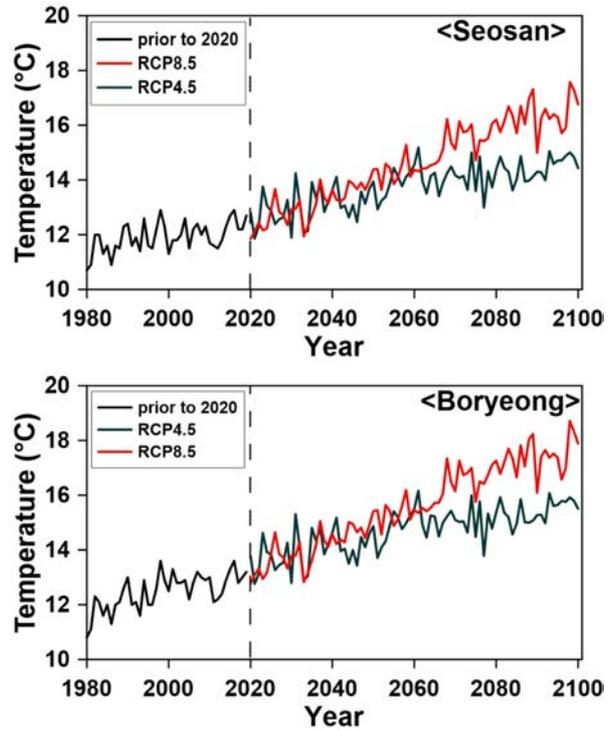


Fig. 2. The temperature variation according to the past and the RCP scenarios.

서의 물 잉여와 부족을 의미한다. 이후 DEP의 표준편차(ST)를 식 (7)을 이용하여 EDI 값으로 표준화되어 산정된다. 유효가뭄지수(EDI)에 따른 가뭄정도는 Table 2에 나타내었다.

4. 결과 및 토의

4.1. 온도 및 강수량 추이

4.1.1. 온도

서산과 보령의 온도는 Fig. 2와 같은 경향성을 나타내었다. 과거의 경우, 1980년부터 2019년 동안 서산은 0.24°C/10년, 보령은 0.38°C/10년으로 상승해왔다. 기후변화시나리오(RCP)에 따른 온도 추이는 RCP 4.5의 경우 서산은 0.27°C/10년, 보령은 0.27°C/10년이며, RCP 8.5의 경우 서산은 0.59°C/10년, 보령은 0.61°C/10년이다. 전반적으로 RCP 8.5의 경우가 RCP 4.5보다 온도 상승 추이가 더욱 큰 것을 볼 수 있다.

4.1.2. 강수량

강수량 분석을 위해 연 시계열 강수량 자료와 5년 이동평균법을 통해 나타난 강수량에 대하여 선형회귀분석을 적용하였고, 연 시계열 강수량 자료에 Mann-Kendall 방

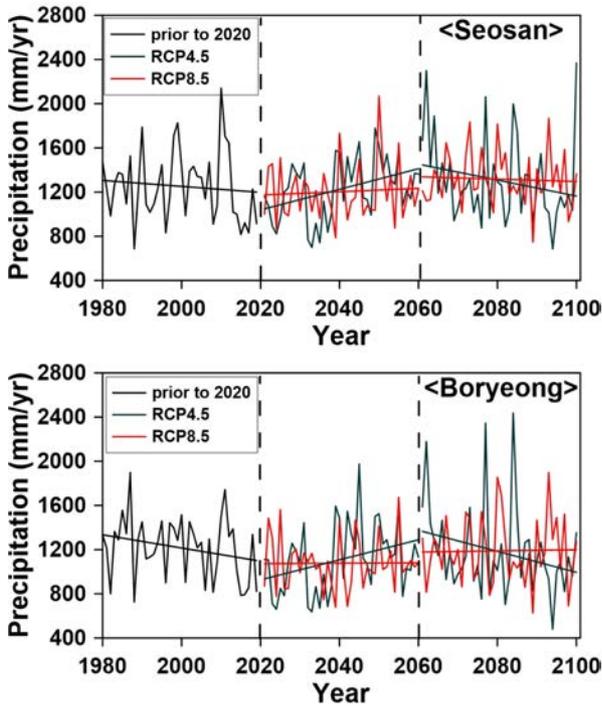


Fig. 3. The precipitation variation according to the past and the RCP scenarios.

법을 적용하였다. Fig. 3은 강수량의 연 시계열 자료를 그림으로 나타낸 것이고, Table 3(a)는 강수량의 평균 및 경향성을 분석한 자료이다. 연평균강수량의 경우, 과거 서산은 1,253 mm/년, 보령은 1,218 mm/년이다. 기후변화 시나리오에 따른 강수량 자료는 서산의 경우 대체로 과거와 비슷한 연평균강수량을 나타내었다. 보령의 경우 RCP 8.5 전기에 1,077 mm/년으로 제일 낮은 연평균강수량을 보였고, 그 외 나머지는 과거의 경우와 비슷한 평균을 이루었다. 강수량 경향성을 보면 과거의 경우, 서산은 -2.70 mm/년, 보령은 -5.97 mm/년으로 감소추세를 보였다. 기후변화시나리오에 따른 강수량은 RCP 4.5의 경우 서산과 보령 차례대로 전기는 9.32 mm/년, 9.06 mm/년, 후기는 -7.22 mm/년, -9.52 mm/년으로 두 지역 모두 전기에는 증가 추세를 보이고 후기에는 감소추세를 보였다. RCP 8.5의 경우 서산과 보령 차례대로 전기는 1.52 mm/년, 0.17 mm/년, 후기는 -1.11 mm/년, 0.52 mm/년으로 RCP 4.5와 비교했을 때 변동성이 미비했다.

다음으로 Table 4는 5년 이동평균법을 통해 나타낸 강수량의 평균 및 경향성을 분석한 결과이다. 연평균강수량의 경우, 연 시계열 자료의 결과와 비슷하였고, 마찬가지로

Table 3. The precipitation trend according to the past and the RCP scenarios from annual time series data

(a) Linear regression					
Seosan	Past (1980~2019)	Future			
		Early(2021~2060)		Late(2061~2100)	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Trend (mm/year)	-2.70	+9.32	+1.52	-7.22	-1.11
*Avg. (mm/year)	1,253	1,130	1,204	1,305	1,317
Boryeong	Past (1980~2019)	Future			
		Early (2021~2060)		Late (2061~2100)	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Trend (mm/year)	-5.97	+9.06	+0.17	-9.52	+0.52
*Avg. (mm/year)	1,218	1,112	1,077	1,180	1,189

*Avg. : Average

(b) Mann-Kendall test

Seosan	Past (1980~2019)	Future			
		Early (2021~2060)		Late (2061~2100)	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
*Trend	No trend	Up	No trend	No trend	No trend
Boryeong	Past (1980~2019)	Future			
		Early (2021~2060)		Late (2061~2100)	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
*Trend	No trend	Up	No trend	No trend	No trend

* Statistical analysis in 95% confidence interval

Table 4. The precipitation trend according to the past and the RCP scenarios from 5 year moving average

Seosan	Past (1980~2019)	Future			
		Early (2021~2060)		Late (2061~2100)	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Trend (mm/year)	+0.063	+10.45	+2.78	-7.33	-1.81
Avg. (mm/year)	1,271	1,241	1,204	1,255	1,332

Boryeong	Past (1980~2019)	Future			
		Early (2021~2060)		Late (2061~2100)	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Trend (mm/year)	-5.72	+11.52	+1.46	-7.04	+1.08
Avg. (mm/year)	1,238	1,124	1,072	1,151	1,199

로 보령 RCP 8.5 전기의 연평균강수량이 1,072 mm으로 제일 낮은 값을 나타내었다. 강수량의 경향성을 살펴보면 5년 이동평균법을 통해 나타난 선형회귀분석의 경우 과거 서산의 경우를 제외하고 연 시계열 자료의 선형회귀분석과 비슷한 경향성을 보여주었다. 하지만 두 분석 결과 모두 결정계수(R²)가 0.5 미만으로 완전히 신뢰하기에는 한계를 보여주었다. 반면 Mann-Kendall 검정법을 통해 분석한 결과, 95%의 신뢰수준으로 RCP 4.5 초기의 경우만 상승 경향성을 나타내었고, 나머지는 무경향성을 나타내었다(Table 3(b)).

4.2. 과거 SPI 3, 12 및 EDI

각 지역에 대하여 SPI 3, SPI 12, EDI를 통해 1980~2019년의 가뭄 분석을 수행하였고 가뭄 평가방법들 간의 비교 및 검증에 위해 최근 가뭄이 발생한 2012~2017년까지의 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 가뭄 평가 방법들의 검증을 위해 Table 1의 가뭄 기간과의 비교를 하였고 그 결과는 Table 5와 같다. EDI의 경우 일자별 가뭄을 평가하기에 월 중 가장 극심했던 가뭄지수를 대푯값으로 사용하였다.

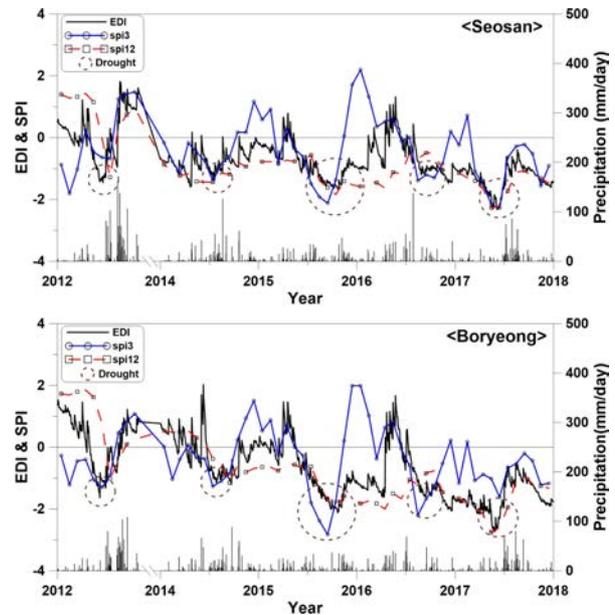


Fig. 4. The time-series of EDI and SPI 3, SPI 12 from 2012 to 2017.

2012년도 5, 6월의 경우 단기가뭄으로써 EDI는 가뭄을 잘 반영하였고, SPI 3은 보령에서만 가뭄을 잘 반영하였

Table 5. The comparisons between drought and each drought index from 2013 to 2017 according to the EDI and SPI 3, SPI 12

Period	Location	EDI	SPI 3	SPI 12	Location	EDI	SPI3	SPI 12
2012-05		-1.03	-0.47	1.15		-1.25	-1.06	1.62
2012-06		-1.46	-0.64	-0.03		-1.64	-1.3	0.77
2014-07		-1.37	-1.41	-1.44		-1.14	-1.27	-0.38
2015-07		-1.26	-1.49	-0.57		-1.27	-1.8	-0.63
2015-08		-1.5	-1.92	-1.39		-1.66	-2.38	-1.25
2015-09	Seosan	-1.57	-2.12	-1.62	Boryeong	-2.01	-2.83	-1.7
2015-11		-1.54	0.05	-1.41		-1.96	0.2	-1.58
2016-08		-1.2	-1.39	-0.69		-1.46	-2.21	-1.21
2016-09		-1.19	-1.2	-0.49		-1.59	-1.67	-0.84
2017-06		-2.33	-2.28	-2.21		-2.66	-1.62	-2.59
2017-07		-1.63	-0.64	-1.72		-1.81	-0.67	-1.95

다. 반면, SPI 12의 경우 가뭄으로 인식하지 못하였다. 2014년 7월의 경우 보령의 SPI 12를 제외하곤 EDI 와 SPI 3은 가뭄을 잘 반영하였다. 2015년 7~11월은 가뭄에 의한 피해를 지속적으로 받는 시기로 EDI의 경우 가뭄을

잘 나타내었고 SPI 3은 11월의 가뭄을 잘 반영하지 못하였다. SPI 12의 경우 8월부터 가뭄을 잘 나타내었다. 2016년 8, 9월은 EDI, SPI 3, SPI 12 모두 가뭄을 잘 나타내었지만, SPI 12의 경우는 EDI와 SPI 3에 비해 다

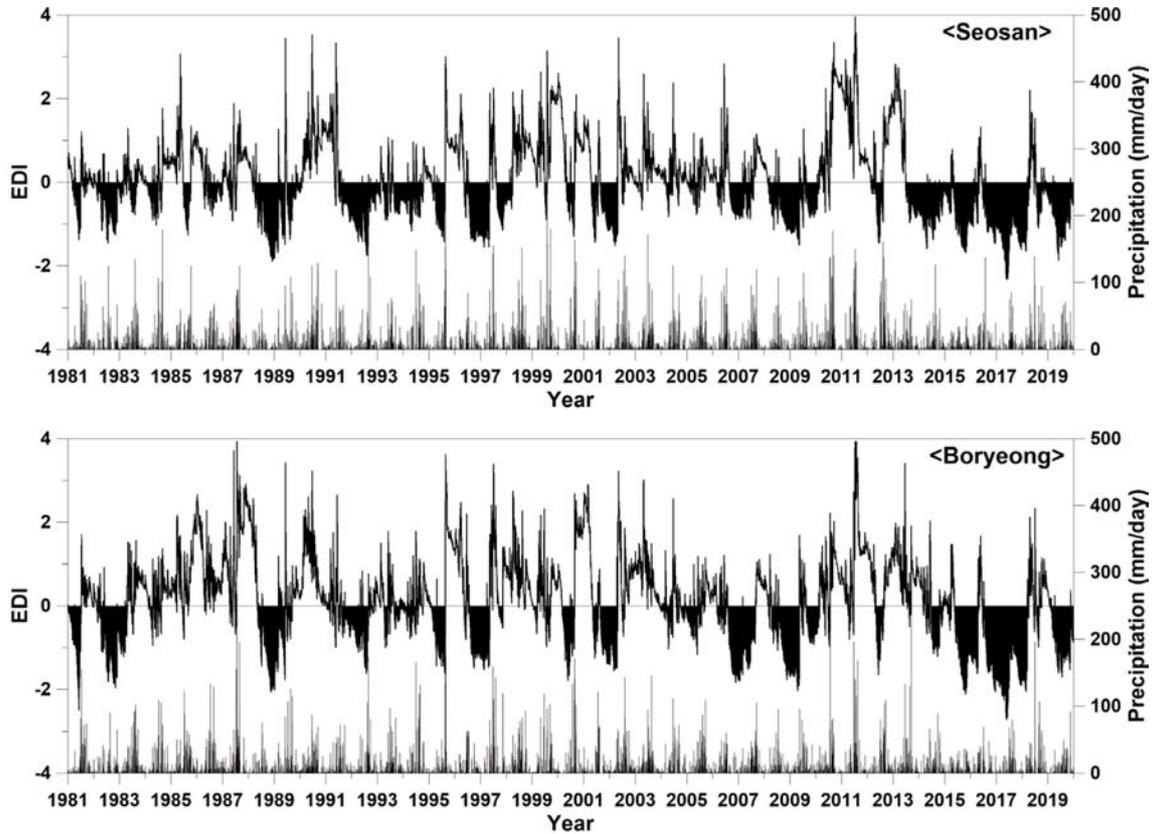


Fig. 5. The time-series of EDI from 1981 to 2019.

Table 6. Drought frequency trend according to drought intensity

(a) EDI < 0				
		Period	Seosan	Boryeong
		Past (1980~2019)	7,972	6,707
Future	Early (2021~2060)	RCP 4.5	8,066	8,606
		RCP 8.5	8,574	7,682
	Late (2061~2100)	RCP 4.5	7,702	7,971
		RCP 8.5	7,828	7,945
(b) EDI < -1				
		Period	Seosan	Boryeong
		Past (1980~2019)	2,016	2,533
Future	Early (2021~2060)	RCP 4.5	2,631	2,778
		RCP 8.5	1,719	2,115
	Late (2061~2100)	RCP 4.5	1,487	1,155
		RCP 8.5	1,849	1,954

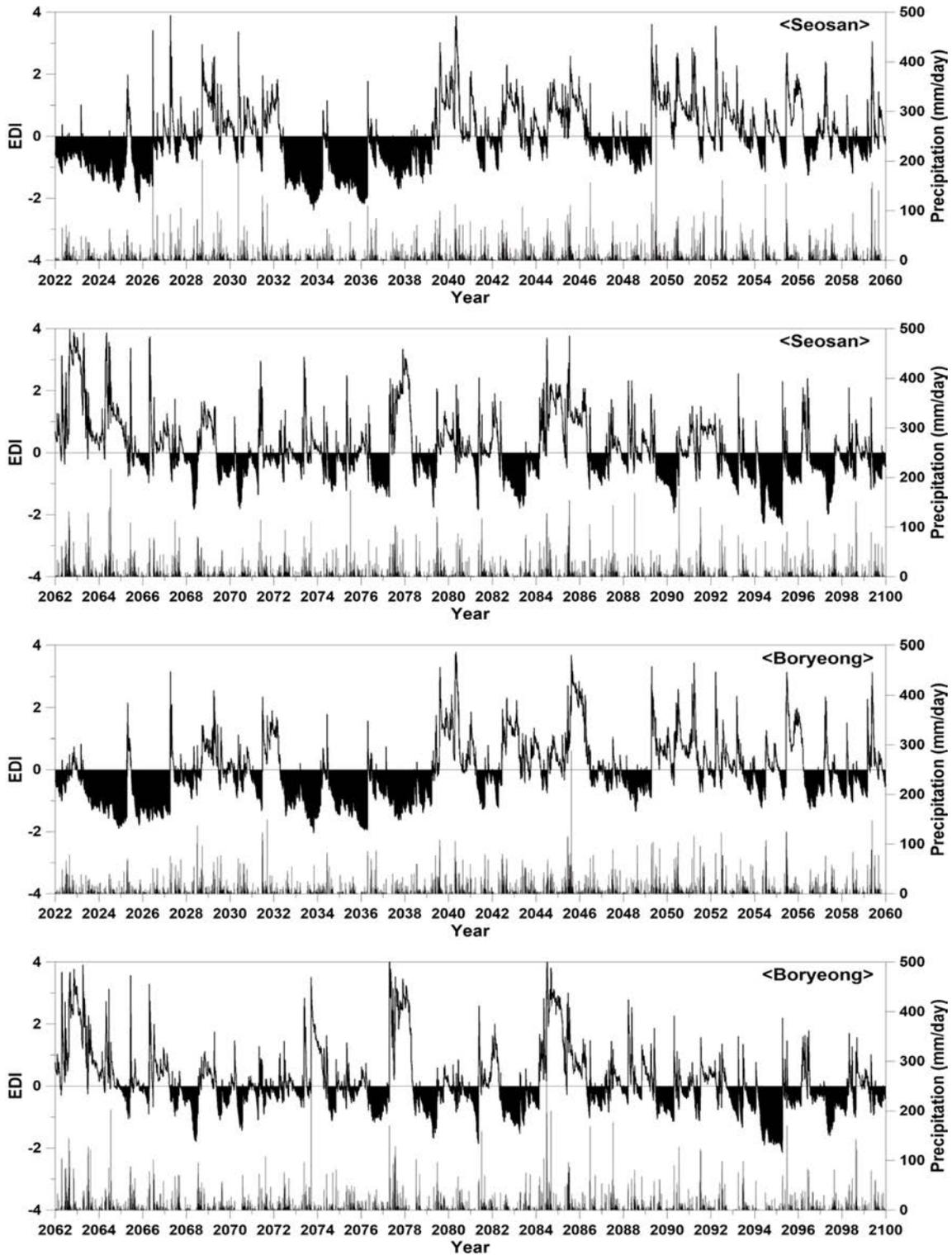


Fig. 6. The time-series of EDI from RCP 4.5.

소 약한 가뭄으로 인식하였다. 2017년 6, 7월의 경우 EDI와 SPI 12는 가뭄을 잘 반영하였으나 SPI 3은 7월

가뭄을 제대로 반영하지 못하였다.

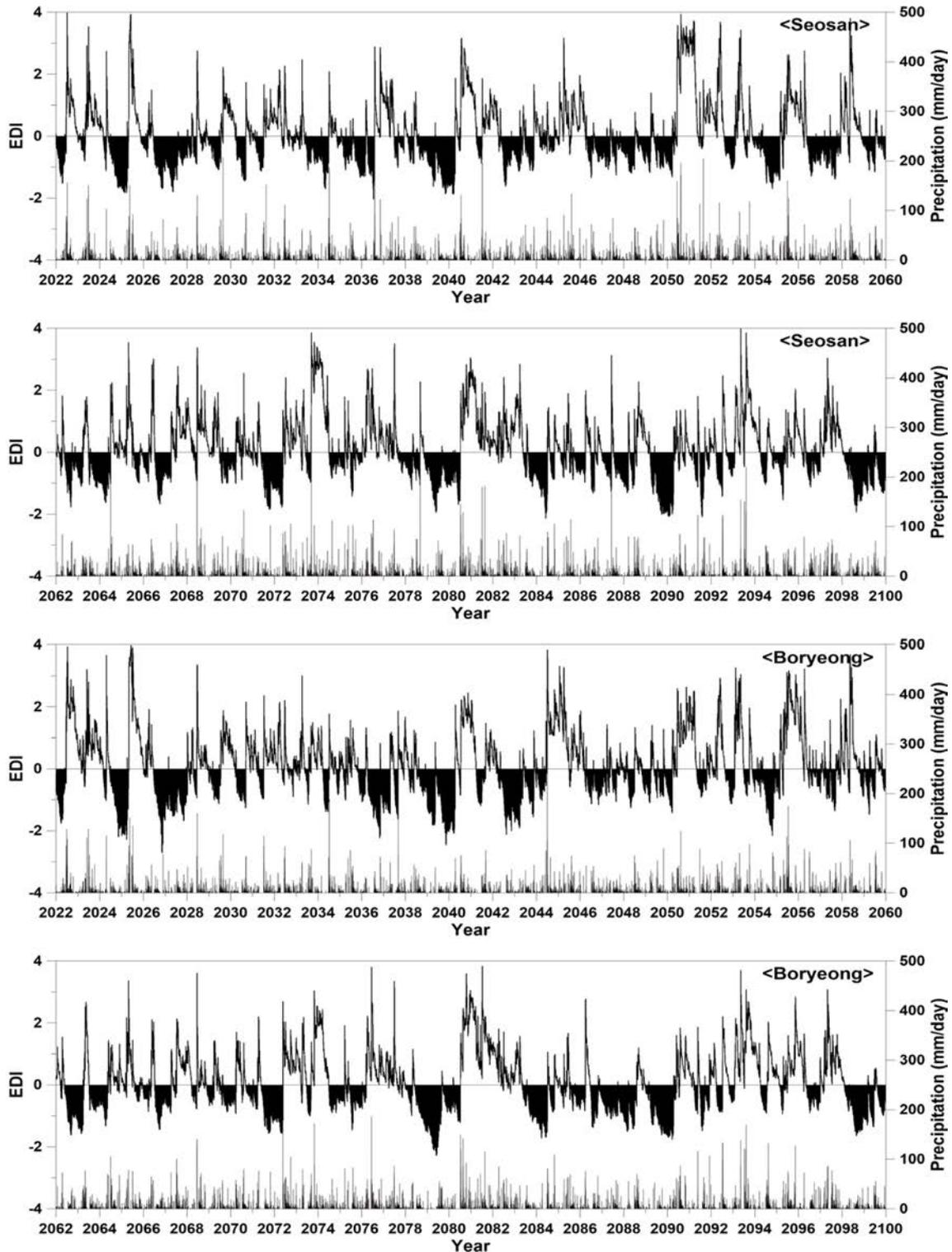


Fig. 7. The time-series of EDI from RCP 8.5.

4.3. 기후변화시나리오에 따른 가뭄 평가

과거의 가뭄과 EDI, SPI 3, SPI 12를 비교해 본 결과, EDI가 SPI 3이나 SPI 12보다 가뭄을 더 잘 평가해 주는

것으로 판단되어 이후 EDI를 중심으로 가뭄을 분석하였다. Fig. 5는 EDI를 통해 나타낸 과거 가뭄 분석 결과이고, Fig. 6과 Fig. 7은 기후변화시나리오에 따른 미래의

가뭄 분석 결과이다. 또한 가뭄강도에 따른 빈도를 ‘가뭄 자체’(EDI<0)를 의미하는 경우와 ‘보통 가뭄 이상’(EDI < -1)으로 구분하여 나타내었다(Table 6).

RCP 4.5 전기의 경우 두 지역 모두 가뭄강도에 따른 빈도수가 과거에 비해 높은 것으로 보아 가뭄의 빈도와 강도가 더욱 심해질 것으로 예측된다. 서산의 경우 Table 6(a)의 빈도수는 차이가 크지 않지만, Table 6(b)의 보통 가뭄 이상의 빈도수 차이는 상대적으로 큰 것으로 보아 과거에 비해 강도가 더 큰 가뭄이 올 것으로 추정된다. 보령의 경우 Table 6(a)의 차이가 과거와 월등히 나는 것으로 보아 가뭄강도 뿐만 아니라 가뭄의 빈도도 더욱 증가할 것으로 추정된다. 이러한 가뭄은 Fig. 5, 6을 보았을 때 과거에 비해 2022~2026년과 2032~2039년에 강도가 큰 장기가뭄이 일어날 것이고 그 이후에는 단기가뭄이 주를 이룰 것으로 예측된다. RCP 4.5 후기의 경우 서산은 가뭄의 빈도수와 강도가 과거에 비해 줄어든 것이다. 보령은 가뭄의 빈도는 많아지나 가뭄의 강도는 과거에 비해 월등히 완화될 것으로 분석되었다. 이러한 가뭄은 Fig. 5, 6을 보았을 때 전체적으로는 과거에 비해 가뭄이 줄어들지만 2090년대에는 가뭄이 심해질 것으로 예측되었다.

RCP 8.5 전기의 경우 두 지역 모두 과거와 비교하여 가뭄의 빈도는 늘어나지만 가뭄의 강도는 줄어들 것으로 예측된다. RCP 8.5 후기의 경우 서산은 과거에 비해 빈도가 줄어들고 강도가 완화될 것이고, 보령은 가뭄의 빈도는 늘어나지만 가뭄의 강도는 완화될 것으로 예측된다.

4.4. 가뭄강도에 따른 계절별 가뭄빈도 분석

가뭄강도에 따른 계절별 가뭄빈도를 정량적으로 평가하기 위해 계절별로(봄(3~5월), 여름(6~8월), 가을(9~11월), 겨울(12~2월)) -1이하인 ‘보통 가뭄’, -1.5이하인 ‘심한 가뭄’, -2이하인 ‘극한 가뭄’에 따라 EDI를 분류하였다(Table 7).

계절별로는 서산의 경우 과거 여름과 겨울철 가뭄의 빈도가 가장 컸고, RCP 4.5 전기는 전체적으로 계절별 빈도수가 가장 크게 나타났으며 그 중에서도 가을철 가뭄의 빈도가 가장 크게 나타났다. RCP 4.5 후기는 봄 가뭄, RCP 8.5 전기는 봄 가뭄, RCP 8.5 후기는 여름 가뭄의 빈도가 가장 크게 나타났다. 보령의 경우는 과거 가을철 가뭄의 빈도가 가장 컸고, 서산과 마찬가지로 RCP 4.5 전기에서 계절별 빈도수가 가장 크며 전기는 가을 가뭄의

Table 7. Seasonal drought frequency trend according to drought intensity

(a) Past (1980~2019)									
Index	Past (1980~2019)				Index	Past (1980~2019)			
	Spring	Summer	Fall	Winter		Spring	Summer	Fall	Winter
-1	397	465	408	448	-1	333	409	479	309
-1.5	58	45	80	86	-1.5	142	82	300	364
-2	10	19	0	0	-2	52	27	21	15
Sum	465	529	488	534	Sum	527	518	800	688

(b) Early future (2021~2060) under RCP 4.5 scenario									
Seosan		Future (2021~2060)			Boryeong		Future (2021~2060)		
Index	Spring	Summer	Fall	Winter	Index	Spring	Summer	Fall	Winter
-1	465	378	423	371	-1	493	578	560	466
-1.5	129	167	283	188	-1.5	115	59	298	206
-2	10	3	98	116	-2	0	0	3	0
Sum	604	548	804	675	Sum	608	637	861	672

(c) Early future (2021~2060) under RCP 8.5 scenario									
Seosan		Future (2021~2060)			Boryeong		Future (2021~2060)		
Index	Spring	Summer	Fall	Winter	Index	Spring	Summer	Fall	Winter
-1	414	371	258	248	-1	374	343	328	276
-1.5	99	20	146	161	-1.5	155	41	264	203
-2	0	2	0	0	-2	18	2	68	43
Sum	513	393	404	409	Sum	547	386	660	522

(d) Late future (2061~2100) under RCP 4.5 scenario

Seosan		Future (2061~2100)				Boryeong		Future (2061~2100)			
Index	Spring	Summer	Fall	Winter	Index	Spring	Summer	Fall	Winter		
-1	287	234	169	261	-1	293	305	69	102		
-1.5	212	81	91	51	-1.5	122	69	91	90		
-2	50	12	0	39	-2	14	0	0	0		
Sum	549	327	260	351	Sum	429	374	160	192		

(e) Late future (2061~2100) under RCP 8.5 scenario

Seosan		Future (2061~2100)				Boryeong		Future (2061~2100)			
Index	Spring	Summer	Fall	Winter	Index	Spring	Summer	Fall	Winter		
-1	355	406	268	303	-1	315	415	368	455		
-1.5	130	117	178	63	-1.5	129	52	87	90		
-2	0	7	2	20	-2	29	14	0	0		
Sum	485	530	448	386	Sum	473	481	455	545		

빈도가 가장 크게 나타났다. RCP 4.5 후기는 봄 가뭄, RCP 8.5 전기는 가을 가뭄의 빈도가 가장 크게 나타났다. RCP 8.5 후기의 경우 가뭄빈도는 겨울 가뭄의 영향이 가장 크나, 가뭄강도와 비교하여 볼 때 봄과 여름 가뭄의 영향이 가장 크게 나타났다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 충남 서부지역의 서산과 보령을 대상으로 과거의 가뭄을 기존의 가뭄사례와 비교 및 평가하고, 기후변화시나리오에 따른 미래의 가뭄을 예측하고자 하였다. 두 지역 모두 지난 1980~2019년 동안 온도가 증가해왔고 기후변화시나리오에 따른 온도 또한 과거와 마찬가지로 지속적으로 증가하는 것으로 예측되었다. 다만, RCP 8.5의 증가 폭은 RCP 4.5에 비해 더욱 크게 나타났다. 강수량의 경우, 선형회귀분석과 Mann-Kendall 검정법을 종합적으로 평가한 결과, RCP 4.5 전기의 경우만 상승 경향성을 보여주었고, 그 외의 경우에는 약한 경향성 혹은 경향성을 나타내지 않았다.

과거의 가뭄을 평가하기 위해 과거 가뭄사례와 SPI 3, SPI 12, EDI를 각각 검증 및 비교한 결과, EDI가 과거 가뭄을 가장 잘 반영해주었다. 또한 기후변화시나리오에 따른 가뭄을 EDI를 통해 분석한 결과, 두 지역 모두 RCP 4.5 전기의 경우 과거보다 가뭄의 빈도와 강도가 심해질 것이고, 특히 2022~2026년과 2032~2039년에 강한 장기가뭄이 일어날 것으로 예측되었다. RCP 4.5 후기의 경우 과거에 비해 가뭄이 줄어들 것으로 예측되지만, 2090년대에는 심한 가뭄이 올 것으로 예측된다. RCP 8.5 전기의 경우 과거에 비교하여 가뭄은 늘어나지만 가뭄에

따른 가뭄의 강도는 완화될 것으로 예측된다. RCP 8.5 후기의 경우 지역 간의 가뭄빈도의 차이는 있지만 두 지역 모두 과거에 비해 가뭄의 강도가 완화될 것으로 예측된다. 다음으로 가뭄의 강도에 따른 빈도를 계절별로 평가한 결과, 서산과 보령 공통적으로 RCP 4.5 전기는 가을철 가뭄의 영향, RCP 4.5 후기는 봄철 가뭄의 영향이 가장 많이 받을 것으로 예측되었다. RCP 8.5의 경우는 지역에 따라 계절별 영향이 서로 상이하고 명확히 구분하기 어려웠다.

이러한 결과는 사용된 기후변화시나리오가 다소 상이한 하나(제어적분 200 또는 400) Lee(2016)의 미래로 갈수록 장기간 가뭄이 늘어날 것이라는 예측과는 다르게, 미래 기후변화에 따른 가뭄이 과거와 마찬가지로 일정한 경향성을 나타내지 않고 지속적으로 발생할 수 있음을 시사하였다. 또한 RCP 4.5 전기의 경우에는 장기가뭄이 발생하고 가뭄이 가을철에 가장 심할 것으로 예측됨에 따라 수자원 확보를 위한 연구개발과 수자원 시설 확충 등 가뭄 대응 방안을 마련해야 할 것이다. 특히, 지역별 다양한 가뭄 평가와 비교를 통해 그 지역에 적합한 가뭄 대응 기술을 개발할 필요가 있다. 또한, 최근 SSP(Shared Socioeconomic Pathways, 공동사회 경제경로)에 의한 기후변화 시나리오가 발표되었는데, 이와 같이 바뀌는 기후변화 시나리오에 따른 수자원의 영향 평가와 모니터링도 같이 수반되어야 한다.

사 사

본 연구는 환경부의 2020년 수요대응형 물공급 서비스 사업의 지원으로 수행되었습니다. 그리고 EDI 분석 프로

그램을 제공해주신 부산대학교 변희룡 교수님께 감사드립니다.

References

- Byun, H.R. and Wilhite, D.A., 1999, Objective quantification of drought severity and duration, *J. Clim.*, **12**(9), 2747-2756.
- Choi, J.H. and Shim, M.P., 2000, Classification and socio-economic effects of drought, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **33**(3), 90-96.
- Choi, Y.J., 1995, Causes and prediction of drought, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **28**(1), 16-20.
- Gibbs, W.J. and Maher, J.V., 1967, Rainfall deciles as drought indicators, Bureau of Meteorology, Australia, 48, 33 p.
- Gwak, Y.S., Cho, J.P., Jung, I.G., Kim, D.W. and Jang, S.M., 2018, Projection of future changes in drought characteristics in Korea peninsula using effective drought index, *J. Climate Change Res.*, **9**(1), 31-45.
- 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 [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland 151 p.
- Kendall, M.G., 1975, Rank correlation methods, Charles Griffin, London, 202 p.
- KIGAM, 2011, Assessment of sustainable groundwater availability and development of high value added groundwater in Jeju Island, 591 p.
- Kim, B.S., Sung, J.H., Lee, B.H. and Kim, D.J., 2013, Evaluation on the impact of extreme droughts in South Korea using the SPEI and RCP 8.5 climate change scenario, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, **13**(2), 97-109.
- Kim, C.Y., 2001, A study on the decision-making for drought management using the drought indices, M.A. degree. Thesis, Inha University, Incheon, 75 p.
- Kim, D.J. and Jin, I.Y., 2015, An outlook of agricultural drought in Jeonju area under the RCP 8.5 projected climate condition, *KJAFM*, **17**(4), 275-280.
- Kim, D.W., Byun, H.R. and Choi, K.S., 2009, Evaluation, modification, and application of the effective drought index to 200-year drought climatology of Seoul, Korea, *J. Hydrol.*, **378**(1-2), 1-12.
- Kim, G.S. and Lee, J.W., 2011, Evaluation of drought indices using the drought records, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **44**(8), 639-652.
- Kim, H.Y., 1995, Analysis on the definition and characteristics of drought in Korea, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, **43**(5), 23-32.
- Korea Meteorological Administration, 2018, Analysis of climate change forecasts on the Korean Peninsula, 172 p.
- Korea Meteorological Administration, 2020, Climate Data (1980~2019), <http://data.kma.go.kr>. (Cited 3 April 2020)
- Korea Meteorological Administration, 2020, Representative Concentration Pathway Data (2020~2019), <http://www.climate.go.kr>. (Cited 3 April 2020)
- Kwak, J.W., Kim, S.J., Jung, J.W., Singh, V.P., Lee, D.R. and Kim, H.S., 2016, Assessment of meteorological drought in Korea under climate change, *Advances in Meteorology*, 1-13.
- Kwon, H.J., Park, H.J., Hong, D.O. and Kim, S.J., 2006, A study on semi-distributed hydrologic drought assessment modifying SWSI, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **39**(8), 645-658.
- Lee, S.S., 2016, Drought analysis according to the climate change scenario in South Chungcheong Province, ChungNam Institute, 71 p.
- MAKESENS, <https://en.ilmati.tieteentilaitos.fi/makesens>.
- Mann, H., 1945, Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, **13**(3), 245-259.
- Mckee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J., 1993, The relationship of drought frequency and duration to time scales, Eighth Conference on Applied Climatology, 17-22.
- Ministry of the Interior and Safety, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Ministry of Environment, Korea Meteorological Administration, National Disaster Management Research Institute, Han River Flood Control Office, Korea Rural Community Corporation, K-water, 2020, 2018 National Drought Information Statistics, 365 p.
- National Institute of Meteorological Sciences, 2012, Global climate change report 2012, Jeju Island, 100 p.
- Palmer, W. C., 1965, Meteorological drought, U.S. Weather Bureau, 45, 1-58.
- Park, K.W., Kim, J.T., Ju, U.J. and Lee, Y.J., 2006, Application of drought indices for agricultural drought evaluation, *Korean National Committee on Irrigation and Drainage*, **13**(1), 72-81.
- Park, M.W., Lee, O.J., Park, Y.K. and Kim, S.D., 2015, Future drought projection in Korea under AR5 RCP climate change scenarios, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, **15**(6), 423-433.
- Ryu, J.H., Lee, D.R., Ahn, J.H. and Yoon, Y.N., 2002, A comparative study on the drought indices for drought evaluation, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **35**(4), 397-410.
- Shafer, B.A. and Dezman, L.E., 1982, Proc. Western snow conference, 164-175.

SPI Generator, <https://drought.unl.edu/droughtmonitoring/SPI/SPIProgram.aspx>.

Wilhite, D.A. and Glantz, M.H., 1985, Understanding the drought phenomenon: The role of definitions, *Journal of Water International*, **10**(3), 111-120.

Yun, J.H., Hwang, S.W., Kim, D.H. and Kim, S.M., 2015, Trend analysis of monthly water quality data in Nakdong river based on seasonal Mann-Kendall test, *J. Korean Soc. Agric. Eng.*, **57**(6), 153-162.