ORIGINAL ARTICLE

기후변화를 고려한 제주지역의 권역별 가뭄 평가 및 농업용수예의 영향 고찰

송성호 · 유승환¹⁾ · 배승종^{2)*}

한국농어촌공사 농어촌연구원, ¹⁾퍼듀대학교 농업및생물공학과, ²⁾서울대학교 그린바이오과학기술연구원

Regional Drought Assessment Considering Climate Change and Relationship with Agricultural Water in Jeju Island

Sung-Ho Song, Seung-Hwan Yoo¹⁾, Seung-Jong Bae^{2)*}

Rural Research Institute, KRC, Ansan, Korea

¹⁾Department of Agricultural and Biological Engineering, Purdue University, IL, USA

²⁾Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University, Pyeongchang, Korea

Abstract

Recently, the occurrences of droughts have been increased because of global warming and climate change. Water resources that mostly rely on groundwater are particularly vulnerable to the impact of precipitation variation, one of the major elements of climate change, are very sensitive to changes in the seasonal distribution as well as the average annual change in the viewpoint of agricultural activity. In this study, the status of drought for the present and future on Jeju Island which entirely rely on groundwater using SPI and PDSI were analyzed considering regional distribution of crops in terms of land use and fluctuation of water demand. The results showed that the precipitation distribution in Jeju Island is changed in intensity as well as seasonal variation of extreme events and the amount increase of precipitation during the dry season in the spring and fall indicated that agricultural water demand and supply policies would be considered by regional characteristics, especially the western region with largest market garden crops. Regarding the simulated future drought, the drought would be mitigated in the SPI method because of considering total rainfall only excluding intensity variation, while more intensified in the PDSI because it considers the evapotranspiration as well as rainfall as time passed. Moreover, the drought in the northern and western regions is getting worse than in the southern region so that the establishment of regional customized policies for water supply in Jeju Island is needed.

Key words : Climate change, Jeju, Drought, Precipitation, Water demand, Agriculture

1. 서론

가뭄은 기상학적으로 ‘강수빈도나 강수량이 평균 또는 기준 이하의 상태’를 의미하지만, 농업적인 측면

에서는 ‘작물생육 기간 동안 과다한 증발산량으로 토양수분이 작물 고유의 필요수량보다 부족하거나, 지하수 또는 저수지로부터의 가용 저수량이 부족한 상태’로 정의된다(Byun, 2009). 수문학적 측면에서 가

Received 12 December, 2012; Revised 3 April, 2013;

Accepted 13 May, 2013

*Corresponding author : Seung-Jong Bae, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University, Pyeongchang, Korea

Phone: +82-2-880-4592

E-mail: bsj5120@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.

물은 지하수 수문계(groundwater hydrological system)에 직접적인 영향을 미칠 수 있는데, 수자원의 대부분을 지하수에 의존하는 경우에는 다양한 기후변화의 영향에 특히 취약한 것으로 알려져 있다(IPCC, 2007; Bate 등, 2008). 따라서 수자원의 98% 이상을 지하수에 의존하는 제주지역의 경우에는 우리나라의 내륙지역과 달리 다양한 기후변화 인자의 변동성에 취약하다(Song과 Choi, 2012). 특히 농업활동의 측면에서 이러한 기후변화의 주요 인자인 강수량은 연평균 변화뿐만 아니라 계절적인 분포 변화가 농작물의 작부체계에 미치는 영향이 매우 크기 때문에, 기후변화에 수반된 강수량의 총량 변화와 더불어 계절적인 급격한 변화는 농업활동에 민감한 영향을 미칠 수 있다(O'Brien 등, 2004; Kingwell, 2006; Song과 Choi, 2012).

최근 농업활동에 미치는 강수량 부족과 관련하여 전국 66개 기상관측소(제주도 4개소 포함)의 30년 간 월평균 강수량(1981~2010년)과 2012년 1월부터 6월 사이의 월평균 강수량의 편차를 계산한 결과, 5월과 6월에 각각 62.2 mm와 85.5 mm 감소로 예년 평균의 약 40%와 51%의 강수량이 기록되어 농업활동에 지장을 준 사례가 있다(Song 등, 2012). 또한 동일한 기간 중 전국적인 저수율은 41.2%로 평년의 60.0%와 비교하여 18.8% 감소한 것으로 나타남에 따라, 논 농사를 위주로 하는 내륙지역의 경우 농업용수 공급에 큰 어려움을 겪었다(RIMS, 2012).

농업용수 수요 및 공급 측면에서 제주도는 전체 4,851개소 지하수관정 중 농업용이 3,316개소(약 68%)로 비중이 높은 반면, 권역별 관정분포는 농업활동이 활발한 서부와 남부지역에 각각 950개소와 1,620개소가 분포하여 북부와 동부지역의 456개소와 290개소에 비해 상당히 높아 지역적인 편차가 매우 크다(JWRMO, 2012). 지하수 이용량 측면에서 지난 12년간 월별 평균이용량은 서부지역이 1,046천m³/월로 가장 높은 반면, 동부지역이 332천m³/월로 가장 낮은 것으로 분석되었다(Song과 Choi 2012). 또한 향후 농업형태의 변화를 예측한 결과도 용수 수요량이 상대적으로 높은 시설재배작물의 면적이 급격하게 증가하는 것으로 나타남에 따라(Song과 Choi 2012; Choi 등, 2012), 권역별로 미래의 지하수자원 부존량 변화와 이를 이용한 수요량 변화 예측이 필수적이다. 또한 안정

적이고 지속적인 작물 생산을 위해서는 기후변화가 농업수자원에 미치는 영향에 대하여 정확히 파악하고, 이로 인해 발생할 수 있는 부정적 효과를 최소화하기 위한 연구가 필요하다. 특히 기온 상승, 강수량 및 강우강도 변화, 증발산량 등의 기후변화는 우리나라의 가뭄 발생의 양상에도 변화를 야기하게 될 것이다(IPCC, 2007). 따라서 현 상황을 바탕으로 미래에 발생할 가뭄에 대하여 예측하고, 그 취약성을 줄이기 위한 합리적인 계획이 필요하다. 즉 기후변화에 대처하기 위해서는 향후 발생할 수 있는 가뭄의 특성을 파악하여 미래 수자원 관리에 활용하기 위한 가뭄평가가 필요하다(Yoo, 2009).

따라서 본 연구에서는 농업용수의 지하수자원의 의존성이 매우 크고 수문계 변화에 민감한 제주지역에 대하여 권역별로 과거 기상자료와 2100년까지의 미래 기후변화 예측 자료(강수량과 기온)를 이용하여, 미래 수문상황과 가뭄을 평가한 후 이에 따른 농업용수의 영향을 고찰하였다.

2. 연구자료 및 방법

2.1. 대상 기상대 선정 및 미래 기상자료 생성

본 연구에서는 제주지역을 권역별(북부, 남부, 서부 및 동부지역)로 구분한 후 관측된 과거 기상자료와 격자별 미래 기상자료를 활용하여, 과거부터 현재, 미래까지 평균기온과 강수량의 변화를 분석하였다. 이를 위하여 과거 기상자료는 북부지역의 제주기상대, 남부지역의 서귀포기상대 및 서부지역의 고산기상대에서 관측된 평균기온과 강수량 자료를 활용하였다.

미래 기상자료의 경우 기상청의 기후변화정보센터(climate change information center, CCIC)에서 제공하는 2100년까지의 온실가스 배출 시나리오(SRES, special report on emissions scenarios, Nakićenović와 Swart, 2000) A1B 시나리오에 따른 일별 기상요소 예측치를 이용하였다(Fig. 1). CCIC에서는 전지구 기후변화 전망모델인 ECHO-G에 인위적 기후변화 강제력을 기초로 전지구 기후변화 시나리오를 산출하고 있다(CCIC, 2012). 이를 바탕으로 지역기후모델인 MM5를 이용하여 역학적 상세화를 통한 해상도 27×27km의 A1B 시나리오를 만든 후, 통계적 상세화

기법을 이용하여 해상도 10×10km인 고해상도 시나리오에 대해 2000년부터 2100년까지의 기후요소(일평균 최고, 최저, 평균 기온 및 월강수량)를 산출하여 제공하고 있다.

Fig. 1. Regional classification of Jeju Island with statistical downscaling grid(10×10 km) (modified from Song and Choi, 2012).

CCIC에서 제공하는 과거 기상자료와 미래 예측자료를 비교하기 위하여, 중첩되는 동일 기간(2000~2010년, 11년)에 대해 수집된 각각의 결과를 분석하였다. 그 결과 미래 기후변화 시나리오의 강수량은 과거 기상자료에 비해 전반적으로 6~8월의 월강수량이 약 10% 적게 모의(simulation)된 반면, 그 외의 경우에는 약 10~20% 많이 모의된 것으로 나타났다. 또한 기온의 경우에는 미래 예측된 온도가 과거 기상자료에 비해 약 0.5~2℃ 정도 높게 모의된 것으로 나타났다.

다. 따라서 본 연구에서는 Alcamo 등(1997)이 제시한 식(1), 식(2)와 같은 편의보정법(bias-correction method)을 이용하여 주요 입력 기상자료인 온도와 강수량의 편의보정계수를 계산하였다(Table 1).

$$T'_{GCM,fut} = T_{GCM} + (\bar{T}_{meas,his} - \bar{T}_{GCM,his}) \quad (1)$$

여기서, $T'_{GCM,fut}$ 는 보정된 미래 온도, T_{GCM} 는 모의된 미래 온도, $\bar{T}_{meas,his}$ 는 과거 11년(2000-2010) 동안의 관측된 연평균 온도, $\bar{T}_{GCM,his}$ 는 과거 11년(2000-2010) 동안의 모의된 연평균 온도이다.

$$P'_{GCM,fut} = P_{GCM} \times (\bar{P}_{meas,his} / \bar{P}_{GCM,his}) \quad (2)$$

여기서, $P'_{GCM,fut}$ 는 보정된 미래 강수량이며, P_{GCM} 는 모의된 미래 강수량, $\bar{P}_{meas,his}$ 는 과거 11년(2000-2010) 동안의 관측된 연평균 강수량, $\bar{P}_{GCM,his}$ 는 과거 11년(2000-2010) 동안의 모의된 연평균 강수량이다.

2.2. 가뭄평가

가뭄경향을 분석하기 위한 대표적인 방법은 관측된 기상자료를 이용하여 계산되는 표준강수지수(standardized precipitation index, SPI)와 파머가뭄지수(Palmer drought severity index, PDSI)이다. 일반적으로 토양 내의 수분함량은 강수에 즉각적으로 반응하는 반면 지표수 및 지하수는 상대적으로 장기간의 강수에 영향을 받기 때문에, 이러한 특성을 이용하여 대상기간

Table 1. Change factor for simulated temperature and precipitation under A1B scenario at three weather stations in Jeju Island

Station	Jeju		Seogwipo		Gosan	
	Temperature	Precipitation	Temperature	Precipitation	Temperature	Precipitation
January	-0.27	0.93	0.12	0.98	-0.53	0.91
February	-0.22	1.11	0.22	1.10	-0.38	1.08
March	0.04	1.21	0.31	1.24	-0.92	1.13
April	-0.13	1.09	-0.07	1.11	-1.41	0.97
May	-0.42	0.90	-0.07	0.96	-1.93	0.84
June	-0.50	1.03	-0.13	1.10	-2.36	0.98
July	-0.24	1.05	-0.05	1.09	-2.91	1.08
August	-0.35	1.01	0.02	1.11	-3.00	1.16
September	-0.76	0.95	0.11	1.00	-2.48	0.96
October	-0.75	1.09	0.01	1.06	-1.82	0.96
November	-0.50	0.89	-0.07	0.91	-1.22	0.92
December	-0.18	0.92	0.15	0.94	-0.62	0.83

중의 강수 확률분포를 정규분포로 활용할 수 있도록 고안된 SPI는 다양한 시간 간격에 따른 종류별 수자원의 이용가능성에 대한 가뭄의 영향을 반영할 수 있는 장점이 있다(McKee 등, 1993). 따라서 특정 기간에 대한 평균 SPI는 0이 되며, 가뭄은 연속적인 음수로 -1.0 이하에 도달하면 발생하고 양수가 되면 종료된다 (Table 2).

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

SPI value	Classifications
2.00 <	Extreme wet
1.50 ~ 1.99	Very wet
1.00 ~ 1.49	Moderately wet
-0.99 ~ 0.99	Near normal
-1.00 ~ -1.49	Moderate drought
-1.50 ~ -1.99	Severe drought
-2.00 >	Extreme drought

이에 비해 PDSI에서의 가뭄은 주어진 지점에서 실제 수분공급이 기후적으로 필요한 수분공급 보다 적은 기간이 지속되는 현상으로, 수요-공급 개념을 바탕으로 수분 공급의 편차를 측정하기 위하여 수분부족량과 수분부족 기간의 함수로 나타낸 것이다(Palmer, 1965). 이러한 PDSI는 물수지 분석을 통해 기후적으로 필요한 계산된 강수량과 실제 강수량과의 차인 수분편차를 산정한 후, 서로 다른 지역과 다른 월간의 수분편차의 기준을 같게 만들기 위해 수분편차를 보정하여 가뭄지수 결정하게 된다(Table 3).

Table 3. Classification of drought intensity using PDSI (Palmer, 1965)

Palmer value	Classifications
4.00 ≤	Extremely wet
3.00 ~ 3.99	Very wet
2.00 ~ 2.99	Moderately wet
1.00 ~ 1.99	Slightly wet
0.50 ~ 0.99	Incipient wet Spelt
0.49 ~ -0.49	Near normal
-0.50 ~ -0.99	Incipient drought
-1.00 ~ -1.99	Mild drought
-2.00 ~ -2.99	Moderate drought
-3.00 ~ -3.99	Severe drought
-4.00 ≥	Extreme drought

본 연구에서는 두가지 가뭄지수를 활용하여 가뭄 경향을 분석하였다. 이를 위하여 과거 기상자료는 북부지역의 제주기상대, 남부지역의 서귀포기상대 및 서부지역의 고산기상대에서 과거 1981년부터 2010년까지 30년간의 평균기온과 강수량 자료를 활용하였고, 제주 전체지역의 기후변화를 분석하기 위하여 3개 관측소를 이용한 티센망(Thiessen network) 형성 후 티센면적을 적용하여 제주 전체지역에 대한 평균기온, 강수량 및 가뭄지수를 각각 추정하였다. 미래 기상자료는 과거 기상자료와의 편의보정계수를 이용하여 2011년부터 2100년까지의 평균기온 및 강수량 자료를 보정한 것으로, 본 연구에서는 연도별 변화 및 2011~2040년(2025s), 2041~2070년(2055s), 2071~2100년(2085s)으로 구분한 각 30년 단위의 시기별 경향을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기온 및 강수량 경향 분석

제주도 내에서 장기간의 기상자료를 축적한 제주 및 서귀포기상대(1981~2010년, 30년)와 고산기상대(1988~2010년, 23년)에 티센망을 적용한 결과(Fig. 2), 전체지역의 최저와 최고 월평균기온은 각각 6.2℃(1월)와 26.7℃(8월)로 최소와 최대 월평균강수량은 각각 43.8mm(12월)와 264.0mm(8월)로 분석되었다 (Fig. 3).

Fig. 2. Three weather stations and Thiessen network based on statistical downscaling grid(10×10 km) with grid number from CCIC.

Fig. 3. Historical monthly mean temperature(a) and precipitation(b) at three weather station with estimated values over the whole area.

또한 북부지역에 위치한 제주기상대의 경우 겨울철(12~2월)의 월평균기온이 제주 전체의 월평균기온에 비해 상대적으로 낮게 나타난 반면 여름철(6~8월)의 월평균기온은 높게 나타났다.

제주, 서귀포 및 고산기상대의 연평균강수량은 각각 1497.5mm, 1923.0mm 및 1142.8mm로 남부지역의 서귀포기상대가 가장 많고 서부지역의 고산기상대가 가장 적은 것으로 나타났으며, 티센망 분석 결과 제주 전체지역의 연평균강수량은 1611.3mm로 추정되었다. 강수량이 가장 많은 남부지역의 최대 월평균강수량은 303.3mm(7월)로, 강수량이 가장 적은 서부지역의 경우 최대 월평균 강수량은 201.8mm(8월)로 나타났다.

기후변화에 따른 평균기온 및 강수량의 시기별 변화 경향은 과거 기상자료(1981~2010년, 1995s)와 편의보정된 미래 기상자료(2011~2040년, 2025s; 2041~2070년, 2055s; 2071~2100년, 2085s)로 구분하여 30년 단위로 분석하였다. 북부지역의 월평균기온은 시기가 지남에 따라 전체적으로 증가하며, 1995s의 월평균기온(26.8℃) 대비 미래 기상자료의 기온 증가가 가장 높은 월평균기온은 2025s, 2055s, 2085s에 각각 2.0℃, 3.9℃, 5.2℃ 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 4(a)). 강수량의 경우에는 시기가 지날수록 겨울철(12~2월)과 여름철(6~7월)의 강수량은 감소하는 반면 8~10월의 강수량은 증가하는 것으로 나타났다. 특히 강수량의 감소가 가장 큰 7월의 경우 1995s의 239.9mm 대비 83.8mm(2025s), 56.4mm(2055s), 85.6mm

(2085s)로 각각 감소하는 반면, 9월의 강수량은 1995s의 221.6mm 대비 52.0mm(2025s), 49.5mm(2055s), 110.3mm(2085s)로 각각 증가하는 것으로 나타났다.

서부지역의 1995s 대비 2025s의 2월 평균기온은 1.5℃로 가장 높게 증가하였고, 2055s, 2085s의 8월 평균기온은 1995s의 25.3℃ 대비 각각 2.9℃, 4.2℃ 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 4(b)). 강수량은 시기가 지날수록 봄철(4~5월) 강수량은 증가하는 반면, 여름철(6~7월) 강수량은 감소하였고, 8~10월에 현저하게 증가하는 것으로 나타났다. 특히 강수량의 감소가 가장 큰 7월의 경우 1995s의 178.0mm 대비 63.1mm(2025s), 34.3mm(2055s), 70.6mm(2085s)로 각각 감소하는 반면, 8월은 1995s의 201.8mm 대비 22.3mm(2025s), 56.1mm(2055s), 52.6mm(2085s)로 각각 증가하는 것으로 나타났다. 월평균 강수량의 증가가 가장 큰 경우는 2085s의 9월로 1995s의 116.2mm 대비 80.7mm까지 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 분석 결과는 향후 제주지역의 농업활동 변화 중 서부지역의 시설재배작물의 분포 면적이 증가함에 따른 용수 수요량 증가(Song과 Choi, 2012)를 해결할 수 있는 용수 공급방안의 정책적 대안 수립에 중요한 역할을 할 것으로 판단된다.

남부지역의 월평균기온은 전체적으로 증가하며, 1995s 대비 8월의 평균기온 증가가 가장 높아 2025s, 2055s, 2085s에 각각 2.1℃, 3.9℃, 5.3℃ 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 4(c)). 강수량은 시기가 경과함에 따라 12~2월과 6~7월에 감소하는 반면, 8~10월의

Fig. 4. Variation of simulated monthly mean temperature and precipitation at Jeju(a), Seogwipo(b), Gosan weather station(c), and the whole area(d).

강수량은 현저하게 증가하는 것으로 나타났다. 특히 강수량의 감소가 가장 큰 7월은 1995s 기간 대비 각각 147.1mm(2025s), 106.8mm(2055s), 143.1mm(2085s) 감소하는 것으로 나타나며, 강수량 증가가 큰 10월의 경우 1995s 대비 각각 36.8mm(2025s), 70.7mm(2055s), 48.8mm(2085s) 증가하는 것으로 나타났다.

제주지역 전체적으로 시기가 지날수록 월평균기온은 전체적으로 증가하며, 1995s 대비 기온 증가가 가장 높은 8월의 경우 2025s, 2055s, 2085s에 각각 1.8°C, 3.7°C, 5.0°C 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 4(d)). 강수량은 시기가 경과함에 따라 겨울철(12~1월)과 여름철(6~7월)에는 감소하는 반면, 4~5월과 8~10월에는 증가하는 것으로 나타났다. 특히 강수량의 감소가 가장 큰 7월은 1995s 대비 각각 98.9mm(2025s), 70.6mm(2055s), 99.3mm(2085s) 감소하는 것으로 나타나는 반면 증가가 큰 9월의 경우에는 각각 29.2mm(2025s), 26.3mm(2055s), 79.3mm(2085s) 증가하는 것으로 나타났다.

따라서 수자원의 98% 이상이 지하수인 제주도의 경우 지하수 수문계에 직접적인 영향을 미치는 강수량이 과거 30년 평균과 대비하여 전체적으로 풍수기는 강수량이 감소하는 반면 갈수기인 봄과 가을철에

강수량이 증가하는 것으로 나타났다. 결과적으로 제주도 전체적으로 예상되는 강수량 분포는 가뭄이나 집중 호우와 같은 극한기후사상(extreme event)의 출현의 계절적 변동과 더불어 강도(intensity) 변화가 동시에 수반되어 나타나는 것으로 판단된다(Fig. 5).

3.2. 가뭄 경향 분석 및 농업용수예의 영향 고찰

과거 가뭄(1981~2010년) 발생 경향 분석은 제주 및 서귀포기상대의 경우에는 30년 전체기간에 대하여 실시한 반면, 고산기상대는 1988년부터 2010년까지 23년을 대상으로 분석하였다. 또한, 제주지역 전체적인 가뭄 경향 분석은 Fig. 2와 같이 티센망을 활용하여 3개 기상대의 지배면적을 고려하였으며, 고산기상대의 자료가 미비한 7년(1981~1987년)은 제주 및 서귀포기상대의 지배면적을 고려하였다. 미래 가뭄(2011~2100년) 경향 분석은 격자별 미래 기상자료를 활용하여 3개 관측소가 포함된 격자의 자료를 활용하였으며, 제주지역 전체의 경우에는 격자별 티센면적을 활용하여 분석하였다.

과거 가뭄 현상 분석을 위하여 활용된 SPI 지속기간이 각각 3개월과 6개월인 SPI 3과 SPI 6을 이용하였으며, 극심한 가뭄(severe drought)을 지시하는 -1.5이하가 발생한 경우를 기준으로 분석하였다. 북부지역의 제주기상대를 대상으로 SPI 3을 이용하여 분석한 가뭄은 1984년(-1.17), 1996년(-1.01), 2005년(-0.87)으로 나타났으며, SPI 6의 경우에는 1996년(-1.30), 1984년(-1.10), 1997년(-1.01) 순서로 가뭄이 극심하였던 것으로 분석되었다. 월별로는 SPI 3과 SPI 6의 경우 각각 2005년 6월(-2.55)과 1988년 2월(-2.41)이 극심한 시기로 나타났다(Fig. 6(a)). 남부지역의 서귀포기상대에 대한 SPI 3과 SPI 6의 경우 가뭄은 각각 1984년(-1.43과 -1.34), 2000년(-0.88과 -1.06), 1988년(-0.78과 -0.77) 순서로 극심했던 것으로 나타났다. 월별로는 SPI 3과 SPI 6이 각각 2000년 4월(-2.57)과 1988년 2월(-3.01)로 가뭄이 가장 극심했던 것으로 분석되었다(Fig. 6(b)). 서부지역 고산기상대에 대한 SPI 3과 SPI 6의 결과는 두 경우 모두에서 1988년, 1989년, 1996년, 1997년, 2000년, 2001년, 2005년 봄과 겨울에 가뭄이 집중되는 경향이 나타났으며, 년도별 평균값은 각각 1988년(-1.04와 -1.20)에

Fig. 5. Possibilities of the quantile shift of seasonal rainfall density for change in season(a), change in intensity (b), and change in both(c) (modified from IPCC (2001a; 2001b)).

Fig. 6. Monthly standardized precipitation index(SPI) showing SPI 3(upper) and SPI 6(lower) with historical weather data(1981 to 2010) at Jeju(a), Seogwipo(b), Gosan weather station(c), and the whole area(d).

가뭄이 극심했던 것으로 분석되었다(Fig. 6(c)). 월별로는 SPI 3과 SPI 6이 모두 2000년 4월(-2.74와 -2.13)에 가장 심한 가뭄이 있었던 것으로 분석되었다. 제주 지역 전체에 대한 SPI 3은 1984년(-1.29), 2000년(-0.89), 1988년(-0.88), 1996년(-0.86), SPI 6은 1984년(-1.14), 1996년(-1.11), 1997년(-1.03), 2000년(-0.98), 1988년(-0.89) 순서로 가뭄이 극심하였던 것으로 나타났다(Fig. 6(d)). 월별로는 SPI 3과 SPI 6이 각각 2000년 4월(-2.74)과 1988년 2월(-2.79)로 가뭄이 극심했던 것으로 분석되었다.

기상대별로 SPI 3과 SPI 6의 연평균값을 비교한 결과, 제주지역 전체적으로 가뭄이 극심했던 해는 SPI 3

을 기준으로 1984년, 2000년, 1988년, 1996년, 2005년, 1997년 순서로 나타났다(Table 4). 특히 1984년과 2000년의 경우에는 남부지역이 상대적으로 가뭄이 극심했던 반면, 1988년은 서부지역이, 1996년에는 북부지역과 서부지역, 2005년에는 북부지역, 1997년에는 서부지역과 북부지역이 상대적으로 가뭄이 극심했던 것으로 나타났다. 또한 SPI 3과 SPI 6을 비교하면, 1984년의 경우는 두 경우 모두에서 가뭄이 가장 극심했던 것으로 나타나지만, 그 이하의 경우 SPI 3은 2000년, 1988년, 1996년, 2005년, 1997년 순서이며, SPI 6은 1996년, 1997년, 2000년, 1988년, 2005년 순서로 나타났다. 이는 상대적으로 장기간(6개월)의 강

Table 4. Summary of annual SPI 3 and SPI 6 with historical weather data at Jeju, Seogwipo, Gosan weather station, and the whole area

Year	SPI 3				SPI 6			
	Jeju	Seogwipo	Gosan	whole area	Jeju	Seogwipo	Gosan	whole area
1981	0.01	-0.16		0.12	0.06	-0.37		0.06
1982	-0.28	-0.36		-0.19	-0.05	-0.36		0.00
1983	-0.07	-0.05		0.08	-0.29	-0.28		-0.11
1984	-1.17	-1.43		-1.29	-1.10	-1.34		-1.14
1985	1.40	1.36		1.63	1.18	1.37		1.54
1986	0.01	-0.38		0.00	0.61	0.06		0.59
1987	0.16	-0.16		0.15	0.66	0.13		0.62
1988	-0.71	-0.78	-1.04	-0.88	-0.71	-0.77	-1.20	-0.89
1989	-0.01	-0.15	-0.03	-0.12	-0.39	-0.52	-0.55	-0.55
1990	0.19	0.88	0.35	0.50	0.05	0.75	0.31	0.36
1991	0.71	0.04	0.54	0.43	0.90	0.38	1.10	0.70
1992	-0.07	-0.16	-0.01	-0.13	-0.13	-0.40	-0.15	-0.31
1993	-0.01	0.50	0.09	0.19	-0.18	0.44	0.03	0.05
1994	0.04	-0.22	-0.51	-0.18	-0.11	-0.29	-0.55	-0.30
1995	-0.22	0.27	-0.40	-0.08	0.14	0.68	-0.43	0.25
1996	-1.01	-0.48	-0.94	-0.86	-1.30	-0.67	-1.20	-1.11
1997	-0.66	-0.42	-0.69	-0.65	-1.01	-0.77	-1.16	-1.03
1998	0.69	0.77	0.39	0.69	0.52	0.81	0.38	0.60
1999	0.62	0.69	0.92	0.67	1.04	1.19	1.30	1.09
2000	-0.76	-0.88	-0.55	-0.89	-0.79	-1.06	-0.69	-0.98
2001	0.02	-0.04	-0.10	-0.09	0.00	-0.10	0.00	-0.11
2002	0.23	-0.02	0.29	0.08	0.32	-0.15	0.31	0.06
2003	0.87	0.59	0.70	0.73	1.02	0.85	1.13	0.94
2004	-0.38	0.17	0.23	-0.08	-0.40	0.12	0.23	-0.13
2005	-0.87	-0.54	-0.57	-0.75	-1.00	-0.62	-0.63	-0.86
2006	0.21	-0.04	0.36	0.09	0.04	-0.19	0.47	-0.06
2007	0.65	0.07	0.18	0.31	0.48	-0.19	0.03	0.08
2008	0.07	-0.23	-0.29	-0.17	0.47	-0.08	-0.09	0.12
2009	-0.09	0.31	0.28	0.10	-0.37	0.35	0.06	-0.06
2010	0.40	0.79	0.59	0.58	0.37	0.88	0.80	0.60

수량을 기준값으로 사용하는 SPI 6의 특성 상, 1996년과 1997년은 상대적으로 장기간에 걸쳐 가뭄이 발생하였던 것으로 파악된다.

미래 가뭄 현상 분석은 각 기상대를 대상으로 30년 단위(2025s, 2055s, 2085s)로 SPI 3과 SPI 6을 이용하였다(Fig. 7). 북부지역 제주기상대와 서부지역 고산기상대의 경우 각각 SPI 3에서는 10~11월, SPI 6에서는 11~2월 기간에서 SPI가 증가함에 따라 가을 및 겨울가뭄이 점차 완화되는 것으로 나타났다. 남부지역의 서귀포기상대의 경우 SPI 3에서는 10~12월, SPI 6의 경우에는 11~2월 기간에서 SPI가 증가되는 것으로 분석되었다. 따라서 SPI 분석 결과 제주지역의 미래 가뭄 발생은 가을과 겨울의 가뭄이 점차 완화되는 것으로 나타나는데, 이는 강수량을 기초자료로 이용

하는 SPI 특성 상 가을과 겨울 강수량이 증가하는 미래 기후변화 자료의 영향을 받기 때문으로 판단된다.

PDSI를 이용한 과거 가뭄 현상 분석은 주요변수인 제주지역 전체 토양 특성을 고려한 유효토양수분량(available water holding capacity, AWC)을 이용하였다(Moon, 2011). 분석 결과 제주기상대와 서귀포기상대는 각각 1989년, 1997년, 1988년, 1984년, 1996년 순서와 1988년, 2000년, 1984년, 1989년 순서로, 고산기상대와 제주 전체적으로는 각각 1988년, 2000년, 1984년, 1989년 순서와 1989년, 1988년, 1997년, 2006년, 1996년, 2005년 순서로 가뭄이 극심한 것으로 분석되었다.

또한 기상대별로 PDSI의 연평균값을 비교한 결과 1984년에는 남부지역이 상대적으로 가뭄이 극심했던

Fig. 7. Monthly standardized precipitation index(SPI) showing SPI 3(upper) and SPI 6(lower) with simulated weather data for three periods at Jeju(a), Seogwipo(b), and Gosan weather station(c).

것으로 분석되며, 1988년, 1989년 가뭄의 경우에는 남부지역과 북부지역이, 1996년, 1997년 가뭄에는 서부지역이, 2000년에는 남부지역이, 2005년, 2006년에는 북부지역이 상대적으로 가뭄이 극심했던 것으로 나타났다(Table 5). 한편 월별로는 지역적으로 차이가 있지만 전체적으로는 9~11월 기간 중 PDSI 값이 낮아, 상대적으로 가을철에 가뭄이 극심했던 것으로 나타났다는데, 이는 제주지역의 지형적 특성으로 겨울철 강수량이 많아 봄가뭄은 상대적으로 적은 것으로 판단된다(Table 6).

미래 가뭄 현상 분석을 위하여 2011년부터 2100년까지 PDSI를 산정한 결과, 제주 전체지역, 제주기상

대, 고산기상대, 서귀포기상대 순서로 2000년대 후반으로 갈수록 가뭄이 극심해지는 것으로 나타났다(Fig. 8). 이러한 결과는 가뭄이 점점 완화된다는 SPI 결과와 배치되는데, SPI의 경우는 강수량만을 고려하는 반면 PDSI는 온도를 통해 산정되는 증발산량을 고려하고 있기 때문에 2000년대 후반으로 갈수록 온도 상승의 영향으로 증발산량이 많아지기 때문에 강수량 증가에도 불구하고 가뭄이 점점 심화되는 특성을 반영하기 때문으로 판단된다.

Table 5. Summary of annual PDSI with historical weather data at Jeju, Seogwipo, Gosan weather station, and the whole area

Year	Jeju	SGP*	Gosan	WA**	Year	Jeju	SGP	Gosan	WA
1981	0.44	0.02		0.43	1996	-1.37	-1.44	-3.44	-1.32
1982	-0.02	-0.91		0.24	1997	-2.15	-1.57	-3.59	-1.99
1983	-0.79	-0.95		0.20	1998	1.70	2.69	0.76	0.95
1984	-1.56	-2.28		-0.65	1999	1.08	1.40	2.20	0.58
1985	2.68	3.26		3.72	2000	-0.62	-2.44	3.09	-0.56
1986	3.95	2.03		4.50	2001	0.49	-1.35	0.31	0.20
1987	2.39	-0.96		2.24	2002	0.65	-0.25	0.44	0.41
1988	-1.96	-3.02	-0.55	-2.37	2003	2.08	2.40	1.87	1.96
1989	-2.25	-2.07	-1.01	-2.91	2004	-0.42	2.09	0.17	0.16
1990	0.55	2.42	0.51	1.22	2005	-1.22	-0.52	-0.62	-1.00
1991	2.20	1.34	0.67	1.17	2006	-0.01	-0.17	0.16	-1.75
1992	0.57	-1.57	-0.31	-0.44	2007	0.58	-0.21	0.11	-0.04
1993	-0.29	1.56	0.26	0.24	2008	1.08	0.00	0.24	0.87
1994	-0.17	1.44	-0.55	-0.23	2009	-0.55	0.39	-0.66	0.23
1995	-0.07	0.40	-2.26	0.07	2010	0.28	1.24	0.99	1.05

* Seogwipo, ** Whole area*

Table 6. Summary of monthly PDSI with historical weather data at Jeju, Seogwipo, Gosan weather station, and the whole area

Station	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	AM*
Jeju	0.24	0.31	0.37	0.44	0.30	0.46	0.49	0.43	0.06	-0.20	-0.08	0.09	0.24
SGP**	0.22	0.19	0.28	0.18	0.11	0.34	0.81	0.12	-0.12	-0.60	-0.33	0.01	0.10
Gosan	0.14	0.11	0.00	0.00	0.02	0.13	0.22	-0.04	-0.37	-0.63	-0.13	-0.07	-0.05
WA***	0.27	0.31	0.34	0.34	0.21	0.42	0.55	0.50	0.11	-0.24	-0.06	0.12	0.24

* Annual mean, ** Seogwipo, *** Whole area

Fig. 8. Monthly Palmer drought severity index(PDSI) with simulated weather data for three periods at Jeju(a), Seogwipo(b), and Gosan weather station(c).

4. 결 론

본 연구에서는 농업용수의 지하수자원 의존성이 매우 크고 수문계 변화에 민감한 제주지역에 대하여 과거 기상자료와 기후변화에 따른 미래 예측자료를 이용한 기후요소 변동성과 가뭄 영향을 분석하였다.

분석 결과 제주지역 전체적으로 월평균기온은 시간 경과에 따라 증가하는데, 가장 증가율이 높은 8월을 기준으로 과거 30년 평균(1981~2010년)과 비교하여 각 30년 기간평균(2011~2040년, 2041~2070년, 2071~2100년)값이 각각 1.8℃, 3.7℃, 5.0℃ 증가하는 것으로 분석되었다. 한편 월강수량은 겨울철(12~1월)과 여름철(6~7월)에 감소하는 반면, 4~5월과 8~10월에는 증가하는 것으로 나타났다. 또한 감소율이 가장 큰 7월은 과거 30년 대비 각 30년 기간에서 각각 98.9mm, 70.6mm, 99.3mm 감소하는 것으로 나타나지만, 증가율이 가장 큰 9월은 각각 29.2mm, 26.3mm,

79.3mm 증가하는 것으로 나타났다. 결과적으로 제주도 전체적으로 강수량 분포는 극사상의 시간적 변동과 더불어 강도 변화가 동시에 수반되어 나타나고 특히 갈수기인 봄과 가을철에 강수량이 증가함에 따라 권역별로 농업용수 수요 및 공급 정책에 본 연구결과와 활용이 필요할 것으로 판단된다.

특히 농업활동이 가장 활발하고 농업용수 수요가 큰 시설재배작물의 분포 면적이 증가하고 있는 서부지역의 경우 여름철(6~7월) 강수량은 감소하는 반면, 4~5월과 8~10월에 증가하는 것으로 나타남에 따라 향후 농업용수 수요량 증가 따른 공급방안의 정책적 대안 수립에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

미래 가뭄을 분석하기 위하여 2011년부터 2100년까지 SPI와 PDSI를 각각 계산한 결과, 제주지역 전체적으로 가뭄이 점차 완화되는 결과와 극심해지는 결과가 동시에 나타났다. 이러한 결과는 SPI가 일정 기간 동안의 총강수량만을 고려하고, 강수강도의 변화

는 반영하지 못하기 때문이다. 반면 PDSI는 증발산량을 동시에 고려하기 때문으로, 시간 경과에 따른 증발산량 증가로 가뭄이 점점 심화되는 특성을 반영하기 때문으로 판단된다. 특히 지역적으로는 북부와 서부 지역이 남부지역에 비해 가뭄이 심해지는 것으로 분석되어, 이에 대한 용수 공급정책 수립이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 제주지역을 권역별로 구분하여 미래 기후변화로 인한 영향에서 가장 취약한 분야인 농업분야(특히 수자원)에서 예상될 수 있는 가뭄을 평가하고 전망하였다. 결과적으로 본 연구결과는 제주지역에서 가까운 미래에 발생할 수 있는 부정적 효과를 최소화하기 위한 대응 전략 및 농업 수자원 정책의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업의 연구비 지원(10지역기술혁신B02, 제주수자원연구단)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Alcamo, J., Döll, P., Kaspar, F., Siebert, S., 1997, Global change and global scenarios of water use and availability: an application of WaterGAP 1.0. Report no. A9701, Centre for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany.
- 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.
- Byun, H. R., 2009, Drought diagnosis and comparative analysis of its system, J. Korean Soc. Hazard. Mitig., 9, 7-18.
- Choi, K. J., Song, S. H., Kim, J. S., 2012, Contemplation for estimation of regional agricultural water demand in Jeju Island, Proceeding of Korean Environmental Science Society Conference, Vol. 21, 2012, 379-381.
- Climate Change Information Center(CCIC), 2012, <http://www.climate.go.kr/>.
- IPCC, 2001a, Third Assessment Report - Climate Change 2001. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 397 p.
- IPCC, 2001b, Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 p.
- IPCC, 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. Pachauri and A. Reisinger, Eds., IPCC, Geneva, 102p.
- Jeju Special Self-Governing Province Water Resources Management Office(JWRMO), 2012, <http://www.jejuwater.go.kr/>.
- Kingwell, R., 2006, Climate change in Australia: agricultural impacts and adaptation, Australasian Agribusiness Review, 14, Paper 1. 29p.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J., 1993, The relationship of drought frequency and duration of time scales, 8th Conference on Applied Climatology, January, Anaheim, CA, 179-184.
- Moon, J. W., 2011, Development of drought index based on hydrologic characteristics and water supply system in Korea. Ph.D. thesis, Korea University, Korea.
- Nakićenović, N., Swart, R. (Eds.), 2000, Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge, 599p.
- O'Brien, K., Leichenko, R., Kelkar, U., Venema, H., Aandahl, G., Tompkins, H., Javed, A., Bhadwal, S., Barg, S., Nygaard, L., West, J., 2004, Mapping vulnerability to multiple stressors: climate change and globalization in India, Global Environ. Change, 14, 303-313.
- Palmer, W. C., 1965, Meteorological drought, 45, U.S. Weather Bureau.
- Rural Infrastructure Management System(RIMS), 2012, <http://rims.ekr.or.kr/>.
- Song, S. H., Choi, K. J., 2012, An appropriate utilization of agricultural water resources on Jeju Island with climate change(I), J. Soil Groundwater Environ., 17, 62-70.

- Song, S. H., Choi, K. J., Kim, J. S., 2012, Correlationship between groundwater level fluctuation and climate change with spring drought in 2012, Proceeding of workshop for 6th Jeju water resources management advancement, 47-68.
- Yoo, S. H., 2009, Analyzing agricultural drought affected by climate change. Ph.D. thesis, Seoul National University, Korea.