

기후변화와 관련한 제주지역 농업용수의 효율적 활용 방안(I)

송성호* · 최광준

한국농어촌공사 농어촌연구원

An Appropriate Utilization of Agricultural Water Resources of Jeju Island with Climate Change (I)

Sung-Ho Song* · Kwang-Jun Choi

Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

ABSTRACT

Rainfall, on Jeju Island varies regionally in relation to Mt. Halla with higher rainfall within southern area and lower in western area, and its variability is expected to expand according to the climate change scenario. Non-parametric trend analysis for rainfall, using both historic (1971-2010) and simulated (2011-2100) data assuming the A1B emissions scenario, shows regionally increasing trends with time. In perspective of agricultural land use, area for market garden including various crop types with high water demand is increasing over the Island, especially in the western area with lower rainfall compared to southern area. On the other hand, area for fruit including mandarin and kiwi with low water demand is widely distributed over southern and northern part having higher rainfall. These regional disparity of water demand/supply may be more affected by extreme events such as drought and heavy rainfall that has not yet been considered. Therefore, it is necessary to make policies for water resource management considering both demand and supply in different regions with climate change impacts over Jeju Island.

Keywords: Rainfall, Climate change, Agricultural, Water demand, Jeju Island

1. 서 론

기후변화(climate change)란 광의적인 의미로 현재의 기후계가 자연적인 요인과 인위적인 요인에 의해 점차 변화하는 현상을 말하며, 이 중 최근에 문제가 되는 기후변화의 주요한 요인은 인위적인 요인에 의해 기존의 기후변화 속도가 급격하게 증가하는 현상으로 정의될 수 있다. 이러한 기후변화에 따른 영향 중에서 지하수 수문계(hydrological system)의 변화는 광범위한 부분에서 관측되고 있으며, 수자원의 대부분을 지하수에 의존하는 지역의 경우 특히 민감한 문제가 발생되고 있다(IPCC, 2007; Bates et al., 2008).

이러한 기후변화에 따른 수자원의 영향을 객관적으로 평가하기 위해서는 과거의 수문변화 분석과 더불어 미래의 수문변동에 대한 합리적인 예측이 필요하다. 이러한 예측

은 기후변화에 대한 다양한 시나리오를 가정한 기후변화 모델을 이용하는데, 기후변화 모델은 전지구적인 기후모델(general circulation models, GCM)을 각국의 지역 기후모델(regional climate models, RCM)에 맞게 축소모사(downscale modeling)한 기법을 이용한다(Bates et al., 2008). 국가간 기후변화 패널(intergovernmental panel on climate change, IPCC, 2007)은 전세계적으로 1980~1999(20년간) 기간을 기준으로 2090~2099 기간 동안의 기온 상승을 B1, A1B 및 A2 시나리오별로 각각 1.8°C(1.1~2.9°C), 2.8°C(1.7~4.4°C) 및 3.4°C(2.0~5.4°C)로 예측하였으며, B1과 A2 시나리오를 각각 최선과 최악의 상황으로 제시한 바 있다. 또한 지구온난화로 인한 전지구적인 해수면 상승은 20세기 동안에 약 1.7 ± 0.5 mm/년으로 상승한 반면, 1961년부터 2003년까지 지난 43년 동안은 1.8 ± 0.5 mm/년으로 가속화되는 것으로 추정된 바 있다.

*Corresponding author : shsong84@hanmail.net

원고접수일 : 2012. 4. 12 심사일 : 2012. 4. 18 게재승인일 : 2012. 4. 18

질의 및 토의 : 2012. 6. 30 까지

우리나라의 경우 1931년부터 1960년까지 30년 동안 연평균 기온 12.6°C에 비해 1961년부터 1990년까지 30년 동안 0.4°C 상승하였으며, 이 중 1980년대와 1990년대 각각 1.1°C와 1.4°C로 상승폭이 커지고 있다(한국환경정책·평가연구원, 2006). 해수면 상승은 1968년부터 2007년까지 40년 동안 연평균 상승속도가 2.16 ± 1.71 mm/년으로, 앞서 제시한 유사한 기간 중 전세계 평균인 1.8 ± 0.5 mm/년의 상승속도에 비해 빠른 것으로 나타났다(김경호 외, 2009). 또한 한반도를 중심으로 동해안에 비해 남해안의 상승속도가 상대적으로 빠르며 특히 제주도 인근 지역의 상승이 가장 큰 것으로 제시하였다.

우리나라의 연평균강수량은 1961년부터 1990년 사이에 1,301.7 mm에서, 1991년부터 2000년 사이에 1,330.4 mm로 증가하는 것으로 분석된 바 있다(권원태 외, 2002).

본 연구에서는 이러한 다양한 기후변화의 영향이 제주지역의 수문계(여기서는 강수량, 지하수위)에 미칠 수 있는 영향을 분석하고, 특히 제주지역 지하수 관정의 약 66% 이상을 차지하는 농업용수의 수요·공급에 미칠 수 있는 다양한 영향들을 검토하였다. 이를 위하여 기상청의 기후변화정보센터(climate change information center, CCIC)에서 제공하는 2100년 까지의 일별 기상요소 예측치와 4곳의 기상관측지점에서의 과거 관측치를 이용하였다. 이러한 수문분석 결과를 토대로 수리·수문 조건이 유사한 뉴질랜드 사례를 기초로 제주지역 농업용수의 권역별 효율적 활용방안 제시 및 향후 전망에 대하여 검토하였다.

2. 연구방법

2.1. 기후변화 시나리오

기후변화 시나리오는 IPCC(2007)에서 제시한 4차 평가보고서에서 제시된 21세기의 경제활동 및 인구 변화 기준에 따른 온실가스 배출 시나리오를 4가지의 줄거리로 구분한 SRES(special report on emissions scenarios) 방법(Nakićenović and Swart, 2000)과, IPCC에서 2014년까지 작성 중인 5차 평가보고서에 포함될 인간의 사회-경제적(socio-economic) 활동, 온실가스 배출 및 기후변화 시나리오 등이 결합되어 설정된 온실가스 농도인 RCPs(representative concentration pathways) 방법으로 구분된다(IPCC, 2012). 이 중 SRES 방법에 의한 기후변화 시나리오는 온실가스 또는 에어로졸 변화 등 인위적인 변화에 따른 기후변화를 예측하기 위하여, 전지구적인 GCM을 각국의 지역 기후모델을 이용하여 기온, 강수량, 습도

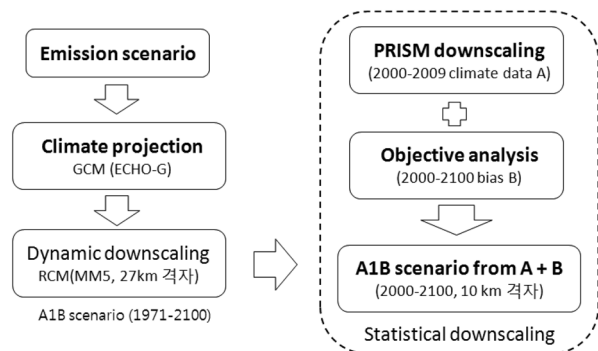


Fig. 1. Analysis of hydrology according to climate change (modified from CCIC (2012)).

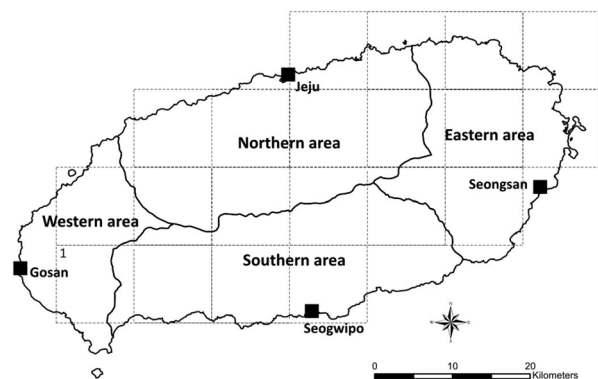


Fig. 2. Regional classification of Jeju Island based on administration unit with statistical downscaling grid (10 km × 10 km) drawn by dotted line.

및 바람 등의 미래 기후정보를 제공하고 있다. 우리나라는 CCIC에서 SRES 온실가스 배출 시나리오 중 A1B에 대하여 GCM을 이용한 역학적 상세화(dynamic downscaling)와 통계적 상세화(statistical downscaling) 방법인 PRISM(parameter-elevation regressions on independent slope model) 기법을 이용하여 각각 27 km × 27 km와 10 km × 10 km 격자망에 대한 자료를 제공하고 있다(Fig. 1).

본 연구에서는 SRES 온실가스 배출 시나리오 중 특정한 에너지원에 지나치게 의존하지 않고 모든 에너지원을 균형적으로 사용한다는 가정에 따른 A1B 자료에 대하여, 통계적 상세화에 의해 제공된 10 km × 10 km 격자망에 대한 2100년까지 일별 기상요소 예측치(강수량, 최고기온, 최저기온, 평균기온, 상대습도)를 이용하였다. 이때 분석 자료는 각 격자의 중심점에 해당하는 지점에 대한 기상요소로, 본 연구에서는 총 20개의 격자망에 대해 예측된 일별 기상요소에 대하여 자료 분석을 실시하였다(Fig. 2). 본 연구에서 사용된 권역구분은 통계연보에서 제공되는 농업통계와의 상관성 분석을 위하여, 기존의 수계에 따른

분류와 달리 행정구역별로 구분하였다. 또한 본 원고에서는 이러한 필요성을 기초로 2100년까지 예측된 일별 기상요소 예측치를 이용하여 제주지역 지하수 관정의 약 66% 이상을 차지하는 농업용수의 수요·공급에 미칠 수 있는 다양한 가능성을 분석하였으며, 또한 4곳의 기상관측지점(제주, 서귀포, 고산, 성산)의 과거의 관측치를 이용하였다.

2.2. 기후변화 시나리오에 따른 뉴질랜드 사례 분석

제주지역 지하수계에 대한 기후변화의 영향을 분석하기 위한 예비단계로, 수문자료가 풍부하고 수리지질 조건이 유사한 뉴질랜드 해안유역에 대한 분석 결과를 정리하였다. 뉴질랜드는 북북동-남남서 방향의 산맥이 발달된 지형적인 영향으로 동서지역의 기후가 매우 다르며, 지역 기후특성은 남반구의 특성 상 국토 전체적으로는 전지구적인 규모인 엘니뇨와 남방진동(El Nino and southern oscillation, ENSO)과 10년 주기의 태평양 진동(interdecadal pacific oscillation, IPO)의 영향을 지속적으로 받고 있다(Mullan et al., 2002). 또한 기후요소별 실측자료는 약 6,500개소에서 1850년 이래로 자료가 축적되어 있으며, 현재에도 600개소 이상의 기후관측소에서 기후요소별로 자료가 축적되고 있다. 기후변화 예측 결과는 광역적인 수문계에 해당하는 기상관측 지점에 대하여 2100년까지 SRES에 따른 각각의 시나리오 별로 기후요소(최고기온, 최저기온, 평균기온, 강수량, 상대습도, 태양복사, 풍속 등) 예측치가 일별 및 월별로 별도의 회원가입 절차 이후 무료로 제공되고 있다(NIWA, 2012).

본 연구에서 분석된 해안유역은 뉴질랜드 남섬 북부에 위치한 와이미아 평원(Waimea Plains) 지역으로 특정한 에너지원에 지나치게 의존하지 않고 모든 에너지원을 균형적으로 사용한다고 가정한 A1B 시나리오를 기준으로, 기온의 경우 1990~2040 기간과 1990~2090 기간 중에 각각 0.2~2.0°C(평균 0.9°C)와 0.6~5.0°C(평균 2.0°C)로 상승하며, 같은 기간 중에 강수량은 각각 -3~9%(평균 2%)와 -3~14%(평균 4%)로 시간 경과에 따라 상승폭이 증가하는 것으로 분석되었다(Zemansky et al., 2010). 또한 연구지역 대수층에 대한 기후변화의 영향을 분석하기 위하여 사용된 자료들은 연구지역 주변의 기후, 수문관련 실측자료(강수량, 온도, 증발산량, 태양복사, 상대습도, 하천유량, 하천수 수질, 지하수위, 지하수 수질, 해수면 변동) 및 각 시나리오별로 예측된 일별 최대 및 최소온도와 일별 강수량 자료이다. 이러한 장기관측자료들을 이용하여 대수층 내의 총 10개 관측점으로부터 약 30년 동안의 지

하수위 관측자료를 분석한 결과, 지하수위는 전체적으로 해수면 변화에 직접 영향을 받는 것으로 나타났다(Song and Zemansky, 2012). 그러나 평균해수면 상승이 전지구적인 변화와 유사한 상승폭(1.2 ± 2.4 mm/년)으로 나타남에도 불구하고 지역적인 편차가 크고 국부적으로 하강함에 따라, 비모수적(non-parametric) 경향성 분석 방법을 이용하여 해수면 변화에 따른 지하수위 변화를 분석하였다. 분석 결과 자유면 대수층의 경우 지하수위의 상승현상이 나타나는 반면, 피압 대수층의 경우에는 하강하는 것으로 나타났으며 변화폭은 -11.1 ± 12.3 mm/년으로 평가되었다. 또한 지하수위 변화가 하천유량 변화에 매우 밀접한 상관성이 나타나고 하천유량이 약 25% 감소되는 것으로 나타남에 따라, 기후변화에 의한 지하수위 변화에 대한 대책 수립이 필요한 것으로 밝혀졌다.

3. 연구결과 및 토의

3.1. 기후변화에 따른 수문요소 분석

기후변화에 의한 기상요소 중 수문계에 직접적으로 큰 영향을 미치는 요소는 강수량으로, 특히 농업활동에 있어서 강수량의 영향은 연평균 변화와 더불어 계절적인 분포 변화가 중요하다. 강수량 분포의 급격한 변화는 농작물 재배 형태에 대한 계절적인 취약성(vulnerability)이 크기 때문에(O'Brien et al., 2004; Kingwell, 2006), 제주지역과 같이 한라산을 중심으로 해발고도가 해안선에 평행한 경우 과거로부터 미래까지 권역별 강수량 분포에 대한 계절적인 경향성 분석이 필요하다. 이러한 분석에는 가뭄이나 집중호우와 같은 극사상(extreme event)의 시간적인 변동가능성뿐만 아니라, 강도(intensity)의 변화가 동시에 수반될 수 있기 때문에 두 요소에 대한 종합적인 검토가 중요하다(Fig. 3).

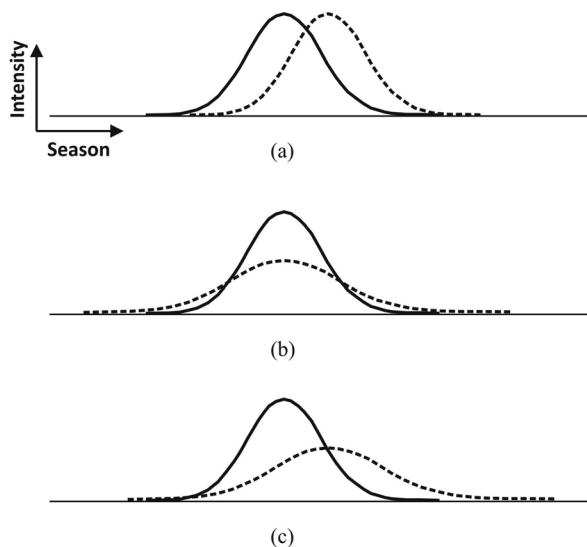
제주지역 4곳의 기상관측지점에 대한 월평균 강수량, 상대습도 및 기온자료를 이용하여 비모수적 통계분석을 실시한 결과, 강수량의 연간 변화는 관측기간이 짧은 성산지역(2007~2011, 4년간)을 제외하면 0.03~0.71 mm/년 상승하지만 통계적으로 무의미한 것으로 분석되었다(Table 1). 월평균 상대습도의 경우에는 성산지역을 제외하고 -0.2 ~ -0.4%/년으로 감소되며, 월평균 기온은 0.02~0.05°C/년 상승하는 것으로 분석됨에 따라 100년 후의 월평균 기온은 약 2~5°C 상승하는 것으로 예측되었다.

A1B 시나리오에 따른 예측치 분석을 위하여 Fig. 2에서 제시한 20곳의 격자망을 4개의 권역별로 평균값을 계산하였으며, 이를 이용하여 연평균 강수량과 기온자료에

Table 1. Results of non-parametric trend analysis for rainfall, relative humidity and mean temperature at four stations in Jeju Island with historic monthly data (1971-2010)

Stations	Sen's test				Mann-Kendall test			
	Slope	median	Min	Max	Trend	S ^a	n	Pro ^b
Rainfall (slope: mm/year)								
Jeju	0.03	-0.04	-	-	U	450	480	0.90
Gosan	0.71	-0.10	-	-	U	2254	276	0.14
Seogwipo	0.48	-0.14	-	-	U	4549	480	0.20
Seongsan	10.32	-10.76	-	-	U	98	48	0.39
Relative humidity (slope: %/year)								
Jeju	-0.35	-	-0.3	-	D	-40363	480	0.00
Gosan	-0.35	-	-0.22	-	D	-6679	276	0.00
Seogwipo	-0.20	-	-0.15	-	D	-22065	480	0.00
Seongsan	0.67	-0.78	-	-	U	86	48	0.45
Mean temperature (slope: °C/year)								
Jeju	0.04	0.00	-	-	U	5189	480	0.14
Gosan	0.02	-0.08	-	-	U	557	276	0.72
Seogwipo	0.05	0.01	-	-	U	7086	480	0.04
Seongsan	0.22	-1.18	-	-	U	24	48	0.84

D = downward, U = upward

^aMann-Kendall statistics^bStatistical significance**Fig. 3.** 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)).

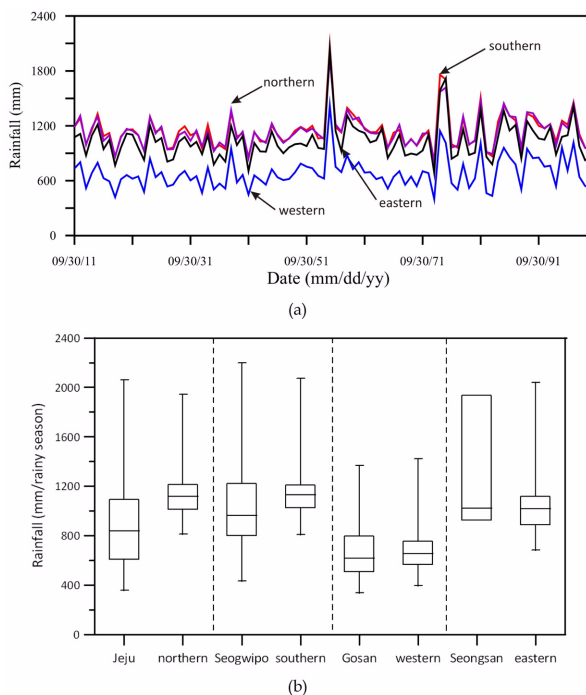
대한 비모수적 통계분석을 실시하였다. 분석 결과 강수량과 기온의 연간 변화는 전체적으로 각각 2.03~2.43 mm/년과 0.04°C/년 상승하는 것으로 분석됨에 따라 현재와 비교하여 2100년에 각각 약 200 mm와 4°C 증가하는 것으로 예측되었다(Table 2).

그러나 강수량의 경우는 앞서 언급한 바와 같이 계절별 편차발생 가능성이 있기 때문에, 현재의 강수량 기준으로 풍수기(6월~9월) 기간에 대하여 4곳에서 관측된 강수량과 4개의 권역별로 구분하여 예측된 강수량 분포에 대하여 분석하였다(Fig. 4). 풍수기 동안 총강수량의 변동은 2100년까지 15~20년 주기의 최대값이 나타나는데(Fig. 4(a)), 이는 우리나라가 포함된 북반구의 대표적인 기후변동 특성인 극진동(arctic oscillation, AO)이 강화되는 추세의 영향을 받는 것으로 판단된다(Gong and Ho, 2003). 또한 최근들어 AO 변동성이 증가됨에 따라 수반되는 다양한 기후변화의 변동성은 제주지역의 권역별 수자원 변동성에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 풍수기에 대한 권역별 예측치와 과거자료를 이용한 분석 결과 제주와 서귀포 관측소의 경우 과거 자료로 분석된 중앙값(median value)은 각각 836 mm와 963.5 mm인데 비하여, 예측값을 이용하여 분석된 북쪽과 남쪽권역의 중앙값은 각각 1,119.2 mm와 1,130.1 mm로 크게 증가하며 상대적으로 편차도 줄어드는 것으로 나타났다. 이에 비해 고산과 성산 관측소의 경우 과거 관측값에 대한 중앙값은 각각 615.8 mm와 1,022.6 mm로, 예측값으로 계산된 중앙값인 각각 654 mm와 1,015.6 mm에 비해 큰 변화가 없는 것으로 나타났다(Fig. 4(b)). 또한 월평균 강수량 관측자료 중 최대값과

Table 2. Results of non-parametric trend analysis for rainfall and mean temperature at 20 grid over Jeju Island with A1B simulated monthly data (2011-2100)

Regions	Sen's test				Mann-Kendall test			
	Slope median	Min	Max	Trend	S ^a	n	Pro ^b	Trend
Rainfall (slope: mm/year)								
Eastern	2.43	0.83	—	U	731	90	0.01	U
Western	2.39	0.88	—	U	727	90	0.01	U
Southern	2.03	0.51	—	U	623	90	0.01	U
Northern	2.43	1.12	—	U	867	90	0.00	U
Mean temperature (slope: °C/year)								
Eastern	0.04	0.04	—	U	3075	90	0.00	U
Western	0.04	0.04	—	U	3109	90	0.00	U
Southern	0.04	0.04	—	U	3085	90	0.00	U
Northern	0.04	0.04	—	U	3027	90	0.00	U

U = upward

^aMann-Kendall statistics^bStatistical significance**Fig. 4.** Trend of total amount of rainfall for four regions (a) and comparison of rainfall amount between historic and simulated data during rainy season (b).

최소값을 나타내는 서귀포와 고산관측소의 경우 각각 963.5 mm와 615.8 mm(차이 347.7 mm)로 나타나지만, 2100년까지 예측된 남부와 서부지역의 월평균 강수량은 각각 1,130.1 mm와 654.0 mm(차이 476.1 mm)로 향후 강수량의 편차가 더 커지는 것으로 분석되었다.

3.2. 농업형태 변화 추세 분석

최근들어 농작물의 재배 형태는 기후변화에 따른 기온 상승의 영향, 국가 단위의 정책적인 변화 또는 소비자의 생활수준 변화 등의 주요한 요인들에 의해 복합적인 영향을 받는다. 이러한 농작물 재배 형태의 변화는 용수이용 측면에서 지하수자원의 효율적인 수요·공급 방식의 변화가 수반되어야 한다. 따라서 지하수자원의 수요와 공급 형태의 변화 가능성을 고려하기 위하여, 제주지역 전체와 4개의 권역별로 농작물 재배 형태별 면적변화 추세를 분석하였다. 이를 위하여 농작물 재배 형태를 식량작물(grain: 미곡, 맥류, 잡곡, 두류, 서류), 시설재배작물(market garden: 수박, 참외, 토마토, 오이, 호박, 참외, 시금치 등), 화훼작물(horticulture: 절화류, 분화류, 난류, 관상수류 등) 및 과일류(fruit: 감귤, 파인애플, 단감, 키위 등)로 구분하였다.

4가지 주요한 농작물 재배 형태에 따른 토지이용 면적은 10,484~13,324 ha로 권역별로 비교적 고르게 분포하는 것으로 나타났다(Table 3). 그러나 용수 수요량이 상대적으로 높은 시설재배작물의 분포 면적은 동부와 서부지역의 경우 각각 5,248 ha와 4,937 ha로 전체면적의 42%와 38%로 나타남에 따라, 북부와 남부지역의 각각 2,854 ha와 417 ha인 전체면적의 27%와 3%에 비해 매우 높은 것으로 나타났다(Fig. 5).

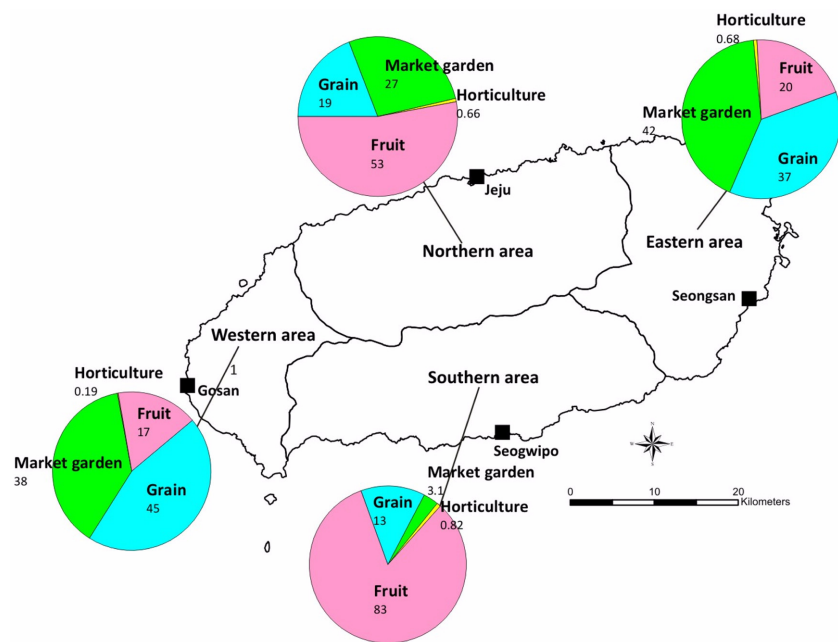
이에 비해 용수 이용량이 상대적으로 적은 과일류의 경우 북부와 남부지역의 경우 각각 5,555 ha와 11,034 ha로 전체 재배면적의 53%와 83%를 차지하는 반면, 동부와 서부지역의 경우에는 각각 2,544 ha와 2,154 ha로 전체의

Table 3. Land area for main four classes of land use in 2009

(unit: ha)

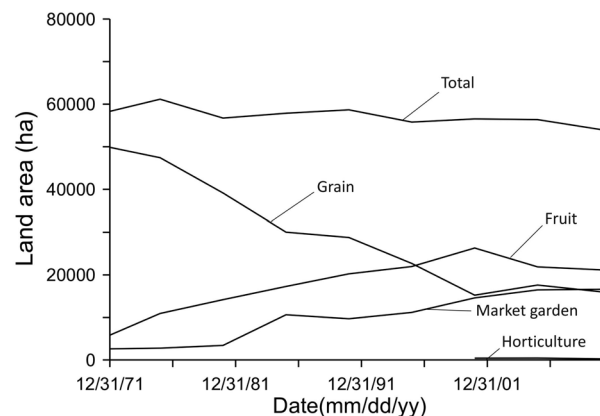
Region	Total	Grain	Market garden	Horticulture	Fruit
Eastern	12,517.6	4,639.5	5,248.4	85.7	2,544.0
Western	12,955.2	5,840.3	4,937.0	24.1	2,153.8
Southern	13,324.1	1,764.0	416.8	109.6	11,033.7
Northern	10,484.1	2,005.9	2,854.2	68.9	5,555.1
Total	49,281.0*	14,249.7	13,456.4	288.3	21,286.6

*These data show some discrepancies due to the difference of data source.

**Fig. 5.** Distribution of main four classes area of crop type for each region.

20%와 17%에 비해 상대적으로 매우 높은 것으로 나타났다. 따라서, 과실류의 경우 용수 이용량이 매우 적은 감귤이 차지하는 비율이 약 98%인 것을 고려하면(제주발전연구원, 2009), 북부와 남부지역의 용수 수요량이 동부와 서부지역에 비해 상대적으로 낮을 것으로 판단된다.

Table 4는 제주지역의 농업활동과 관련하여 농작물 재배 형태에 따른 토지이용 면적 변화를 정리한 것으로, 연간 재배면적 중 식량작물은 1971년에 비해 급속한 감소가 나타나지만 시설재배작물은 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 6). 이러한 변화 추세는 식량작물에 비해 화훼 및 시설재배작물의 경우 단위재배 면적에 비해 상대적으로 소득이 높고, 용수 이용량도 약 60% 낮기 때문으로 분석된다(송성호 외, 2012). 제주특별자치도의 경우 아직까지 작물별로 이용되고 있는 용수량의 정확한 분석 결과가 없지만, 제주도와 유사한 뉴질랜드의 경우 1 m³의 지하수이용량에 대한 낙농업, 시설재배작물, 화훼작

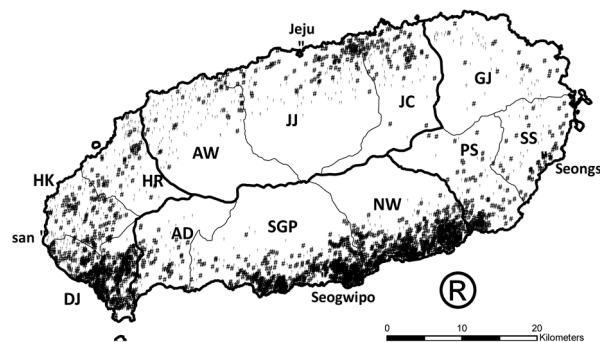
**Fig. 6.** Annual land area variation for main four classes of crop type over Jeju Island.

물의 소득이 각각 3.24, 24.80, 28.89 NZ\$로 시설재배작물과 화훼작물의 생산성이 상대적으로 높은 것으로 제시된 바 있다.

Table 4. Annual land area variation for main four classes of land use

(updated from JDI (2009), unit: ha)

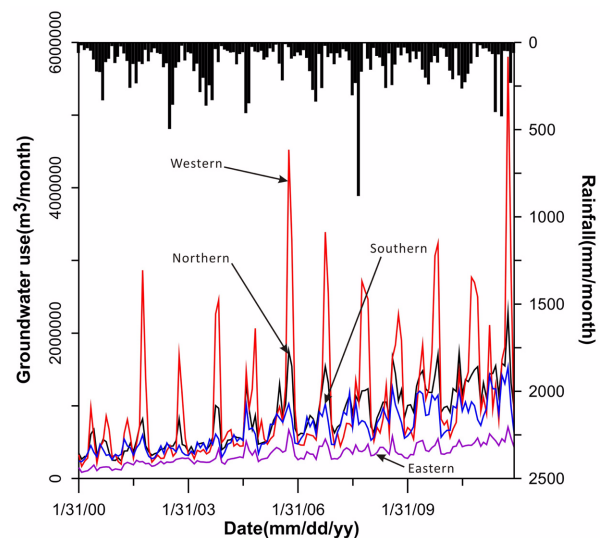
Year	Total	Grain	Market garden	Horticulture	Fruit
1971	58,329	49,874	2,613	—	5,842
1975	61,163	47,443	2,785	—	10,935
1980	56,734	39,144	3,426	—	14,164
1985	57,885	30,023	10,607	—	17,255
1990	58,692	28,772	9,683	—	20,237
1995	55,786	22,662	11,166	—	21,958
2000	56,535	15,227	14,604	408	26,296
2001	54,918	15,231	13,361	434	25,892
2002	55,290	16,727	12,438	442	25,683
2003	54,317	13,894	14,986	416	25,021
2004	51,579	13,903	14,755	433	22,488
2005	56,392	17,590	16,470	471	21,861
2006	54,145	16,350	15,639	347	21,809
2007	51,958	14,539	15,312	343	21,764
2008	51,509	14,285	15,504	351	21,369
2009	53,354	16,349	15,431	286	21,288
2010	54,062	16,014	16,602	264	21,182

**Fig. 7.** Distribution of production wells for agriculture both public (closed circle) and private (closed triangle) over four regions of Jeju Island.

결과적으로 단위 재배면적에 대한 소득을 고려하는 경우 향후 시설재배작물 면적은 지속적으로 상승할 것으로 예측되며, 이러한 농작물 재배 형태 변화는 용수 이용량의 변화가 반드시 수반될 것으로 판단된다.

3.3. 농업용수 이용량 변동과 농업형태 변화

2011년말 기준으로 제주도 전역에서 이용 중인 지하수 관정은 총 4,851개소로 이 중 약 68%인 3,316개소가 농업용 관정이다(제주특별자치도 수자원본부, 2012)(Table 5와 Fig. 7). 관정 분포는 남부지역(서귀포시, 안덕면, 남원읍)이 1,620개소로 가장 많은 반면 동부지역(구좌읍, 성산읍, 표선면)이 290개소로 가장 적다. 지역전체가 다른 지역과 달리 평탄한 서부지역(한림읍, 한경면, 대정읍)의 경

**Fig. 8.** Monthly agricultural groundwater use from public production wells for each region over the past 12 years (2010-2011) compared to the monthly rainfall amount at Jeju weather station.

우는 950개소가 분포하며, 북부지역(제주시, 애월읍, 조천읍)은 456개소가 분포한다. 이 중 공공관정은 전체의 약 27%인 884개소로, 서부지역이 308공으로 가장 많은 반면 동부지역이 117공으로 가장 적다.

이용량 자료가 상대적으로 정확한 공공관정을 대상으로 지난 12년 동안 계산된 월별 평균이용량은, 서부지역이 1,046,089 m³/월로 가장 높은 반면 동부지역은 332,072 m³/월로 가장 낮은 것으로 나타났다(Fig. 8). 그러나 중간

Table 5. Statistics of production wells for agriculture both public and private over four regions of Jeju Island

Regions	Total	Public	Private	Regions	Total	Public	Private
Northern				Southern			
JJ	167	70	97	SGP	789	103	686
AW	151	116	35	AD	108	48	60
JC	138	47	91	NW	723	75	648
Total	456	233	223	Total	1,620	226	1,394
Western				Eastern			
HR	112	65	47	GJ	66	50	16
HK	208	111	97	SS	78	32	46
DJ	630	132	498	PS	146	35	111
Total	950	308	642	Total	290	117	173

Table 6. Results of non-parametric trend analysis for monthly groundwater use from public wells over the past 12 years (2000-2011)
(unit: m³/month)

Regions	Sen's test				Mann-Kendall test			
	Slope median	Min	Max	Trend	S ^a	n	Pro ^b	Trend
Eastern	30,254	27,805	–	U	6,920	144	0.00	U
Western	73,347	60,420	–	U	4,518	144	0.00	U
Southern	66,834	59,764	–	U	6,502	144	0.00	U
Northern	93,622	83,429	–	U	6,731	144	0.00	U

U = upward

^aMann-Kendall statistics^bStatistical significance

값의 경우에는 북부지역이 821,841 m³/월로 서부지역의 702,043 m³/월 보다 높게 나타나고, 서부지역의 경우는 월별 이용량이 강수량이 상대적으로 적은 기간 중에 집중적으로 증가되는 것으로 나타났다. 비모수적 통계기법을 이용하여 계산된 4곳의 권역별 월별 이용량 증가율은 북부와 서부지역이 각각 93,622 m³/월과 73,347 m³/월로, 동부지역의 30,254 m³/월에 비해 매우 높은 것으로 나타났다 (Table 6). 이러한 권역별 용수 이용량을 제주지역 전체적으로 분석하면 Table 4에서 제시한 바와 같이 용수 수요량이 상대적으로 많은 시설재배작물의 급격한 증가와 더불어 용수 수요량이 상대적으로 적은 과실류의 감소현상과 일치하는 것으로 분석된다. 또한 관측된 월평균 강수량과 농업형태별 농작물 재배 면적의 분포에서 분석된 바와 같이, 서부지역의 경우 용수 수요량이 많은 시설재배작물의 재배 면적이 북부와 남부지역에 비해 상대적으로 높은 것도 앞서의 분석 결과를 뒷받침하는 것으로 판단된다.

결국 이러한 이용량의 분포 양상은 북부와 서부지역의 지하수위 하강이 동부와 남부지역에 비해 상대적으로 높은 것으로 제시된 기존의 결과를 고려할 때(Lee et al., 2007), 향후 지하수 함양과 관련한 강수량의 변동 등 지하수자원과 관련한 정책적인 고려가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 기후변화를 고려한 제주지역 농업용수의 효율적 활용을 위한 방안 제시를 목적으로, 기후변화에 따른 수문요소 변동성, 권역별 농업형태 및 용수 이용량 등을 종합적으로 분석하였다. 이때 구분된 4곳의 권역은 기존의 수계에 따른 권역과 달리 행정적인 통계자료와의 상관성 분석을 위하여 행정구역에 따라 구분하였다.

지하수 수문계에 직접적으로 영향을 미치는 월평균 강수량의 경우 풍수기에 남부와 서부지역에서 각각 관측된 최대와 최소값의 차이가 시간이 경과함에 따라 더욱 커지는 것으로 분석되었다. 특히 예측된 강수량의 경우 북부와 남부지역에서 절대값이 증가하는 반면 서부지역의 경우 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

농업형태의 경우 제주지역 전체적으로 용수 수요량이 상대적으로 높은 시설재배작물 재배 면적이 다른 작물재배 면적에 비해 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 재배면적의 권역별 분포면적은 강수량이 가장 적은 서부지역의 경우 용수 수요량이 높은 시설재배작물 위주인 반면 강수량이 상대적으로 풍부한 남부지역의 경우 용수 수요량이 상대적으로 낮은 감귤 위주의 과실류 재배 면적이

상대적으로 넓은 분포를 차지하고 있다.

농업용수 이용의 측면에서 지하수 관정의 분포는 남부와 서부지역에 주로 집중적으로 분포하지만 공공관정의 경우 서부지역이 가장 많은 것으로 나타났다. 이용량 자료가 확보된 공공관정을 이용하여 분석된 이용량은 서부와 북부지역이 많은 것으로 분석되었는데, 특히 서부지역의 경우에는 갈수기에 집중적으로 지하수를 사용하는 것으로 나타났다. 이러한 집중적인 지하수 이용은 지하수위 강하와 직접적으로 연결되는데, 이는 기존 연구에서 제시된 지하수 하강 현상이 서부와 북부지역에 집중되는 결과와 일치된다.

결과적으로 수문계 변화에 민감한 농업활동의 경우 앞서 뉴질랜드의 사례에서 제시한 바와 같이 기후변화 시나리오에 따른 지하수 수문계의 변동성의 예측이 매우 중요하며, 특히 지하수자원에 의존성이 매우 큰 제주지역의 경우 기존의 농업현황 분석을 토대로 기후변화에 따른 사회-경제적 변동 가능성에 근거하여 작물 생산량 변화, 경지면적 증가, 재배작물별 상관관계 및 용수 이용량 등을 종합적으로 분석하는 것이 필요하다.

사 사

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

참 고 문 헌

- 권원태, 안기효, 최영은, 2002, 최근 한국의 10년 기후특성 분석, 한국기상학회지, **12**, 451-454.
- 김경호, 신지연, 고은희, 고기원, 이강근, 2009, 지구온난화에 따른 제주도 근해의 해수면 상승과 제주도 동부 지역 지하수의 염수대 변화, 지하수토양환경, **14**(3), 68-79.
- 송성호, White, P., Zemansky, G., 2012, 지하수자원의 경제적 가치 평가 적용과 관련한 최근동향, 지하수토양환경, **17**(2), 1-6.
- 제주발전연구원(JDI), 2009, 제주지역 용수수요 전망과 수자원 보전 · 관리계획에 관한 연구, p. 161.
- 제주특별자치도 수자원본부, 2012, <http://www.jejuwater.go.kr/>.
- 한국환경정책 · 평가연구원, 2006, 기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축 II.
- Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., and Palutikof, J.P., 2008, Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 200 p.
- CCIC, 2012, <http://www.climate.go.kr/>.
- Gong, D.Y. and Ho, C.H., 2003, Arctic oscillation signals in the East Asian summer monsoon, *J. Geophys. Res.*, **108**, 4066.
- 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, p. 881.
- 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, p. 102.
- IPCC, 2012, <http://www.ipcc.ch/>.
- Kingwell, R., 2006, Climate change in Australia: agricultural impacts and adaptation, *Australasian Agribusiness Review*, **14**, Paper 1. 29 p.
- Lee, J.Y., Lee, G.S., and Song, S.H., 2007, An Interpretation of changes in groundwater level and electrical conductivity in monitoring wells in Jeju Island, *Journal of Korean Earth Science Society*, **28**, 925-935.
- Mullan, A.B., Wratt, D.S., and Renwick, J.A., 2002, Transient model scenarios of climate changes for New Zealand, *Weather and climate*, **21**, 3-34.
- Nakićenović, N. and Swart, R. (Eds.), 2000, Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge, p. 599.
- NIWA, 2012, <http://cliflo.niwa.co.nz/>.
- O'Brien, K., Leichenko, R., Kelkar, U., Venema, H., Aandahl, G., Tompkins, H., Javed, A., Bhadwal, S., Barg, S., Nygaard, L., and West, J., 2004, Mapping vulnerability to multiple stressors: climate change and globalization in Indis, *Global Environmental Change*, **14**, 303-313.
- Song, S. and Zemansky, G., 2012, Groundwater level fluctuation in the Waimea Plains, New Zealand: Change in a coastal aquifer over the last 30 years, *Environmental Earth Science*, in revision.
- Zemansky, G., Hong, T., White, P., Song, S.H., Timar, L., and Thorstad, L., 2010, Framework for Assessment of Climate Impacts on New Zealand's Hydrological Systems, GNS Science Report 2010/57. p. 263.