

ORIGINAL ARTICLE

미래 기후변화에 따른 제주도의 사면과 해발고도별 가뭄 예측

박종철 · 최광준¹⁾ · 송성호¹⁾*

공주대학교 지리정보과학연구소, ¹⁾한국농어촌공사 농어촌연구원

Prediction of Regional Drought considering Aspect and Elevation in Jeju Island under Future Climate Change

Jong-Chul Park, Kwang-Jun Choi¹⁾, Sung-Ho Song¹⁾*

Institute of Geographic Information Science, Kongju National University, Gongju 314-701, Korea

¹⁾*Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Ansan 426-170, Korea*

Abstract

Spatial and temporal patterns of precipitation and temperature occur with regard to aspect and elevation of Mt. Halla in Jeju Island. Therefore, there is a need to predict regional drought associate with them to mitigate of impacts of drought. In this study, regional drought is predicted based on Palmer drought severity index (PDSI) and standardized precipitation index (SPI) using future (2015~2044) climate change scenario RCP (representative concentration pathways) 4.5 classified as 24 regions according to aspect and elevation. The results show that number and duration of drought will be decrease in Jeju Island. However, severity of severe drought will be increase in western and northern aspect with under 200 meters above mean sea level. These findings provide primary information for developing the proactive strategies to mitigate impacts of drought by future climate change in Jeju Island.

Key words : Jeju, Climate change, Drought, SPI, PDSI, Duration, Severity

1. 서론

일반적인 자연재해 중에서 가뭄은 홍수에 비해 점진적이고 예측 가능하지만 발생 시에는 그 피해 범위가 광범위하다(Lee 등, 2013). 가뭄의 영향은 1차적으로 농작물 생산량 감소, 식수 및 생활용수 확보의 어려움, 저수지 고갈 등으로 나타나고 2차적으로는 농가의 자산 또는 토지의 매도 압력, 이주, 물리적 또는 심리적인 스트레스 등 사회적 영향으로 나타난다(Ribot, 1996). 따라서 가뭄 피해를 최소화하기 위해서는 미래 가뭄을 예측하고 대처 계획을 수립하는 것이 매우 중

요하다.

제주도는 수자원의 98% 이상을 지하수에 의존하기 때문에 기후변화에 따른 가뭄과 그 영향에 대해 지속적인 관심과 연구가 필요한 지역들 중 하나이다(Song과 Choi, 2012). IPCC(2007)과 Bates 등(2008)에 의하면 수자원의 대부분을 지하수에 의존하는 지역의 수자원은 기후변화에 특히 취약하다. 일반적으로 기후변화에 의해 발생하는 기상학적 가뭄은 토양함수량을 감소시켜 농업적 가뭄으로 이어지고, 물수지를 악화시켜 수문학적 가뭄으로 이어질 수 있으며, 이는 사회·경제적 가뭄을 유발할 수 있다. 따라서 제

Received 27 January, 2014; Revised 9 April, 2014;

Accepted 10 April, 2014

*Corresponding author : Sung-Ho Song, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Ansan 426-170, Korea
Phone: +82-31-400-1723
E-mail: shsong84@hanmail.net

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

주도에서는 수자원이 기후변화에 취약하므로 가뭄의 연쇄적 발생을 방지하기 위해 적절한 적응계획의 수립이 요구되고 있다.

제주도는 사면과 해발고도에 따라 강수량과 기온이 매우 다양한 분포를 나타내는 지역으로, 연강수량은 해발고도 상승에 따라 약 242 mm/100 m 증가한다(Choi, 2013). 특히 한라산 사면을 따라 반시계 방향으로 상승하는 저기압의 흐름과 관련하여 남서 또는 북서사면 보다는 남동 또는 북동사면에 강수량이 많다. Song과 Choi(2012)에 의하면 제주도에서 월강수량의 경년변화는 미래에 더욱 심화되고 특히 서부지역에서 강하게 나타날 것으로 예상되었다. Choi(2011)에 의하면 제주도에서 기온감률은 사면방향과 고도에 따라 다양하지만 해안~중산간 지역에서 최대 0.19°C/100 m를 나타낸다. 따라서 다양한 기후 특성을 보이는 제주도에 적절히 가뭄 대처 계획을 수립하기 위해서는 가뭄 발생의 지역적인 차이를 이해하는 것이 선행되어야 한다.

Knutson 등(1998)은 가뭄에 적절하게 대처하기 위해서는 각 지역에서 발생하는 가뭄과 그로 인한 잠재적 영향에 대한 이해의 필요성을 지적한 바 있다. 그러나 기존에 제주도의 가뭄을 언급한 연구들은 주로 남한 전체를 연구지역으로 하며, 제주도를 연구지역의 일부로 다루고 있었다(Kwon과 Moon, 2005; Lee 등, 2012). 이에 따라 제주도에 가뭄의 지역적인 차이를 다루는데 한계가 있었다. 다만 최근 Song 등(2013)은 제주도를 3개 권역으로 구분하여 미래에 기상학적 가뭄지수 변화를 분석하고 비교한 바 있다. 이들은 기상학적 가뭄지수의 분석 결과를 토대로 제주도의 북부와 서부권역이 남부 권역에 비해 가뭄이 상대적으로 심해질 수 있다고 제시하였다. 그러나 여전히 제주도의 가뭄을 지역별로 살펴본 연구는 매우 부족한 실정이다. 아울러 해발고도를 고려하여 미래 가뭄을 연구한 사례는 찾아보기 어렵다.

해발고도를 고려하여 제주도의 미래 가뭄을 연구한 사례를 찾아보기 어려운 이유 중 하나는 사용 가능한 미래 기후자료의 공간해상도의 제약이라고 할 수 있다. Song 등(2013)은 미래 기후예측 자료로 기상청의 기후변화정보센터(<http://www.climate.go.kr>, 2014, 이하 CCIC)에서 생산한, 공간해상도가 10×10 km인

자료를 활용하였다. 이 해상도의 자료는 제주도를 30여개의 격자로 표현하기 때문에 해발고도에 따른 가뭄을 연구하는데 활용하기 어렵다. 그러나 최근 CCIC에서는 1×1 km 공간해상도의 남한상세 자료를 생산하여 배포함에 따라, 해발고도별 가뭄 예측 연구가 가능한 환경이 마련되었다.

이에 본 연구는 CCIC의 고해상도 남한상세 기후변화 자료를 활용하여 제주도에 사면과 해발고도에 따른 미래 가뭄 발생의 차이를 연구하였다. 그리고 이를 통해 제주도에 지역에 따른 가뭄 대처 계획의 수립에 필요한 기초정보를 제공하고자 하였다.

2. 연구방법 및 자료

2.1. 가뭄 발생 예측 방법

본 연구는 제주도 각 지역에서의 가뭄 발생 경향을 예측하기 위해 각 지역의 현재와 미래의 가뭄 발생횟수, 가뭄 지속기간(duration), 가뭄 심도(severity)를 산정하였다. 그리고 현재에 대비해 미래에 이러한 가뭄 특성들이 어떻게 변화되는지에 대하여 분석하였다.

본 연구에서 현재는 CCIC 자료의 기간을 고려하여 2001년부터 2010년(10년)으로 설정하였으며, 미래 기간은 가까운 미래에 제주도에 발생할 수 있는 가뭄의 공간적 분포 특성을 파악하기 위하여 2015년부터 2044년(30년)으로 설정하였다. 본 연구에서는 두 기간의 가뭄을 비교하기 위하여 전체 기간에 대한 가뭄지수를 산정하고 현재와 미래의 가뭄지수를 비교하였다.

본 연구의 예측 대상 가뭄은 기상학적 가뭄으로, 이를 위해 기상학적 가뭄지수인 파머가뭄지수(Palmer drought severity index, PDSI)와 표준강수지수(standardized precipitation index, SPI)를 연구에 활용하였다. 두 지수는 국내의 과거 주요 가뭄사상과의 비교 연구(Kwon과 Moon, 2005; Lee 등, 2012)를 통해 그 활용성이 검증된 가뭄지수이므로 본 연구에서 가뭄평가를 위해 채택하였다.

PDSI는 Palmer(1965)에 의해 제안되었으며, 강수량과 기온 자료, 유효토양수분량을 활용하여 가뭄을 평가하는 지수이다. PDSI는 입력자료를 사용하여 월별 지수법으로 물수지를 분석하고 이를 토대로 필요

한 강수량과 실제 강수량의 차이로 산정된다.

SPI는 McKee 등(1993)에 의해 제안되었으며, 강수량만을 이용하여 가뭄을 평가하는 지수이다. SPI 산정을 위해서는 주어진 지속기간(1, 3, 6, 9, 12개월 등)에 대한 누가강수시계열을 작성하고 이를 1월부터 12월까지 월별로 분석하여 월별 확률분포형을 선정한다. 선정된 확률분포형을 이용하여 누가확률을 산정한 후, 그 누가확률에 해당하는 표준정규분포의 변량을 구하면 이 값이 SPI가 된다.

Table 1과 2는 각각 PDSI와 SPI에 따른 가뭄의 정도를 나타낸 것이다. 두 지수 모두 그 값이 음수에서 작아질수록 가뭄이 심하다는 것을 의미한다. 본 연구에서 분석한 가뭄은 PDSI와 SPI 분류 상의 약한 가뭄(moderate drought)과 심한 가뭄(severe drought), 극심한 가뭄(extreme drought)이다.

Table 1. Classification of drought intensity using PDSI (Palmer, 1965)

PDSI value	Classification
4.00 more than	Extreme wet
3.00 ~ 3.99	Very wet
2.00 ~ 2.99	Moderate wet
1.00 ~ 1.99	Slightly wet
0.50 ~ 0.99	Incipient wet Spelt
-0.49 ~ 0.49	Near normal
-0.99 ~ -0.50	Incipient drought
-1.99 ~ -1.00	Mild drought
-2.99 ~ -2.00	Moderate drought
-3.99 ~ -3.00	Severe drought
-4.00 less than	Extreme drought

Table 2. Classification of drought intensity using SPI (McKee 등, 1993)

SPI value	Classification
2.00 more than	Extreme wet
1.50 ~ 1.99	Very wet
1.00 ~ 1.49	Moderate wet
-0.99 ~ 0.99	Near normal
-1.49 ~ -1.00	Moderate drought
-1.99 ~ -1.50	Severe drought
-2.00 less than	Extreme drought

SPI는 지수산정을 위해 강수량의 계산 시간단위를 1개월부터 3, 6, 9, 12, 24개월 등으로 자유롭게 설정할 수 있다. 본 연구에서는 다양한 기간의 가뭄을 평가하기 위해 시간단위를 3개월(단기 또는 계절가뭄), 6개월(중기가뭄), 12개월(장기가뭄)로 설정하였다.

본 연구에서 가뭄 심도는 가뭄 규모(magnitude)를 가뭄의 지속기간으로 나눈 값을 사용하였다. 여기에서 가뭄의 지속기간은 가뭄이 시작되고 종료되는 기간(개월)을 의미하며, 가뭄 규모는 가뭄의 지속기간 동안에 각 월별 가뭄지수의 합을 의미한다.

2.2. 제주도의 지역 구분

본 연구에서는 제주도의 미래 가뭄 발생을 지역별로 사면과 해발고도별로 나누어 분석하였다(Fig. 1). 본 연구에서는 먼저 한라산을 중심으로 사면에 따라 제주도를 4개 권역으로 구분하였다. 이때 각 사면의 경계는 행정구역을 기반으로 결정하였다. 이는 본 연구의 연구결과를 추후 통계연보에서 제공되는 농업통계 등과의 상관성 분석에 활용할 때의 편의성을 고려한 것이다. 아울러 가뭄과 관련한 농업용수의 관리 및 활용 방안 등 다양한 수자원 정책 수립에 활용할 때의 편의성을 고려한 것이다.

다음으로 4개 권역을 해발고도에 따라 구분하였다. 해발고도에 따른 구분에서는 200 m 간격으로 4개의 분류(200 m 이하, 201~400 m, 401~600 m, 601 m 이상)를 사용하였다. 첫 구간을 200 m 이하로 구분한 이유는 제주도의 4개 권역 중 강수량이 가장 적은 서부

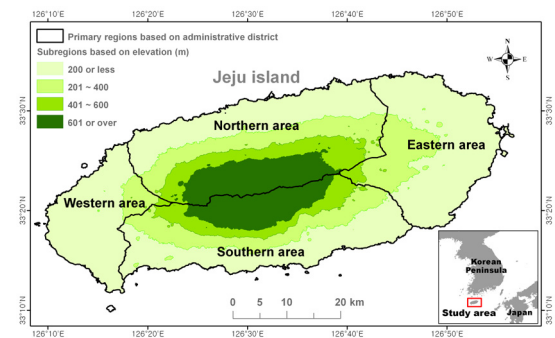


Fig. 1. Location of study area and regional classification for this study.

권역의 지형특성을 반영하였기 때문이다. 서부권역은 대부분이 해발고도 200 m 이하의 평지 및 구릉성 지형을 나타낸다. 따라서 동일한 해발고도 조건을 가진 다른 권역의 특성을 비교하기 위해 첫 구간을 200 m 구간으로 구분하였으며, 첫 구간 이후는 등간격으로 분류하였다.

2.3. 기상자료의 획득

본 연구에서 제주도의 현재와 미래 기상자료는 CCIC (2014)에서 생산하여 배포하는 1×1 km 공간해상도의 남한 상세 기후변화 시나리오 자료를 활용하였다.

남한 상세 기후변화 시나리오는 지역기후모델을 통해 생산된 한반도 기후변화 시나리오(12.5 km)를 바탕으로 통계적 상세화 과정을 통해 생산된다. 이를 위해 먼저 모델 계통오차 제거를 위한 기후값을 계산한다. 기후값은 관측자료(2000~2010년)를 PRIDE(PRISM based downscaling estimation model) 모델에 적용하여 1 km 해상도의 자료를 생산하여 획득한다. 다음으로 12.5 km 한반도 시나리오 자료에서 각 격자점별로 계절 변동을 제거한 편차(anomaly) 자료를 추출한 후 관측에서 얻은 기후값에 지역기후모델의 편차를 더하여 모델 계통오차가 제거된 새로운 1 km 격자형 시나리오 자료를 생산한다. 시나리오 자료 생산 과정에 최근의 관측자료를 활용한 모델의 계통오차 제거가 포함되어 있으므로 본 연구에서는 이 자료를 활용함에 있어 별도의 편의보정(bias-correction)을 수행하지 않았다.

본 연구는 CCIC에서 관측자료를 토대로 작성한 기후값 자료 중 2001~2010년 자료를 현재 기상자료로 활용하였다. 2000년 자료는 SPI를 산정하는데 사용하였지만 초기 3, 6, 12개월은 지수가 산정되지 않으므로 가뭄 특성 해석에서는 제외하였다.

미래 기상자료는 남한 상세 기후변화 시나리오 자료를 활용하였다. 기후변화 시나리오는 representative concentration pathways (RCP) 4.5 시나리오로 생산된 자료를 활용하였다. IPCC 4차 평가보고서에 사용한 special report on emissions scenarios (SRES) 온실가스 시나리오를 대신하여 IPCC 5차 평가보고서에서는 대표농도경로 RCP를 새로운 시나리오로 사용하며, RCP 시나리오는 최근 온실가스 농도변화 반영 및 최근 예측모델에 맞게 해상도 등을 업데이트 하였다

(CCAS, 2014). 따라서 본 연구에서는 RCP 시나리오를 연구에 사용하였다. RCP 4.5는 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우의 미래 온실가스 배출 시나리오이다.

1 km 정규 격자인 남한 상세 기후변화 시나리오를 본 연구에서 설정한 각 지역별 강수량 자료로 생산하기 위해, 본 연구에서는 기후변화 자료를 연구자가 설정한 지역별 자료로 생산하는데 효과적인 툴을 포함하고 있는 “농어촌 용수구역 지하수 가뭄예측 시스템”을 활용하였다(Park, 2013).

3. 연구결과

3.1. 강수량과 기온의 변화 경향

2001~2010년 제주도의 남부와 동부권역에서는 서부와 북부권역에 비해 상대적으로 많은 강수량이 나타났다(Fig. 2). 서부권역의 해발고도 400 m 이하 지역은 연평균 2,000 mm/year의 강수량을 보인 반면 남부권역의 동일한 해발고도 지역에서는 2,500 mm/year 내외의 강수량이 나타났다. 해발고도 600 m 지역에서의 강수량 분포를 살펴보면 많은 강수량을 보이는 지역이 한라산을 중심으로 남동사면에 치우쳐 나타나고 있다. Choi(2013)에 의하면 이와 같은 강수량 분포는 한라산 사면을 따라 반시계 방향으로 상승하는 저기압의 흐름과 관련되어 있다.

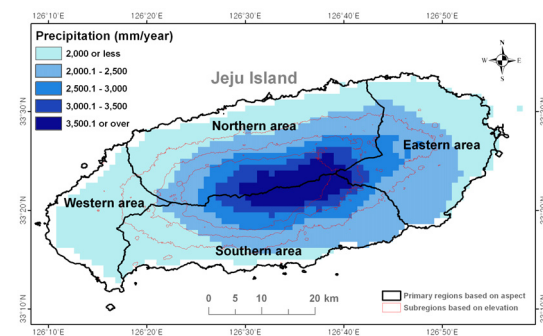


Fig. 2. Spatial distribution of mean annual precipitation during the 2001~2010 period.

CCIC 자료에 의하면 2015~2044년 제주도의 연강수량은 현재에 비해 모든 지역에서 증가할 것으로 예상되고 있다(Fig. 3). 특히 서부와 남부권역의 해발고

도 200 m 이하 지역에서는 연강수량이 현재에 비해 500 mm/year 이상 증가할 것으로 나타나 그 증가세가 두드러질 것으로 예상되었다. 제주도에서 강수량이 상대적으로 적게 증가하는 지역은 북부권역에서 주로 나타나며 해발고도 401 m 이상 지역에서 넓게 나타난다. 이 지역에서의 강수량 증가는 현재에 비해 200 mm/year를 넘지 않을 것으로 예상되고 있다.

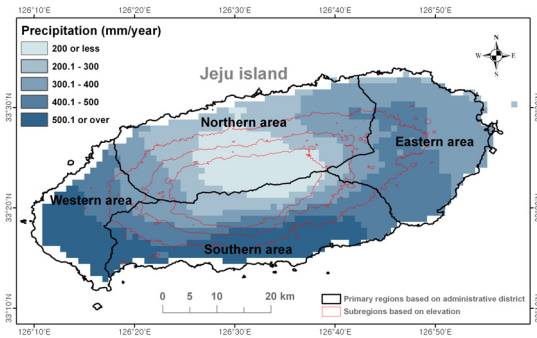


Fig. 3. Change of mean annual precipitation during the 2015~2044 period compared to 2001~2010 average.

제주도에서의 강수량 증가 경향을 계절적으로 나누어 살펴보면 여름철 강수량의 증가가 가장 뚜렷할 것으로 예상되며 봄철과 가을철에는 일부 지역에서

강수량의 감소가 나타날 것으로 예상되고 있다. Table 3은 강수량의 계절적인 변화 양상을 보여준다. 계절구분은 기후학적 구분을 사용하였으며 봄(3~5월), 여름(6~8월), 가을(9~11월), 겨울(12~2월)로 정의하였다. 봄철 강수량은 제주도 전반에서 평균적으로 19.7 mm/month 증가하며 각 권역의 해발고도 200 m 이하 지역에서 강수량 증가가 상대적으로 많을 것으로 예상되었다. 여름철 강수량은 평균적으로 66.2 mm/month 증가할 것으로 예상되며 남부권역을 제외하면 해발고도 201~400 m 지역에서 강수량 증가가 두드러질 것으로 예상되었다. 남부권역에서는 해발고도 200 m 이하 지역의 여름철 강수량이 현재에 비해 100.3 mm/month 증가할 것으로 예상되어 제주도 내에서 강수량이 가장 많이 증가할 것으로 예상되었다. 가을철과 겨울철에는 강수량이 각각 14.4 mm/month, 14.2 mm/month 증가할 것으로 예상되었다.

하지만 동부권역과 북부권역의 해발고도 401 m 이상 지역에서는 봄철 강수량이 1.5 mm/month 감소할 것으로 예상되었으며, 동부권역의 동일 해발고도 지역에서는 25.7 mm/month 감소할 것으로 예상되었다. 동부권역에서는 가을철에도 강수량이 4.2 mm/month 감소할 것으로 예상되었다.

제주도의 연평균기온은 2001~2010년에 비해 꾸준

Table 3. Seasonal precipitation change for the 2015~2044 period compared to 2001~2010 average

Region	Elevation	Seasonal precipitation (mm/month)			
		Spring (3~5) [*]	Summer (6~8)	Fall (9~11)	Winter (12~2)
Eastern area	200 m or less	21.0	60.7	12.6	16.4
	201~400 m	5.8	74.1	9.0	9.5
	401~600 m	-25.7	47.5	-4.2	1.5
Western area	200 m or less	41.4	73.2	18.7	23.4
	201~400 m	34.7	79.3	23.4	21.4
	401~600 m	16.2	55.5	13.5	14.0
Southern area	200 m or less	39.4	100.3	16.9	18.1
	201~400 m	33.2	99.2	16.5	14.9
	401~600 m	18.0	87.3	13.7	10.4
	601 m or over	21.2	88.3	17.3	6.0
Northern area	200 m or less	10.2	25.6	14.8	18.1
	201~400 m	5.9	43.2	16.3	14.9
	401~600 m	-1.5	44.0	11.3	8.9
	601 m or over	-1.1	38.1	8.6	2.3
Average of whole area		19.7	66.2	14.4	14.2

()^{*} indicates the range of months

히 상승할 것으로 예상되고 있다. Fig. 4는 제주도 전체의 연평균기온 변화를 보여주고 있다. 이 그림에서 10년 이동평균값을 살펴보면 2001~2010년의 연평균 기온은 14.3°C 이고 2044년에는 15.8°C 로 약 30년간 1.5°C 상승할 것으로 예상되고 있다. Trenberth 등 (2007)에 의하면 지난 100년 동안의 전구 평균 기온 상승량은 $0.74 \pm 0.18^{\circ}\text{C}$ 이었다. 따라서 30년 동안의 1.5°C 기온상승은 전구 평균 기온상승량을 크게 넘는 변화량이다. 한편 연평균기온의 경년변화는 현재에 비해 더욱 클 것으로 예상되고 있다. 2001~2010년 사이에 연평균기온은 $0.5 \sim 1^{\circ}\text{C}$ 내의 변화를 보이지만 2016년 이후에는 그 변화가 1°C 를 넘는 시기도 나타나고 있다.

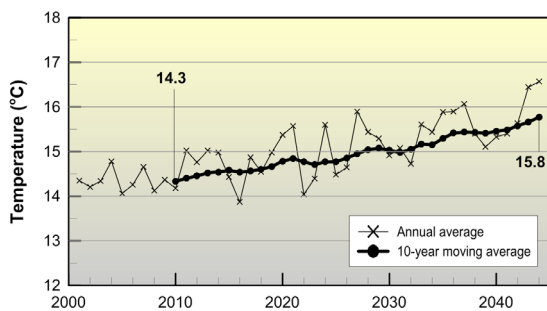


Fig. 4. Annual average temperature for the whole area of Jeju Island.

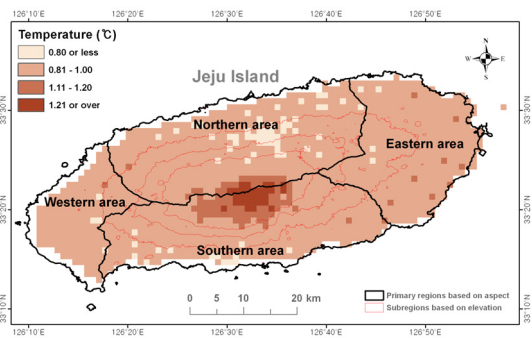


Fig. 5. Change of annual average temperature during the 2015~2044 period compared to 2001~2010 average.

제주도에서 기온상승이 가장 두드러지게 나타나는 지역은 해발고도 601 m 이상의 산지지역에서 나타날 것으로 예상되고 있다(Fig. 5). 이 지역의 연평균기온

은 현재에 비해 1.2°C 이상 상승할 것으로 예상되고 있다. 제주도의 그 외 지역에서는 대체로 $0.8 \sim 1^{\circ}\text{C}$ 의 기온 상승이 있을 것으로 예상되고 있으며, 북부권역의 일부지역에서는 기온상승 폭이 0.8°C 이하일 것으로 예상되고 있다.

3.2. 가뭄 발생횟수의 변화

SPI 분석결과에 의하면, 제주도 전역에서 가뭄 발생횟수는 미래에 감소할 것으로 예상되었으며, PDSI 분석결과에 의하면, 일부 산지지역에서 약한 가뭄이 다소 증가할 것으로 예상되었다. Fig. 6은 지역별 가뭄 발생횟수의 변화 양상을 보여주고 있다.

3개월 단위 SPI 분석에서 약한 가뭄의 발생횟수는 제주도 전역에서 현재에 비해 감소할 것으로 예상되었다. 상대적으로 그 감소가 크게 일어나는 지역은 해발고도 401 m 이상 지역이다. 6개월 단위 SPI 분석에서도 약한 가뭄의 발생횟수는 현재에 비해 감소하고 있으며 해발고도 400 m 이하 지역과 601 m 이상 지역에서 가뭄 발생횟수가 상대적으로 많이 감소하였다. 12개월 단위 SPI 분석에서는 서부와 남부권역의 해발고도 200 m 이하 지역에서 가뭄 발생횟수의 감소가 두드러졌다. 6개월과 12개월 단위의 SPI 분석에서 상대적으로 가뭄 발생횟수의 감소가 적었던 지역은 해발고도 401~600 m 지역이었다.

PDSI의 분석결과에서는 서부권역의 해발고도 200 m 이하 지역에서 가뭄 발생횟수가 현재에 비해 크게 감소할 것으로 예상되었다. 하지만 북부권역의 해발고도 401 m 이상 지역과 남부권역의 해발고도 401~600 m 지역에서는 그 횟수가 현재보다 다소 (5month/10years 이내) 증가할 것으로 예상되었다.

3개월과 6개월 단위의 SPI 분석에서 심한 가뭄의 감소 양상은 매우 유사하였다. 그 분석결과에서 서부권역의 심한 가뭄 발생횟수는 현재에 비해 상대적으로 많이 감소할 것으로 예상되었는데, 약 15~20 month/10years 감소할 것으로 예상되었다. 12개월 단위의 SPI 분석에서는 북부권역의 해발고도 201~400 m 지역에서 심한 가뭄의 발생횟수가 상대적으로 많이 감소할 것으로 예상되었다. PDSI의 분석결과에서 심한 가뭄의 발생횟수 역시 제주도 전 지역에서 감소할 것으로 예상되었으며 상대적으로 많이 감소하는 지역은

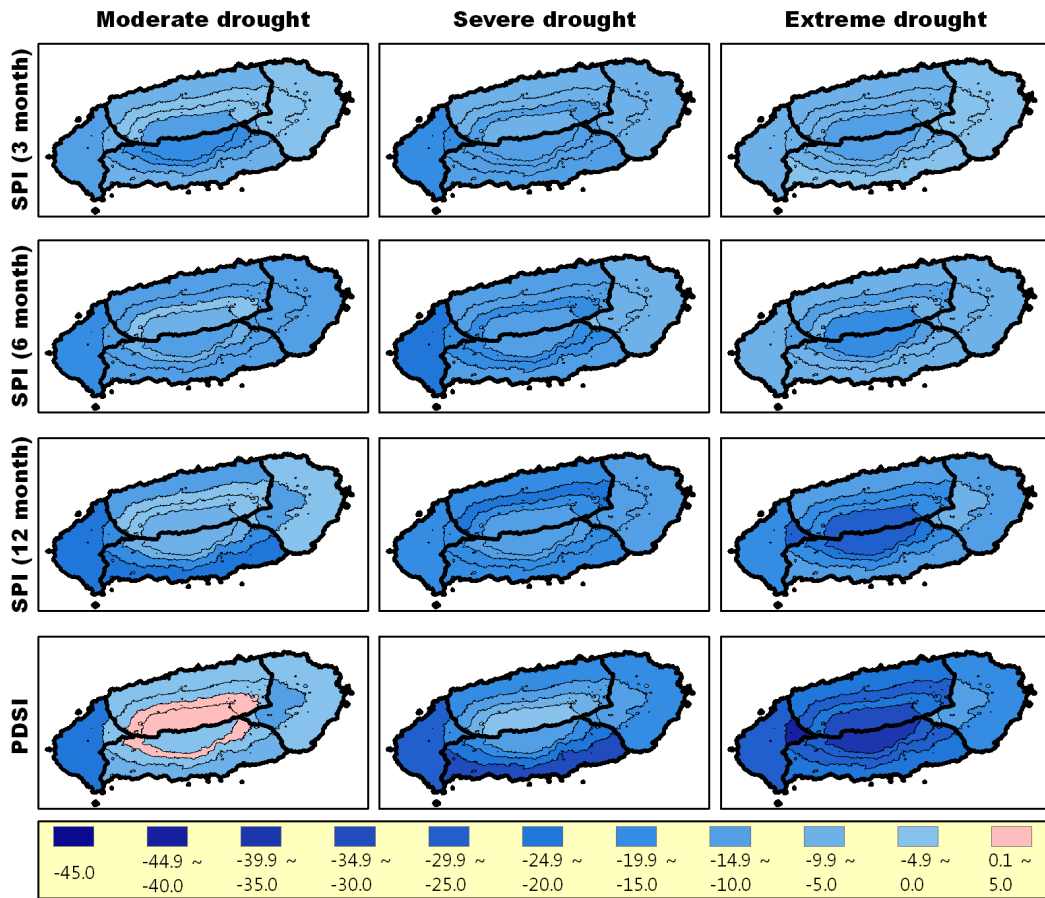


Fig. 6. Changes in number of droughts for the 2015~2044 period compared to 2001~2010 average (unit: month/10years).

서부권역과 남부권역의 해발고도 200 m 이하 지역이 었다.

SPI와 PDSI의 분석결과에 의하면 극심한 가뭄의 발생횟수도 제주도 전역에서 그 횟수가 감소할 것으로 예상되었다. 극심한 가뭄의 발생횟수 감소는 해발 고도 601 m 이상의 산지지역과 북부·서부권역의 201~400 m 지역에서 두드러졌다.

SPI 분석결과에서는 가뭄 발생횟수가 전반적으로 감소할 것으로 예상된 가운데, 해발고도 401 m 이상 지역에서는 그 감소세가 다른 지역에 비해 약하게 나타났다. 이와 같은 현상은 이 지역의 강수량 증가폭이 다른 지역에 비해 적고, 봄철과 가을철 강수량은 오히려 감소할 것으로 예상된 것(Table 2)과 관련이 있을

것으로 판단된다.

해발고도 401 m 이상 지역에서는 PDSI의 분석결과에서 가뭄 발생횟수가 현재에 비해 미래에 증가할 것으로 예상되었다. 이는 이 지역에서 상대적으로 강한 기온상승이 있을 것으로 예상되었기 때문으로 판단된다. 앞서 제주도의 미래 기온상승 분포 특성에서 산지지역이 해안 저지대에 비해 상대적으로 높은 기온상승을 보일 것으로 예상되고 있었다. 아울러 강수량만을 이용하여 분석한 SPI의 단기, 중기, 장기 가뭄 예측에서는 가뭄 발생횟수가 감소할 것으로 예상된 반면 기온을 함께 고려하는 PDSI의 분석에서는 그 횟수가 증가할 것으로 예상되었다. 따라서 PDSI에서 산지지역의 가뭄 발생횟수가 현재에 비해 증가할 것으

로 예측된 것은 산지지역의 강한 기온상승과 관련되어 있는 것으로 판단된다.

3.3. 가뭄 지속기간의 변화

제주도 대부분의 지역에서 가뭄 지속기간은 미래에 감소할 것으로 분석되었지만, 3개월 단위의 SPI 분석결과에서 약한 가뭄과 심한 가뭄의 지속기간이 일부지역에서 현재보다 다소 길어질 것으로 예상되었다. 아울러 PDSI 분석결과에서는 남부권역 일부 지역의 가뭄 지속기간이 다소 길어질 것으로 예상되었다. Fig. 7은 지역별 가뭄 지속기간의 변화 양상을 보여주고 있다.

Fig. 7에서 3개월 단위 SPI의 약한 가뭄 분석결과를

살펴보면 동부권역의 해발고도 400 m 이하 지역에서 그 지속기간이 현재에 비해 길어질 것으로 예상되고 있다. 다만 그 증가 기간은 평균 0.5개월을 넘지 않을 것으로 예상되었다. 6개월 단위와 9월 단위의 SPI 분석결과, 그리고 PDSI의 분석결과에서는 약한 가뭄의 지속기간이 현재에 비해 모든 지역에서 짧아질 것으로 예상되었다. 지속기간이 상대적으로 많이 짧아지는 지역은 서부권역과 남부권역의 해발고도 201 m 이상 지역이었다.

3개월 단위 SPI의 심한 가뭄 분석결과에서는 남부권역의 해발고도 201~600 m 지역과 북부권역의 401 m 이상 지역에서 심한 가뭄의 지속기간이 현재 보다 다소 길어질 것으로 예상되었다. 6개월 단위의 SPI 분

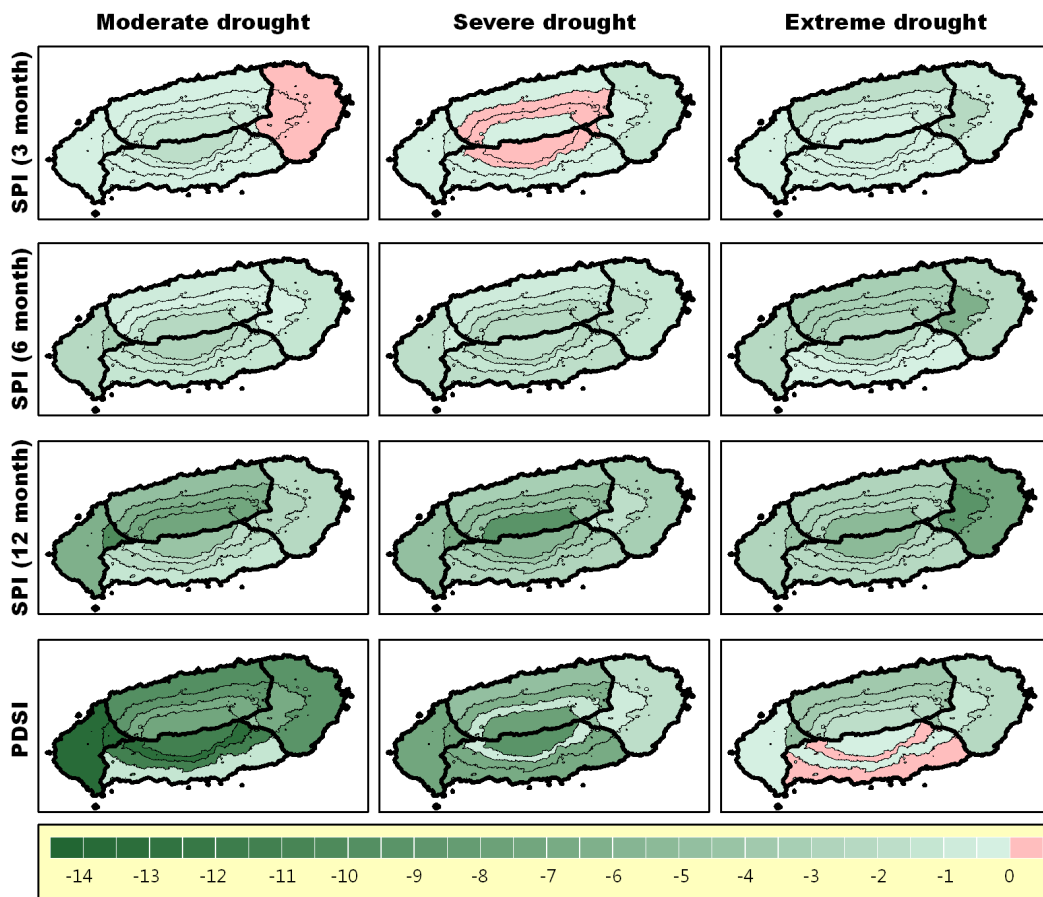


Fig. 7. Changes in drought duration for the 2015~2044 period compared to 2001~2010 average (unit: month).

석결과에서는 제주도 전 지역의 심한 가뭄 지속기간이 1~3개월 짧아질 것으로 예상되었다. 12개월 단위의 SPI 분석결과에서는 해발고도 601 m 이상 지역에서 지속기간의 단축이 두드러지며 서부·남부·북부 권역의 해발고도 400 m 이하 지역에서도 심한 가뭄의 지속기간이 현재에 비해 크게 단축될 것으로 예상되었다.

SPI 분석결과에서 극심한 가뭄의 지속기간은 제주도 전 지역에서 현재에 비해 짧아질 것으로 예상되었다. 그러나 PDSI 분석결과에서는 남부권역의 해발고도 200 m 이하 지역과 해발고도 401~600 m 지역에서 심한 가뭄의 지속기간이 다소 길어질 것으로 예상되었다. 6개월 단위와 12개월 단위의 SPI 분석결과를 살

펴보면 극심한 가뭄의 지속기간이 동부권역에서 크게 줄어들 것으로 예상되었다.

3.4. 가뭄심도의 변화

미래의 가뭄심도는 제주도의 여러 지역에서 현재에 비해 다소 깊어질 것으로 예상되었다. Fig. 8은 가뭄심도의 변화를 보여주고 있다.

3개월 단위 SPI의 분석결과에서 약한 가뭄의 심도는 제주도 동부권역의 해발고도 200 m 이하 지역에서 현재에 비해 약 0.2 이내에서 깊어질 것으로 예상되었으며, 남부권역의 해발고도 401~600 m 지역에서 역시 가뭄심도가 현재에 비해 다소 깊어지고 그 외 지역에서는 가뭄심도가 현재에 비해 얕아질 것으로 분석

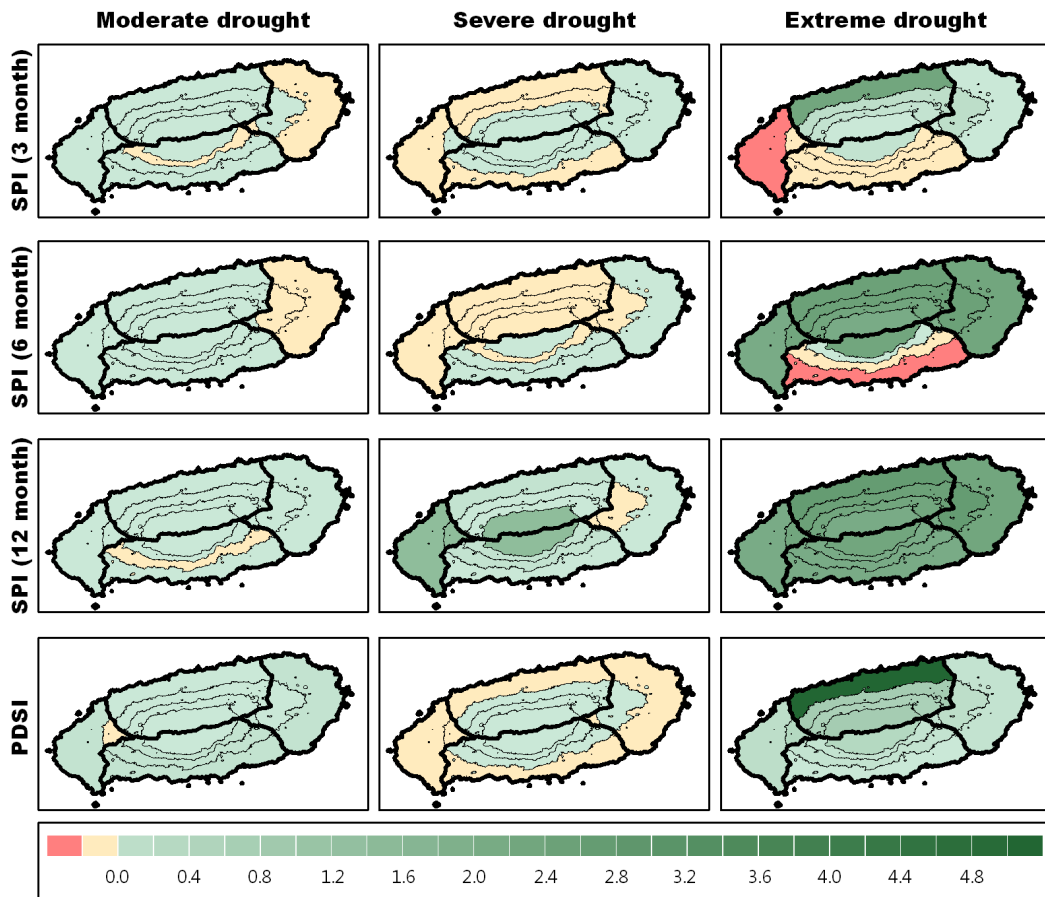


Fig. 8. Changes in drought severity for the 2015~2044 period compared to 2001~2010 average (unit: SPI).

되었다. 6개월 단위 SPI의 분석결과에서도 동부권역의 해발고도 400 m 이하 지역에서는 약한 가뭄의 심도가 깊어질 것으로 예상되었으며, 12개월 단위 SPI에서는 남부권역에서 가뭄심도가 깊어지는 지역이 나타날 것으로 분석되었다. PDSI의 분석결과에서는 서부권역의 해발고도 201~400 m 지역에서 가뭄심도가 깊어지는 곳이 나타날 것으로 예상되었으며, 그 외 지역에서는 가뭄심도가 얕아질 것으로 나타났다.

심한 가뭄의 심도는 약한 가뭄에 비해 여러 지역에서 현재에 비해 깊어질 것으로 예상되었다. 3개월 단위 SPI에서 북부·남부·서부권역의 해발고도 200 m 이하 지역의 가뭄심도는 현재에 비해 깊어질 것으로 나타났으며, 북부권역에서는 해발고도 201~400 m 지역에서도 가뭄심도가 깊어질 것으로 분석되었다. 6개월 단위 SPI에서는 북부권역 전체와 서부권역의 해발고도 400 m 이하 지역에서 심한 가뭄의 심도가 깊어질 것으로 예상되었다. 남부권역의 해발고도 401~600 m 지역과 동부권역의 해발고도 201 m 이상 지역에서도 이와 같은 현상이 발생할 것으로 나타났다. 12개월 단위 SPI 분석결과에서는 동부권역의 해발고도 201 m 이상 지역에서 심한 가뭄의 심도가 깊어질 것으로 예상되었다. PDSI에서는 대체로 각 권역의 해발고도 200 m 이하 지역의 가뭄심도가 현재에 비해 깊어질 것으로 분석되었다.

3개월 단위의 SPI 분석결과에 의하면 서부권역과 남부권역에 해발고도 600 m 이하 지역에서 극심한 가뭄의 심도가 현재에 비해 깊어지며, 특히 서부권역의 해발고도 200 m 이하 지역에서 극심한 가뭄의 심도가 두드러지게 깊어질 것으로 나타났다. 6개월 단위 SPI 분석결과에 의하면 남부권역의 해발고도 400 m 이하 지역에서 극심한 가뭄의 심도가 깊어지며, 해발고도 200 m 이하 지역에서 그 심도가 현재에 비해 많이 깊어질 것으로 나타났다. 12개월 단위 SPI 분석결과에서는 제주도 전 지역의 극심한 가뭄 심도가 현재에 비해 얕아질 것으로 예상되었다. PDSI의 분석결과에서도 그 심도가 현재와 비슷하거나 얕아질 것으로 예상되었으며 북부권역의 해발고도 200 m 이하지역에서는 극심한 가뭄의 심도가 특히 얕아질 것으로 예상되었다.

4. 토의 및 결론

본 연구에서는 현재(2001~2010년) 제주도의 가뭄 발생횟수, 가뭄 지속기간, 가뭄 심도에 대비해 향후 30년(2015~2044년) 제주도에서 발생할 가뭄의 변화 경향에 대하여 분석하였다.

본 연구에서 각 지역의 가뭄 발생횟수와 가뭄 지속기간, 가뭄 심도의 변화는 사용하는 지수(SPI 또는 PDSI)와 SPI의 단위 기간에 의해 매우 다양한 양상을 보였다. 그러나 전반적으로 미래의 가뭄 발생횟수가 현재에 비해 감소하고 가뭄 지속기간 역시 대체로 짧아지는 경향이 있음을 알 수 있었다. 이는 미래 강수량의 증가와 연관되어 나타나는데, 이는 강수량만을 사용한 SPI와 기온까지 고려한 PDSI에서 공통된 경향을 보였기 때문이다. 따라서 제주도에서 미래 강수량의 증가는 빠른 기온상승에도 불구하고 가뭄 발생횟수와 가뭄 지속기간을 감소시키는 역할을 할 것으로 예상되었다. 다만 해발고도 401 m 이상 지역에서는 봄과 가을철의 강수량 감소와 산지지역에서 나타나는 상대적으로 빠른 기온상승이 복합적으로 작용하여 약한 가뭄의 발생횟수를 증가시킬 것으로 예상되었다.

그러나 본 연구에서는 강수량의 증가에도 불구하고 서부권역과 북부권역의 해발고도 200 m 이하 지역을 중심으로 심한 가뭄의 심도가 현재에 비해 깊어지는 경향이 있을 것으로 분석되었다. 이 지역에서는 3개월 단위의 SPI (단기가뭄), 6개월 단위의 SPI (중기가뭄), 그리고 PDSI의 분석에서 심한 가뭄의 심도가 현재에 비해 깊어지는 경향을 보였다.

기온상승이 상대적으로 작은 해안 저지대에서 심한 가뭄의 심도가 깊어지는 지역이 나타났다는 점은 이 현상이 기온상승 보다는 강수량의 변화와 연관되어 있음을 시사한다. 나아가 해안 저지대의 강수량 증가폭이 산지지역에 비해 높았으므로 이 현상은 강수량의 계절변동과 연관되어 있을 수 있다. Song과 Choi(2012)에 의하면 제주도에서 월평균 강수량의 최대와 최소값의 차이는 미래로 갈수록 커지며 특히 남부와 서부권역에서 강하게 나타날 것으로 예상되었다. 이 지역에서 나타나는 가뭄심도의 변화는 이와 같은 월평균 강수량의 변화 특성과 연관되어 있을 것으로 추정된다.

본 연구에서 파악된 제주도의 가뭄발생 특성을 한 라산을 중심으로 한 사면(권역)과 지형고도별 특징으로 정리하면 다음과 같다.

동부권역에서 가뭄 발생횟수는 3개월, 6개월, 12개월 단위의 SPI와 PDSI 가뭄발생이 현재에 비해 감소되는 것으로 분석되었다. 그러나 해발고도 400 m 이하 지역에서 3개월 단위 약한 가뭄의 지속기간은 현재에 비해 다소 길어지며, 해발고도 200 m 이하 지역에서는 3개월과 6개월 단위 약한 가뭄의 심도가 현재에 비해 다소 깊어질 것으로 나타났다.

서부권역에서 가뭄 발생횟수는 현재에 비해 뚜렷하게 감소하며, 가뭄 지속기간 역시 현재에 비해 짧아지는 것으로 나타났다. 다만 3개월과 6개월 단위의 SPI 분석과 PDSI 분석에서 심한 가뭄의 심도가 현재에 비해 깊어지며, 3개월 단위 SPI 분석에서는 극심한 가뭄의 심도가 깊어질 것으로 예상되었다.

남부권역에서는 SPI 분석결과에서 가뭄 발생횟수가 현재에 비해 감소되지만, PDSI 분석에서는 해발고도 401~600 m 지역에서 현재에 비해 다소 증가하는 것으로 나타났다. 가뭄 지속기간은 3개월 단위 SPI에서 해발고도 401 m 이상 지역에서 그 기간이 현재에 비해 길어지며, PDSI 분석에서는 극심한 가뭄의 지속기간이 해발고도 200 m 이하 지역과 401~600 m 지역에서 길어지는 것으로 나타났다. 해발고도 200 m 이하 지역에서는 3개월과 6개월 단위의 SPI 분석과 PDSI 분석에 의해 심한 가뭄과 극심한 가뭄의 심도가 현재에 비해 깊어질 것으로 예상되었다.

북부권역에서는 PDSI 분석에서 해발고도 401 m 이상 지역의 약한 가뭄 발생횟수가 증가하며, 그 외 지역에서는 모두 감소하는 것으로 나타났다. 가뭄 지속기간은 3개월 단위의 SPI 분석에서 해발고도 201~600 m 지역의 그 기간이 길어질 것으로 예상되었다. 해발고도 200 m 이하 지역에서는 3개월과 6개월 단위의 SPI 분석과 PDSI 분석에서 심한 가뭄의 심도가 현재에 비해 깊어질 것으로 예상되었다.

제주도에서의 권역별 미래 가뭄 발생에 대해 Song 등(2013)은 PDSI와 SPI의 시계열적 추세분석을 토대로 북부와 서부권역이 남부권역에 비해 현재보다 가뭄이 심해질 것으로 예측한 바 있다. 특히 서부권역의 가뭄이 심해질 수 있으므로 이 지역에서 가뭄에 대비

한 적절한 농업용수 활용 계획 수립의 필요성을 언급한 바 있다. 본 연구의 결과 역시 이들 지역의 가뭄이 다른 지역에 비해 심해질 것으로 예측되었다. 나아가 본 연구에 의하면 이들 지역에서의 가뭄 피해는 가뭄 심도의 악화에 의해 나타나며, 이 현상은 해발고도 200 m 이하 지역에서 주로 나타날 것으로 분석되었다. 따라서 제주도 서부권역과 북부권역에서는 가뭄대책을 수립할 때 가뭄심도의 변화에 대응하기 위한 계획수립이 필요하며, 해발고도 200 m 이하 지역을 중심으로 계획을 수립할 필요가 있을 것으로 판단된다.

특히 제주도의 서부권역에 대해서는 현재의 용수 공급 체계가 미래에 발생할 가뭄에 적절하게 대응할 수 있는지에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다. 이 지역은 Song과 Choi(2012)에 의하면 농업용수 수요량이 높은 시설재배작물이 많은 지역이며, Kim 등(2010)에 의하면 당근, 마늘, 양파를 광범위하게 재배하고 있어 9~10월의 가을철과 장마 전인 6월 초에 많은 용수를 필요로 하는 곳이다. 이 지역에서는 농업용수의 필요시기와 기후환경 등으로 인해 현재도 고가수조를 활용하여 농업용수를 확보하고 있다. 이 지역의 고가수조 밀도는 제주도에서 가장 높으며 이는 국내에서도 독특한 농업경관 중 하나이다. 따라서 제주도의 서부권역에서는 현재 건설되어 있는 고가수조가 미래의 가뭄 특성에 적절하게 대응할 수 있는지에 대한 검토도 필요할 것으로 판단된다.

본 연구는 가까운 미래에 발생할 수 있는 제주도 각 지역의 가뭄 발생 특성을 제시하였다. 이 연구 결과는 제주도 각 지역의 특성을 고려하여 미래 가뭄에 대비한 수자원 정책을 수립할 때 유용한 정보가 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업 “제주 수자원 연구단(10지역기술혁신B02)” 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., Palutikof, J. P., 2008, Climate Change and Water. Technical

- Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 200.
- Choi, G. Y., 2011, Variability of Temperature Lapse Rate with Height and Aspect over Halla Mountain, *Journal of Climate Research*, 6(3), 171-186.
- Choi, G. Y., 2013, Spatial Patterns of Seasonal Extreme Precipitation Events in Mt. Halla, *Journal of Climate Research*, 8(4), 267-280.
- CCAS, 2014, <http://ccas.kei.re.kr>
- CCIC(Climate Change Information Center), 2014, <http://www.climate.go.kr>.
- IPCC(International Panel on Climate Change), 2007, *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Core Writing Team, R.K Pachuri and A. Reisinger, Eds., IPCC, Geneva, 102.
- Kim, M. K., Park, J. C., Lee, S. W., 2010, The Background of the Formation of the Elevated Water Storage Tank Landscape in the Western Region of Jeju Island, *Journal of The Korean Association of Regional Geographers*, 16(6), 623-634.
- Knutson, C., Hayes, M., Phillips, T., 1998, How to Reduce Drought Risk, *Western Drought Coordination Council*, 2-9.
- Kwon, H. H., Moon, Y. I., 2005, Correlation Analysis between Palmer Drought Severity Index(PDSI), *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 25(5B), 355-364.
- Lee, J. H., Cho, K. J., Kim, C. J., Park, M. J., 2012, Analysis on the Spatio-Temporal Distribution of Drought using Potential Drought Hazard Map, *Journal of Korea Water Resources Association*, 45(10), 983-995.
- Lee, J. W., Jang, Y. J., Ko, K. K., Park, J. K., 2013, Effects of Meteorological Elements in the Production of Food Crops: Focused on Regression Analysis using Panel Data, *Journal of Environmental Science International*, 22(9), 1171-1180.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J., 1993, The relationship of drought frequency and duration of time scale, 8th Conference on Applied Climatology, January, Anaheim, CA, 179-184.
- Palmer, W.C., 1965, *Meteorological drought*. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C.
- Park, J. C., 2013, *Analysis of future climate change in Jeju Island*, Rural Research Institute, Ansan.
- Ribot, J.C., 1996, *Climate variability, climate change, and social vulnerability in the semi-arid tropics*, Cambridge, New York, NY, Cambridge University Press.
- Song, S. H., Choi, K. J., 2012, An Appropriate Utilization of Agricultural Water Resources of Jeju Island with Climate Change (I), *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 17(2), 62-70.
- Song, S. H., Yoo, S. H., Bae, S. J., 2013, Regional Drought Assessment Considering Climate Change and Relationship with Agricultural Water in Jeju Island, *Journal of Environmental Science International*, 22(5), 625-638.
- Trenberth, K. E., Jones, P. D., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Klein Tank, A., Parker, D., Rahimzadeh, F., Renwick, J. A., Rusticucci, M., Soden, B., Zhai, P., 2007, *Observations: Surface and Atmospheric Climate Change*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.