



미래 수요예측을 통한 제주도 농업용수 회복탄력적 공급 방안에 관한 연구

A Study on the Resilient Supply of Agricultural Water in Jeju Island by Forecasting Future Demand

고재한^a · 정민혁^b · 범진아^c · 성무홍^d · 정형모^e · 유승환^f · 윤광식^{g,†}

Go Jea-han · Jeung Minhyuk · Beom Jina · Sung Mu-hong · Jung Hyoung-mo · Yoo Seung-hwan · Yoon Kwang-sik

ABSTRACT

Resilience is the capacity to maintain essential services under a range of circumstances from normal to extreme. It is achieved through the ability of assets, networks, systems and management to anticipate, absorb and recover from disturbance. It requires adaptive capacity in respect of current and future risks and uncertainties as well as experience to date. The agricultural infrastructures with high resilience can not only reduce the size of the disaster relatively, but also minimize the loss by reducing the time required for recovery. This study aims to evaluate the most suitable drought countermeasures with the analysis of various resilience indices by predicting future agricultural water shortage under land use and climate change scenarios for agricultural areas in Jeju Island. The results showed that the permanent countermeasure is suitable than the temporary countermeasures as drought size and the cost required for recovery increase. Wide-area water supply system, which is a kind of water grid system, is identified as the most advantageous among countermeasures. It is recommended to evaluate the capability of agricultural infrastructure against drought with the various Resilience Indices for reliable assessment of long-term effect.

Keywords: Agricultural water demand; resilient index; climate change

1. 서론

최근 전 지구적인 문제로 대두되고 있는 기후변화는 인위적인 요인에 의해 기존의 기후변화 속도가 급격하게 증가하는 현상으로 정의될 수 있다. 이러한 기후변화는 강수량의 연평균 변화와 더불어 계절적인 분포의 변화를 가속화시키고 있다 (IPCC, 2007). 기후변화의 영향 중 가뭄은 특히 농작물의

작부체계와 관련된 농업활동에 민감한 영향을 미치게 된다 (O'Brien et al., 2004; Kingwell, 2006). 가뭄은 홍수에 비해 점진적이고 예측이 가능한 수문학적 요인이지만, 발생시에는 피해 범위가 광범위한 특징이 있다 (Kim, 2016). 농업부문에서의 가뭄영향은 단계적으로 발생되는데, 농작물 생산량 감소 및 생활용수 확보의 어려움으로 시작되어 농가의 자산 또는 토지의 매도 압력 등 사회적 영향으로 발전한다 (Ribot, 1996).

수자원의 대부분을 지하수에 의존하는 지역은 가뭄에 특히 취약하다 (IPCC, 2007; Bates et al., 2008). 특히 제주도는 수자원의 98% 이상을 지하수에 의존하기 때문에 기후변화에 따른 가뭄과 그 영향에 대해 지속적인 관심과 연구가 필요한 실정이다 (Song and Choi, 2012a). 제주도는 육지부에 비해 강수량이 풍부하지만, 화산섬으로서 투수성이 높은 현무암질 화산암을 기반으로 형성되어 있어 총 강우량의 약 절반이 지하로 침투되어 수자원의 대부분이 지하수 형태로 부존되는 특징이 있다 (Jung et al., 2009). 제주도에서 전체 지하수 관정의 약 65% 이상이 농업용인 상태에서, 최근 소득수준이 높은 밭작물 재배가 늘어나면서 용수수요는 지표수공급방식보다는 사계절 용수공급을 위한 지하수자원의 수요량이 급증하고 있다 (Seo et al., 2019). 제주도는 동서남북 권역별로 작물재배 특성이 상이하여 시기별로 작부체계의 차이가 많으며, 이에 따른 농업용수 수요량도 시기별 지역별로 차이가 많이 나타난다 (Choi et al.,

^a Deputy Director, Chonnam Regional Headquarter, Korea Rural Community Corporation (KRC)

^b Mr Student, Department of Rural and Bio-Systems Engineering, Chonnam National University

^c MS Student, Department of Rural and Bio-Systems Engineering, Chonnam National University

^d Deputy Director, Chonnam Regional Headquarter, Korea Rural Community Corporation (KRC)

^e Deputy Director, Project planning Office, Korea Rural Community Corporation (KRC)

^f Associate Professor, Department of Rural and Bio-Systems Engineering, Chonnam National University

^g Professor, Department of Rural and Bio-Systems Engineering, Chonnam National University

[†] Corresponding author

Tel.: +82-62-530-2158, Fax : +82-10-3081-5320

E-mail: ksyoon@chonnam.ac.kr

Received: 09 April, 2020

Revised: 25 May, 2020

Accepted: 25 May, 2020

2013). 따라서 제주도 농업 부문에서의 가뭄 피해를 최소화하기 위해서는, 정량적인 자료 분석을 통한 미래 가뭄의 시공간적인 불확실성의 평가 및 대처 계획 수립이 매우 중요하다.

따라서, 여러 연구자 (Holling, 1973; NIAC, 2009; Vugrin et al., 2010)는 재해의 크기와 지속시간을 줄이는 능력을 정량화하기 위해 회복탄력성 (resilience) 개념을 도입하였다. Vugrin and Camphouse (2011)는 각종 재해의 피해의 규모를 경감시킬 뿐만 아니라 복구에 소요되는 시간을 줄여 사회적 손실을 최소화하기 위해 회복탄력성 분석의 필요성을 강조하였다. Yu et al. (2012)는 재해에 따른 피해비용과 복구비용의 합을 회복탄력성 비용으로 정의하고 일정규모 이상의 재해가 발생하여 지역사회에 입힌 피해를 비용으로 환산한 것을 피해 비용, 발생한 피해를 회복시키기 위해 소요되는 비용을 복구비용으로 정의하였다. 특히 Park et al. (2018)은 농업생산기반시설 분야에 자연재해에 의한 피해를 저감시키기 위한 다양한 구조적 대안 (structural alternatives)의 회복탄력성을 평가하였다. 하지만, Kim et al. (2011)은 계획범위를 초과하거나 예측 불가능한 재해를 복구하는 방안 마련을 위해서는 비구조적 대안에 대한 고려가 필요하다고 주장하였다.

위와 같이 기후변화에 대한 수자원 취약성 분석과 회복탄력성에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있으나, 지하수를 주로 이용하는 농업용수 영향까지 종합적으로 고려한 연구는 부족한 실정이다. 아울러 기후변화와 토지이용변화로 인한 가뭄 피해를 고려하여 회복탄력성을 정량적으로 평가한 연구는 찾아보기 어렵다. 기존 연구에서는 기후변화 시나리오를 적용하여 강수량, 기온, 증발산량 등의 변화에 따른 농업용수 부족량을 산정하는 데에 초점을 두었으나 (Song et al. 2012b), 이는 토지이용변화와 같은 농업용수에 직접적인 영향을 주는 측면을 고려하지 않아 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 기후변화와 미래토지이용변화에 따른 제주도의 미래 농업용수 부족량에 따른 대응방안을 도출하여 부족량에 대해 회복탄력적인 대안 평가 방법을 제안하고자 한다.

II. 재료 및 방법

분석 절차로는 제주도의 수자원 기초데이터 (관정, 저수지, 용천수 등 기확보수량과 과거 기상자료)와 기후변화 시나리오 (RCP 4.5, 8.5)를 바탕으로 농업용수 부족량을 산정하여 구조적 대안 (관정개발, 포강개발, 지표수개발, 광역화)을 설정하였다. 기후변화 시나리오별 수자원공급 대안별 회복탄력성 비율, 지속가능성 지수, 내구성-비용지수를 도출하여 각 대안별 회복탄력성에 따른 농업용수 확보방안의 효율성을 평가하였다.

1. 대상지역

제주도의 경우 육지부와 달리 화산섬의 지형 및 지질 특성, 그리고 상시 유출되고 있는 하천이 없어 저수지와 같은 지표수원 개발이 어려운 특성을 가지고 있다. 대부분의 하천은 남북방향으로 발달하였지만 상시하천이 거의 없기 때문에 대부분의 수자원은 지하수에 의존하는 실정이다. 제주도의 하천은 우기 또는 집중 강수 시 유출되는 특성이 있으며, 화산암의 특징으로 인해 강수의 함양이 매우 빠르게 진행된다 (KRC, 2005). 이 연구에서는 제주시 권역과 서귀포시 권역으로 구분하여 연구를 실시하였다.

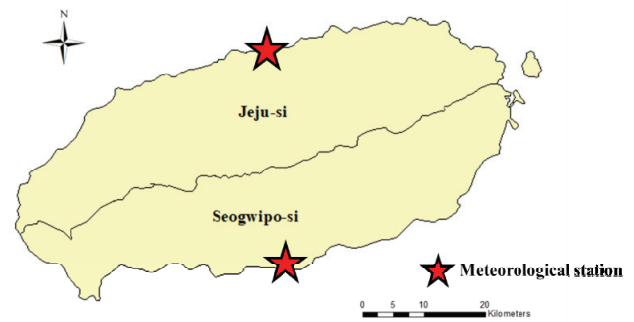


Fig. 1 Layout of the study sites

2. 농업용수 수요량 및 부족량 산정

가. 과거기상자료와 기후변화 시나리오

제주도는 2개의 관측소 (제주, 서귀포)에 대해 과거 기상자료 (1990~2019년) 강수량, 증발량, 기온, 습도, 일조, 풍속을 분석하였고, 기후변화 시나리오는 기상청에서 제공하는 RCP 4.5와 RCP 8.5 (2020~2050년)의 기온, 일별 강수량, 일별 상대습도, 일별 풍속 자료를 활용하였다.

나. 토지이용 변화

토지이용현황 분석은 통계청의 1981~2016년 시군별 논밭경지면적 조사 자료와 산림 행정구역별 면적 자료를 이용하였으며, 감귤 면적을 뜻하는 과수원 면적은 제주도 통계연보 자료를 참고하였다. 추세선 분석은 값의 수렴을 위해 로그 함수를 통해 작성되었다.

각 작물별 재배면적의 경우, 제주 수자원장기종합계획 보고서 (Jeju, 2013)에서 조사된 읍면동 별 밭 비율과 작물별 재배 면적 비율을 적용하였다. 작물별 재배 면적은 제주도 전체 농경지 면적에 대한 미늘, 양파, 양배추, 무우, 수박 등 총 12개의 작물에 대해 계산하였다. 이때 노지 감귤은 제주도 통계연보를 참고하여 계산하였다.

다. 농업용수 수요량 분석

제주도의 농업용수 수요량은 발용수로서 받은 논에 비해 작물의 종류도 많고 물소비 기구가 복잡해 정확한 수요량 계산이 어려운 실정이다. 증발산량은 Penman-Monteith 방법 (FAO, 1998)을 적용하였으며, 유효우량은 밭에 내린 5 mm 미만의 강우에 대해서는 유효우량으로 포함시키지 않고 지형, 토양의 투수성, 작물의 종류, 강우 강도 등을 고려해 80% 정도로 계산하였다. 또한, 유효우량의 상한은 전용이유효수분 (TRAM)에서 강우 직전에 있어 토양의 유효수분량을 제외한 값으로 계산하였다. 손실량은 노지 재배에서 대부분 적용하고 있는 스프링클러 관개의 효율을 적용하였다. 제주도의 작물계수는 (Jeju National University, 2003)의 결과와 FAO 56에서 제시된 작물계수를 사용하였으며, 기존 시설물의 공급 능력 평가는 10년 빈도 가뭄시 필요한 일별 최대 용수량을 기준으로 용수 부족량을 산정하였다. 산정기간은 현재 (1990~2019년), RCP 4.5 (2020~2050년) 그리고 RCP 8.5 (2020~2050년)를 기준으로 정하였다. 제주와 서귀포는 논외 재배면적이 밭에 비해 매우 작은 것으로 분석되었기 때문에 논 조용수량은 이 연구에서 고려하지 않았다.

라. 기 확보 수량 및 물 부족량 산출

기존 지하수 시설의 농업용수 공급가능량을 추정하기 위하여 지하수관리현황자료 (Jeju, 2016)와 농업용 공공관정 지하수개발 이용시설 사후관리 이행보고서 (Jeju, 2016; Seogwipo, 2016)의 자료를 활용하였다. 시설 지하수시설의 농업용수 공급가능량을 추정하기 위하여 제주도에서 시행한 시설관정 채수량 실측자료 (MAFRA and KRC, 2017)를 활용하였고, 현재 제주도의 농업용수가 어느 정도 부족한지 알아보기 위해 기 확보 수량에서 필요수량을 제외하여 물 부족량을 산정하였다. 본 연구에서는 농업용수 부족량 대체 가능성을 평가하기 위해 물 부족량 산정에 대해 현재와 RCP 4.5, RCP 8.5로 구분하여 분석하였다.

3. 구조적 대안 설정

가. 대안별 단위당 설정

본 연구에서는 구조적 대안으로 임시대책과 항구대책 그리고 광역화 대안으로 구분하여 설정하였다. 임시대책중 소형관정은 시설관정으로서 개인이 개발하여 약 5 ha정도 급수하는 관정이고, 포강개발은 육지에서 말하는 뚝방의 의미로서 제주도에서는 용천수를 개발하는 것이다. 항구대책의 하나인 대형관정 개발은 공공관정으로서 1일 1,000 m³ 양수할 수 있는 규모이며, 지표수개발은 저수지를 개발하는 방식이다. 광역화대안은 기존 관정의 개별 급수체계를 탈피하여 읍면단위

광역 급수체제로 전환하여 물여유가 있는 저수소에서 물이 부족한 저수조에 연결하고 광역저수조를 개발하여 기존 대형관정의 저수조에 공급해주는 상수도 공급체계와 같은 방식이다.

나. 현재 기반시설의 비용

공공관정은 한국농어촌공사에서 발표한 실적단가 (Jeju and KRC, 2018)를 적용하여, 3.8 억원/1공으로 추정하였다. 시설관정은 공공관정의 80%를 적용하여 3.0 억원/1공으로 추정하였다. 저수지의 기반시설비용은 성읍저수지 (KRC, 2017)를 대상으로 추정하였으며, 공사비 금액은 545.4 억원이며, 유효저수량은 1,050 천m³, 관개면적은 400 ha인 저수지이다.

다. 가뭄피해액 및 복구액 산정

가뭄피해액은 2013년을 기준으로 제시된 제주도 농업용수 통합 광역화사업 예비타당성조사보고서 (KDI, 2016)에서 활용하였으며, 제주도 전체 10년 빈도 가뭄피해 발생시 14,866 백만원으로 추정하고 있다. 2013년 기준으로 농업용수 수요량은 1,247 천m³으로 산정하였고, 기 확보수량 (989 천m³)을 제외한 물 부족량은 293 천m³으로 산정하였다. 가뭄피해 발생시 금액을 물부족량을 나누면 원단위 가뭄피해액이 산정된다. 가뭄 피해액은 57 백만원/천m³으로 산정하였다. 2013년 가뭄피해발생에 따른 복구비 지원금액은 3,155 백만원 (KDI)으로 물 부족량을 나누면 원단위 가뭄 복구비가 산정된다. 그 때의 복구비는 12 백만원/천m³으로 산정하였다.

라. 용수공급량 및 대안별 설치비용 산정

임시대책에 대한 비용은 농림축산식품부에서 발간하는 한해대책단가표 (MAFRA, 2017)에 제시된 단가를 적용하였으며, 제시되지 않은 단가는 임시대책으로 소요되었던 사업비 (Jeju and KRC, 2013)를 활용하였다. 항구대책에 대한 비용은 유사 설치 사례를 통한 사업비를 산정하였다. 광역화 비용은 대형관정개발과 관로를 연결하는 비용을 포함하여 구좌지구 광역화사업비 (MAFRA and KRC, 2014)와 제주도 농업용수 통합 광역화사업 기본조사 보고서 (KRC, 2017)를 활용하였다. 설치비를 제외한 유지관리비는 시설별 유지관리가 상이한 시설들을 비교적 균일하게 비교 평가할 수 있는 전기료만 산정하였다.

4. 회복탄력성 분석

본 연구에서는 1가지 지수만으로 회복탄력성을 평가할 경우 지수의 정확성에 대해 평가할 수 없으므로 3가지 지수를 도입하여 통합적으로 평가하였다. 따라서, 기후변화 시나리오별 수자원공급 대안에 대한 회복탄력성 분석은 회복탄력성

비율 (Resilience Ratio, R), 지속가능성 지수 (Sustainability Index, S), 내구성-비용지수 (Robustness-cost index, RCI) 등 3 가지 방법으로 평가하였다.

가. 회복탄력성 비율 (Resilience Ratio, R)

Kang (2013a)이 제시한 다음 식 (1)과 같은 총복구노력 (TRE)과 시스템영향 (SI)의 비율의 토대로 실시하고자 한다. 그리고 구조적인 대안에 대해 비율을 산정하였다.

가뭄 재해로부터의 회복탄력성 측면에서 본다면 재해로 인한 구조적 대안비용과 가뭄피해액의 비율은 회복탄력성을 고려한 가뭄피해 대응체계의 판단기준으로 이해할 수 있을 것이다. 즉, 회복탄력성을 높이기 위해서는 구조적비용을 낮출 수 있는 대안과 가뭄피해액인 물부족량을 줄일 수 있는 체계 구축 필요성을 의미한다고 할 수 있다.

예를 들어, 비율이 높은 대안은 비율이 낮은 대안보다 총복구노력의 요구도가 높은 것이기 때문에 이를 낮출수 있는 대안이 필요하다고 할 수 있다.

$$R = \frac{SI}{\alpha \times TRE} \quad (1)$$

여기서, SI : 가뭄 피해액 (시스템 영향, System Impact)
 TRE : 구조적인 대안비용 (총복구노력, Total Recovery Effort)
 α : 가중치 및 단위환산 계수 (임시대책 1~항구대책 3)

나. 지속가능성 지수 (Sustainability Index, S)

수자원 분야에서 지속가능성이란, 필요한 수자원을 확보할 수 있는 능력으로 정의가 가능하다. 토지이용변화로 수요지점이 지역적으로 편중되어 수량이 증가하고, 기후변화로 인한 가뭄 발생이 잦은 상황에서 장기적인 수자원의 공급가능성에 대한 관심은 그 어느 때보다 높다. Kang et al. (2013b)은 수자원의 회복탄력적 지속가능성을 정량화하기 위한 세부지표 4가지 (식 2~6)를 이용하여 대안 중 지수값이 높을수록 안정적인 용수공급능력이 있다고 판단하였다.

신뢰도 (Reliability, Re)는 시스템이 주어진 기간 동안 정상적으로 제 기능을 발휘할 수 있는 가능성으로 정의될 수 있으며, 수식을 표현하면 다음과 같다. 여기서, N 은 총 분석년수, Ns 는 분석기간 중 물부족량이 없는 년수를 의미한다.

$$Re = \frac{Ns}{N} \quad (2)$$

복원력 (Resilience, Rs)은 내·외부적인 간섭에 의해 제 기

능을 제대로 발휘하지 못하는 경우가 발생하였을 때 (가뭄으로 인한 물부족), 얼마나 신속하게 정상적인 상태로 복원이 가능한 가를 나타내는 지수이며, Nf 는 분석기간 동안 가뭄 발생 회수, Xf 는 분석기간 중 시스템이 용수공급을 못한 년수를 의미한다. 식 (2)에서 알수 있는 바와 같이, 복원력의 역수는 제 기능을 발휘하지 못하는 상태에서 다시 정상상태로 복원되는데 걸리는 평균적인 시간을 의미한다. 여기서는 식 (1)에서 산정한 회복탄력성 비율과 유사한 의미로서 그 값을 이용하였다.

$$Rs = \frac{Xf}{Nf} \quad (3)$$

취약도 (Vulnerability, Vul)는 기능을 상실하였을 경우, 그 실패의 정도를 나타내는 지표이며, 식 (4)와 같이 정량화 할 수 있다. 여기서, T 는 총 분석기간을 의미하고, St 와 Dt 는 각각 특정년도의 용수부족량과 필요수량을 나타낸다.

$$Vul = \left[1 - \frac{St}{Dt} \right] \quad (4)$$

지속가능성 (Sustainability)은 위에서 계산된 세 개의 지수를 통합하여 계산할 수 있다. 즉, 앞서 계산한 신뢰성, 복원력, 취약도를 모두 고려하여 시스템의 지속가능성 지수를 정량화 할 수 있으며 식 (6)와 같은 식들이 이용될 수 있다.

$$S = Re \times Rs \times Vul \quad (5)$$

$$S = W1 \times Re + W2 \times Rs + W3 \times Vul \quad (6)$$

여기서, $W1$, $W2$, $W3$ 는 신뢰도, 복원력, 취약도의 가중치를 의미한다. 가중치의 주관적이며, 분석하고자 하는 시스템의 목적에 따라 의사결정자가 임의로 결정할 수 있고 세 가중치의 합이 1이 되도록 해야 한다 (Kang et al., 2013b). 본 연구에서는 신뢰도, 복원력, 취약도 모두 중요한 능력으로 판단하여 세 가중치 모두 0.33의 값을 적용하였다.

다. 내구성-비용 지수 (Robustness-cost index, RCI)

본 연구에서는 시나리오별 구조적 대안에 대한 회복탄력적 내구성 평가를 위해 Lee et al. (2016)이 제안한 내구성-비용지수를 도입하여 현 기반시설과 구조적 대안들의 회복탄력성을 평가하였다. 따라서 내구성 지수 (Robustness Index, RI)와 비용지수 (Cost Index, CI)는 식 (7), 식 (8)과 같이 정의하였고, 내구성지수와 비용지수를 곱하여 내구성-비용지수 식 (9) 값을 얻을 수 있다.

$$RI = \frac{CA + \sum AA}{DS(1 - \frac{AE}{100})} \quad (7)$$

$$CI = \frac{1}{1 + \frac{AC}{CC}} \quad (8)$$

$$RCI = RI \times CI \quad (9)$$

여기서, CA : 현시설의 용량
 AA : 구조적 대안의 용량
 DS : 재해규모 (물부족량)
 AE : 재해규모 저감비율
 AC : 구조적 대안의 비용
 CC : 현재 기반시설의 비용

RI를 통하여 기반시설이 계획 재해의 규모를 감당할 수 있는지 여부를 판단할 수 있다. 계획 재해의 규모가 현 기반시설의 용량을 초과하여 (RI < 1) 구조적대안을 추가적으로 모색

해야 할 경우, RI를 1보다 크게 만드는 후보 대안 (AA)들에 대해 비용을 고려한 RCI 값을 산정하여 최적의 대안 (RCI가 클수록 우수한 대안)을 선택할 수 있다. RI와 RCI를 통하여 재해의 종류 및 규모에 따른 현 기반시설 및 비용을 감안한 구조적 대안의 내구성을 평가할 수 있다.

III. 결과 및 고찰

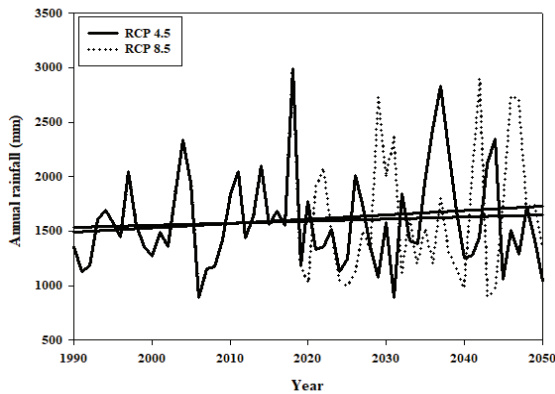
1. 미래 기후변화 및 토지이용변화에 따른 농업용수 모의 분석

가. 과거기상자료와 기후변화 시나리오

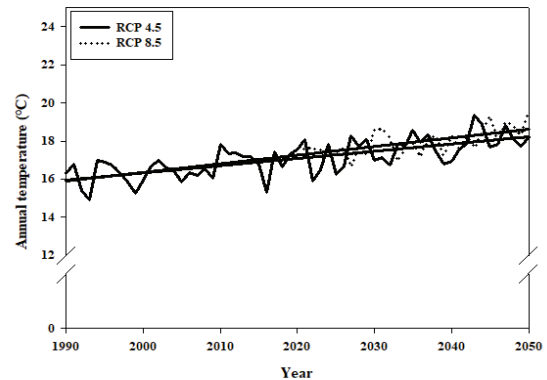
제주도를 대상으로 기후변화 시나리오를 분석한 결과, 제주 시와 서귀포시 모두 강우량과 기온이 증가폭을 보였으며, 강우량의 경우 제주시보다 서귀포가 미세하게 큰 증가폭을 나타냈다.

나. 토지이용변화 분석 결과

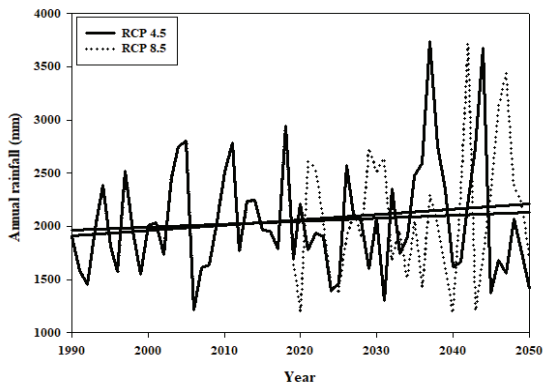
토지이용현황 자료를 바탕으로 추정된 미래 토지이용변화



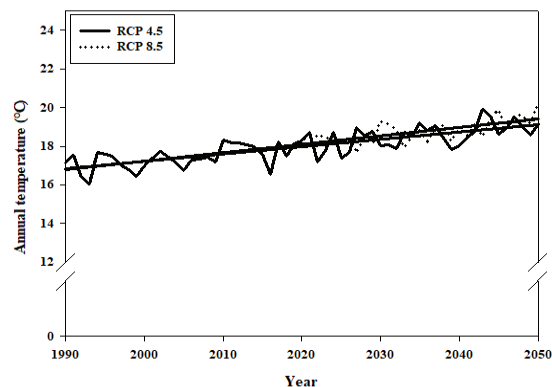
(a) Rainfall (Jeju-si)



(b) Temperature (Jeju-si)



(c) Rainfall (Seogwipo-si)



(d) Temperature (Seogwipo-si)

Fig. 2 Result of climate change scenario analysis in Jeju-island

회귀식은 모든 경우에서 결정계수 R^2 값이 0.7 이상으로 산정되어 적용성이 있는 것으로 나타났다. 논은 밭의 면적에 비해 현저히 적은 것으로 나타났으며, 밭의 경우 제주시와 서귀포시 모두 매년 약 0.5% 증가하는 추세를 보였다. 그와 반대로 두 지점 모두 산림은 약 0.4% 감소하는 추세를 나타냈다 (Fig. 3). 그 결과, 제주지역 현재 (2019년) 및 미래 (2050년)

작물별 재배 면적은 Fig. 4와 같이 산정되었다. 제주시와 서귀포시 모두 휴경지 (초지)가 가장 넓은 면적을 보였으며, 그 다음으로 감귤, 콩, 무, 마늘이 재배면적이 큰 것으로 분석되었다.

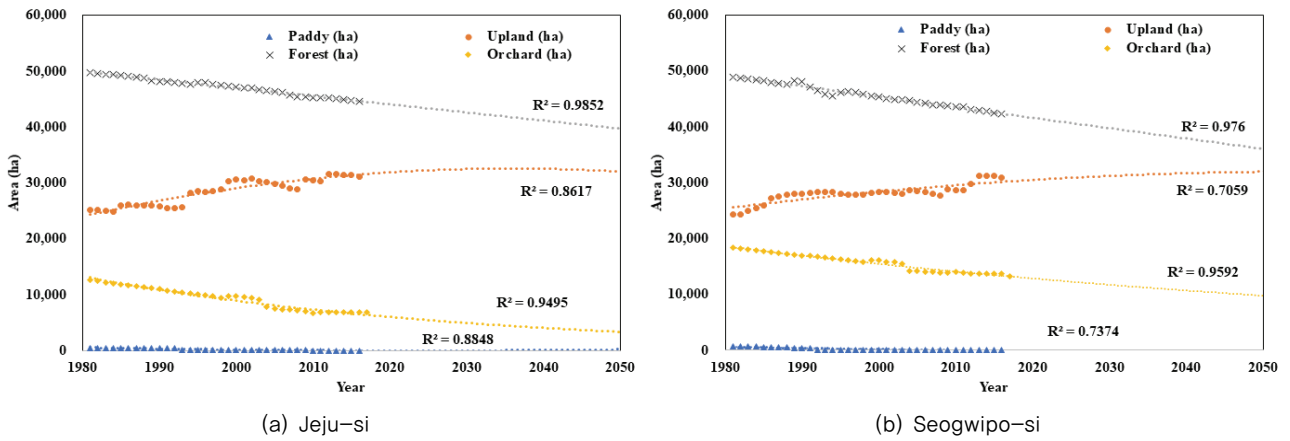


Fig. 3 Result of landuse change analysis in Jeju island

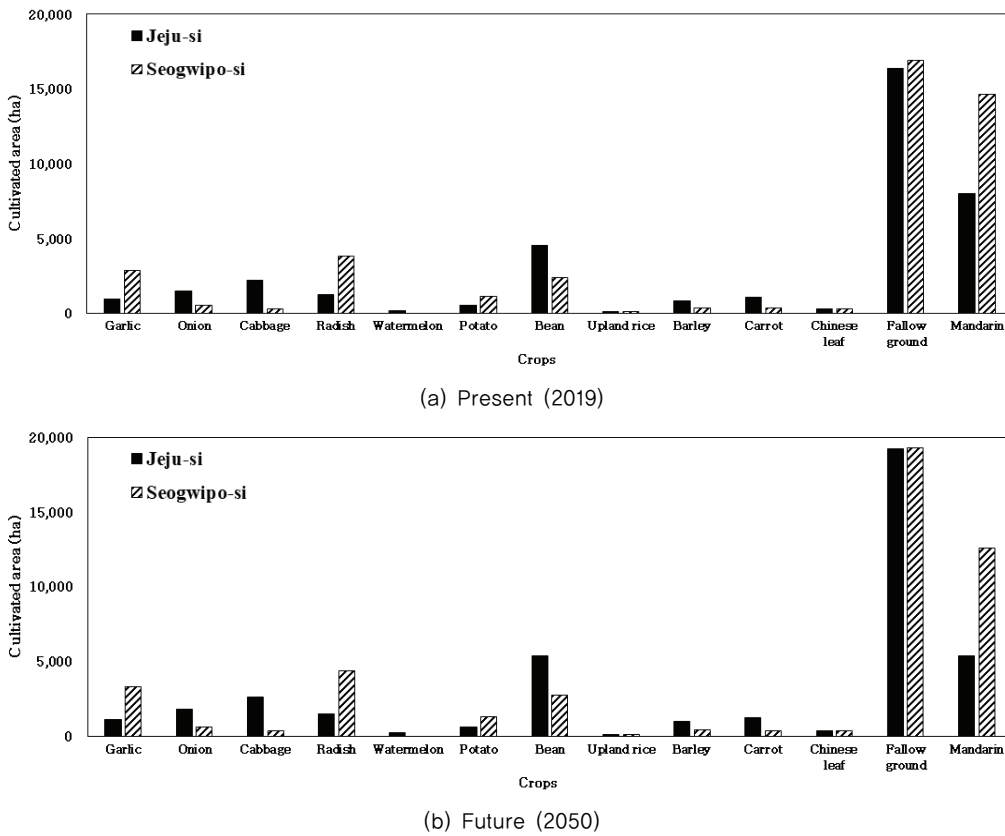


Fig. 4 Result of present and future area of each crops in Jeju island

다. 기후변화에 따른 농업용수 이용량

농업용수 수요량 분석은 현재 (1990~2019), RCP 4.5 (2020~2050) 그리고 RCP 8.5 (2020~2050) 기간 동안 일별 최대 필요수량을 산정한 결과, 현재보다 미래의 필요수량이 더욱 적게 산정되었으며, RCP 4.5는 시나리오 필요수량 감소폭이 RCP 8.5에 비해 더욱 컸다 (Table 1). 이러한 결과는 휴경면적 및 감귤 재배면적의 감소에서 기인하는 것으로 판단된다.

라. 기확보 수량 및 물 부족량 산출

제주도의 기확보 수량과, 물 부족량은 Table 1에 나타나있다. 기확보 수량의 경우 지하수시설에 의한 공급능력, 지표수 시설에 의한 공급가능량, 빗물이용시설에 의한 공급가능량의 총 합계로 가정하였다. 총 농업용수 공급가능량은 989,731 m³/일로 산정되었으며, 제주시의 경우 477,934 m³/일, 서귀포시의 경우 511,797 m³/일로 산정되었다.

물 부족량은 지역공급일 경우와 광역화의 경우로 나누어 산출하였으며, 지역공급일 경우에는 현재 시설에 대한 부족량이며, 광역화의 경우에는 대안시설로서 잉여수를 부족한 곳으로 공급하는 대안이다. 지역공급일 경우 현재 시설에 대한 분석결과로서 제주도는 현재 142,087 m³/일 부족하였으며, 서귀포의 경우 244,266 m³/일 부족하였다. 광역화의 경우 제주도는 현재 58,758 m³/일 부족하였으며, 서귀포시의 경우 193,118 m³/일 부족하였다. RCP 4.5 적용 시에는 대부분 지점에서 물부족량이 줄어드는 결과를 나타냈으며, 이는 감귤 재배면적의 감소로 인해 필요수량이 감소하였기 때문이다. 물 부족량 산출 결과, 제주시보다 서귀포에서 물부족량이 큰 값을 보여 가뭄대책이 더욱 시급한 것으로 판단된다.

2. 구조적 대안별 용수 공급량 및 설치비용 산정 결과

구조적 대안별 용수 공급량 및 설치비용 산정 결과, 임시대

책 중 1개소당 소형관정의 용수공급량은 3 m³, 설치비용은 105 백만원, 포강개발의 용수공급량은 10 m³, 설치비용은 201 백만원이 필요한 것으로 추정되었고, 항구대책 중 1개소당 대형관정의 용수공급량은 900 m³, 설비비용은 1,828 백만원, 지표수개발의 용수공급량은 24,000 m³, 설치비용은 54,502 백만원, 광역화의 용수공급량은 900 m³, 설치비용은 2,838 백만원 필요한 것으로 추정되었다. Table 1의 물부족량에 대해 구조적 대안별 시설규모와 그에 따른 용수공급량과 설치 및 운영 비용을 Table 2에서 산정한 것이다.

3. 회복탄력성 평가

가. 회복탄력성 비율 (Resilience Ratio, *R*)

가뭄재해로부터의 회복탄력성 측면에서 본다면 재해로 인한 총복구노력과 가뭄피해액의 비율 (*R*)은 회복탄력성을 고려한 자연재해 대응체계의 판단기준으로 이해할 수 있을 것이다. 회복탄력성 비율은 가뭄으로 인해 피해가 예상되는 금액과 대안별 설치비용을 나눈 값이다. 여기서 가뭄으로 인해 피해가 예상되는 금액은 원단위 가뭄피해액에서 읍면동을 통합하여 제주시와 서귀포시로만 구분하였으며, 제주시는 140 억원/천m³/일, 서귀포시는 157 억원/천m³/일로 추정하였다. 소형관정, 포강개발, 대형관정, 지표수 개발, 광역화 등 5개 구조적 대안의 시나리오별 설치비용과 회복탄력성 비율을 산정한 결과는 Table 3과 같다.

회복탄력성 비율이 1보다 높은 값을 지니는 대안의 경우가 가뭄피해액 대비 설치비용이 적은 경제적인 대안으로 판단할 수 있다. 구조적 대안별 회복탄력성 비율을 계산해본 결과, 임시대책인 소형관정과 포강개발은 1이하로 산정되어 대안으로서 효과가 없을 것으로 분석되었으며, 항구대책인 대형관정개발, 지표수개발 및 광역화는 1이상으로 산정되어 대안으로서 효과가 있는 것으로 평가되었다. 현재와 기후변화 시

Table 1 Amount of water shortage in Jeju island

Division	Water requirement (m ³ /day)			Water supply capacity (m ³ /day)	Water shortage (drought) (m ³ /day)				
	Present (2019)	Future (2050)			Present (2019)	Case	Present (2019)	Future (2050)	
		RCP 4.5	RCP 8.5					RCP 4.5	RCP 8.5
Total	1,241,607	1,193,261	1,212,519	989,731	Regional supply	386,353	329,579	344,098	
					Wide area water supply system	321,894	273,581	291,684	
Jeju-si	536,692	504,409	512,583	477,934	Regional supply	142,087	114,418	120,630	
					Wide area water supply system	128,776	96,526	103,545	
Seogwipo-si	704,915	688,852	699,936	511,797	Regional supply	244,266	215,161	223,468	
					Wide area water supply system	193,118	177,055	188,139	

Table 2 Amount of water supply capacity and installation cost in Jeju island

Division	Structural alternative	Water supply capacity (m ³ /day)			Installation cost (one hundred million won)		
		Present (2019)	Future (2050)		Present (2019)	Future (2050)	
			RCP 4.5	RCP 8.5		RCP 4.5	RCP 8.5
Jeju-si	STW	142,089 (47,363)	114,420 (38,140)	120,630 (40,210)	49,731	40,047	42,221
	PD	142,090 (14,209)	114,420 (11,442)	120,630 (12,063)	28,560	22,998	24,247
	LTW	142,200 (158)	115,200 (128)	121,500 (135)	2,888	2,339	2,468
	SWD	144,000 (6)	120,000 (5)	144,000 (6)	3,270	2,725	3,270
	WAWSS	129,600 (144)	97,200 (108)	104,400 (116)	4,087	3,065	3,292
Seogwipo-si	STW	244,266 (81,422)	217,821 (72,607)	223,470 (74,490)	85,493	76,237	78,215
	PD	244,270 (24,427)	217,830 (21,783)	223,470 (22,347)	49,098	43,784	44,917
	LTW	244,800 (272)	218,700 (243)	224,100 (249)	4,972	4,442	4,552
	SWD	264,000 (11)	240,000 (10)	240,000 (10)	5,995	5,450	5,450
	WAWSS	193,500 (215)	177,300 (197)	189,000 (210)	6,102	5,591	5,960

* STW: Small Tube Well, PD: Pond Development, LTW: Large Tube Well, SWD: Surface Water Development, WAWSS: Wide-area Water Supply System

Table 3 Resilience ratio of each structural drought counter-measure

Division	Structural alternative	Drought damage (one hundred million won)			Installation cost (one hundred million won)			Resilience ratio (R)		
		Present (2019)	Future (2050)		Present (2019)	Future (2050)		Present (2019)	Future (2050)	
			RCP 4.5	RCP 8.5		RCP 4.5	RCP 8.5		RCP 4.5	RCP 8.5
Jeju-si	STW	19,892	22,884	24,126	49,731	40,047	42,221	0.40	0.57	0.57
	PD	19,892	22,884	24,126	28,560	22,998	24,247	0.70	1.00	1.00
	LTW	19,908	23,040	24,300	2,888	2,339	2,468	2.30	3.28	3.28
	SWD	20,160	24,000	28,800	3,270	2,725	3,270	2.06	2.94	2.94
	WAWSS	19,908	23,040	24,300	4,087	3,065	3,292	2.22	3.17	3.17
Seogwipo-si	STW	38,105	41,821	41,565	85,493	76,237	78,215	0.45	0.55	0.53
	PD	38,106	41,823	41,565	49,098	43,784	44,917	0.78	0.96	0.93
	LTW	38,188	41,990	41,682	4,972	4,442	4,552	2.56	3.15	3.05
	SWD	41,184	46,080	44,640	5,995	5,450	5,450	2.29	2.82	2.73
	WAWSS	38,188	41,990	41,682	6,102	5,591	5,960	2.47	3.04	2.95

나리오별 미래시점을 비교해 볼 때, 현재보다 미래의 회복탄력성 비율이 높게 나타났으며, RCP 4.5 시나리오가 RCP 8.5 시나리오 보다 크게 나타났다.

제주시와 서귀포시 모두 대형관정 개발이 가장 높은 내구성-비용 지수를 나타냈다. 미래 2050년의 RCP 4.5 시나리오 기준으로 제주시의 경우 회복탄력성비율이 대형관정 3.28, 광역화 3.17, 지표수 개발 2.94 순으로 높은 값을 나타냈으나, 서귀포시의 경우 대형관정 3.15, 광역화 3.04, 지표수 개발 2.82 순으로 높은 값을 보였다. 대형관정과 광역화는 비슷한 수치를 보이고 있으나, 광역화의 경우 제주시가 서귀포시에 비해 약간 크게 나타났다. 이러한 차이는 서귀포시가 제주시와 비교할 때, 여유수량이 작아 광역화로 인한 효과도 작게 산정되었기 때문인 것으로 판단된다.

나. 지속가능성 지수 (Sustainability Ratio, S)

구조적 대안에 대한 지속가능성 지수를 산정한 결과는 Table 4과 같다. 임시대책인 소형관정과 포강개발은 1이하로 산정되어 대안으로서 효과가 없을 것으로 분석되었으며, 항구대책인 대형관정개발, 지표수개발 및 광역화는 1이상으로 산정되어 대안으로서 효과가 있는 것으로 평가되었다. 현재와 기후변화 시나리오별 미래시점을 비교해 볼 때, 현재보다 미래의 지속가능성지수가 높게 나타났으며, RCP 4.5 시나리오가 RCP 8.5 시나리오 보다 크게 나타났다.

제주시에서는 광역화 사업이 약간 높은 지속가능성 지수를 나타냈으며, 서귀포시의 경우 대형관정이 약간 높은 지속가능성 지수를 나타냈다. 미래 2050년의 RCP 4.5 시나리오 기준으로 제주시의 경우 지속가능성지수가 광역화 1.66, 대형관정

1.64, 지표수 개발 1.52 순으로 높은 값을 나타냈으나, 서귀포시의 경우 대형관정 1.55, 광역화 1.54, 지표수 개발 1.44 순으로 높은 값을 보였다. 광역화와 대형관정은 비슷한 수치로 나타났다. 이는 앞에서 밝혀진 바와 같이 서귀포시는 여유수량이 미비하여 광역화로 인한 효과가 미비하기 때문인 것으로 판단된다.

다. 내구성-비용 지수 (Robustness-cost index, RCI)

제주도의 경우에는 관정과 지표수의 가동율이 현재 재해의 심각성을 가늠하는 척도이며, 과거와 미래 기후변화 시나리오에 따라 재해규모가 어떻게 바뀔지 결정된다. 대안시설은 시나리오별 용수부족 현상을 해결을 해결할 수 있도록 시설계획을 수립하여 내구성을 확보되도록 하였다. 또한 내구성이 확보된 대안들은 비용지수 (CI)를 곱하여 내구성-비용지수 (RCI)를 산출하였다. RCI 값이 클수록 회복탄력성이 더 큰 대안으로 평가할 수 있다. 내구성-비용지수 산정 결과 임시대책인 소형관정과 포강개발은 1 이하로 산정되어 대안으로서 효과가 없을 것으로 분석되었으며, 항구대책인 대형관정개발, 지표수개발 및 광역화는 1 이상으로 산정되어 대안으로서 효과가 있는 것으로 평가되었다. 현재와 기후변화 시나리오별 미래시점을 비교해 볼 때, 현재보다 미래의 내구성-비용 지수가 높게 나타났으며, RCP 4.5 시나리오가 RCP 8.5 시나리오 보다 크게 나타났다.

제주시와 서귀포시 모두 광역화가 가장 높은 내구성-비용 지수를 나타냈다. 미래 2050년의 RCP 4.5 시나리오 기준으로 제주시의 경우 RCI 지수가 광역화 2.85, 대형관정 2.83, 지표수 개발 2.65 순으로 높은 값을 나타냈으나, 서귀포시의 경우 광역화 2.31, 대형관정 2.20, 지표수 개발이 2.11 순으로 높은

Table 4 Sustainability ratio (S) of each structural drought counter-measure

Division	Structural alternative	Reliability (Re)			Resilience (Rs)			Vulnerability (Vul)			Sustainability ratio (S)		
		Present (2019)	Future (2050)		Present (2019)	Future (2050)		Present (2019)	Future (2050)		Present (2019)	Future (2050)	
			RCP 4.5	RCP 8.5		RCP 4.5	RCP 8.5		RCP 4.5	RCP 8.5		RCP 4.5	RCP 8.5
Jeju-si	STW	0.87	0.90	0.93	0.40	0.57	0.57	0.74	0.77	0.76	0.66	0.74	0.75
	PD	0.87	0.90	0.93	0.70	1.00	1.00	0.74	0.77	0.76	0.76	0.88	0.89
	LTW	0.87	0.90	0.93	2.30	3.28	3.28	0.74	0.77	0.76	1.29	1.64	1.64
	SWD	0.87	0.90	0.93	2.06	2.94	2.94	0.74	0.77	0.76	1.21	1.52	1.53
	WAWSS	0.87	0.90	0.93	2.22	3.17	3.17	0.89	0.95	0.93	1.31	1.66	1.66
Seogwipo-si	STW	0.40	0.87	0.87	0.45	0.55	0.53	0.65	0.69	0.68	0.49	0.69	0.69
	PD	0.40	0.87	0.87	0.78	0.96	0.93	0.65	0.69	0.68	0.60	0.83	0.82
	LTW	0.40	0.87	0.87	2.56	3.15	3.05	0.65	0.69	0.68	1.19	1.55	1.52
	SWD	0.40	0.87	0.87	2.29	2.82	2.73	0.65	0.69	0.68	1.10	1.44	1.41
	WAWSS	0.40	0.87	0.87	2.47	3.04	2.95	0.73	0.74	0.73	1.19	1.54	1.50

Table 5 Robustness–cost index (*RC*) of each structural drought counter–measure

Division	Structural alternative	Present (2019)			Future (2050)					
		RI	CI	RCI	RCP 4.5			RCP 8.5		
					RI	CI	RCI	RI	CI	RCI
Jeju-si	STW	4.41	0.05	0.23	5.23	0.06	0.34	5.01	0.06	0.31
	PD	4.41	0.09	0.39	5.23	0.11	0.56	5.01	0.10	0.51
	LTW	4.41	0.49	2.15	5.24	0.54	2.83	5.02	0.53	2.65
	SWD	4.42	0.46	2.02	5.28	0.5	2.65	5.22	0.46	2.38
	WAWSS	4.77	0.40	1.92	6.02	0.47	2.85	5.68	0.46	2.59
Seogwipo-si	STW	3.13	0.09	0.27	3.41	0.10	0.33	3.32	0.09	0.31
	PD	3.13	0.14	0.44	3.41	0.16	0.53	3.32	0.15	0.50
	LTW	3.13	0.62	1.93	3.42	0.64	2.20	3.33	0.64	2.12
	SWD	3.21	0.57	1.83	3.42	0.62	2.11	3.40	0.59	2.02
	WAWSS	3.69	0.57	2.09	3.93	0.59	2.31	3.76	0.57	2.15

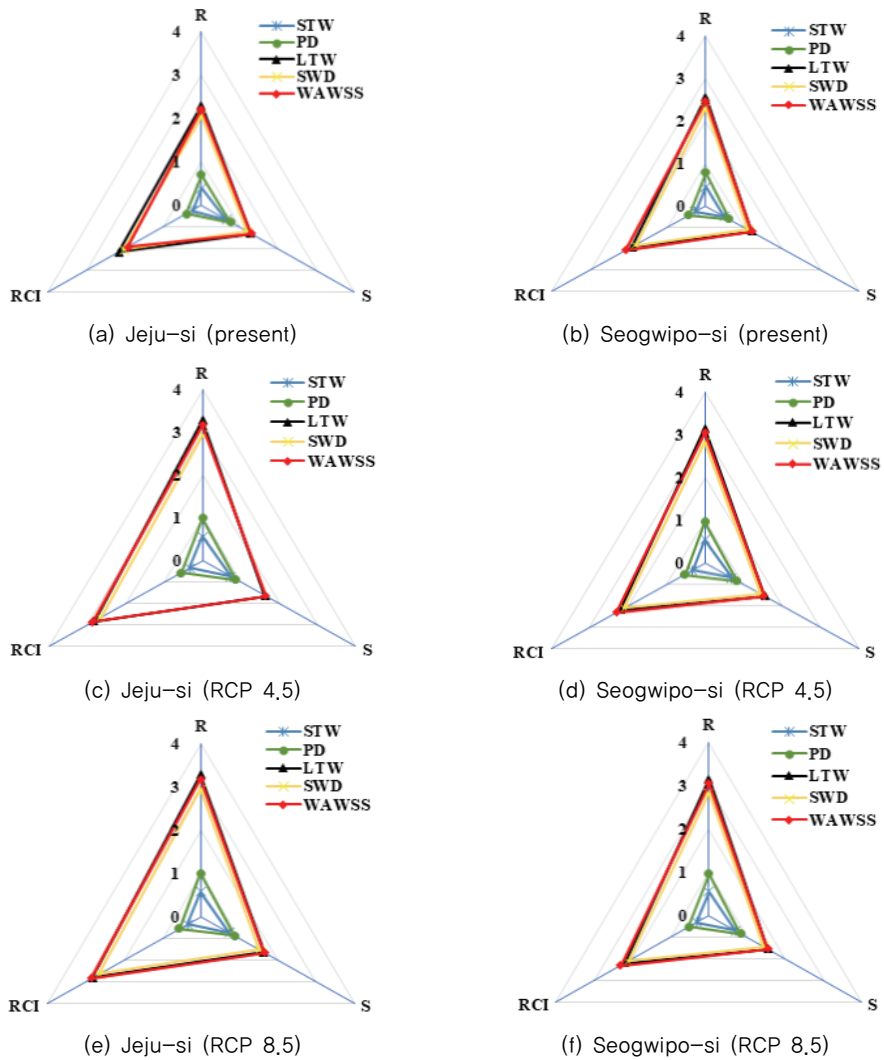


Fig. 5 Resilience index (R–S–RCI) of each structural drought counter–measure

값을 보였다. 대형관정과 지표수개발은 비슷한 수치를 보이고 있으나, 광역화의 경우 제주시가 서귀포시에 비해 크게 나타났다. 이는 제주시에 비해 서귀포시의 여유수량이 미비해 광역화 사업으로 인한 효과가 적을 것으로 판단된다.

라. 회복탄력성 지수 분석 결과

본 연구에서는 1가지 회복탄력성 지수만으로는 대안 평가 불확실성이 존재하므로 총 3가지 회복탄력성 지수를 산정하여 5가지의 구조적 대안에 대하여 회복탄력성을 평가하였다. 평가 결과 제주시의 경우 광역화가 3가지 지수 공통으로 가장 큰 값을 보이고 있으나, 서귀포시는 대형관정이 회복탄력성비율과 지속가능성지수는 높게 나타났으나, 내구성-비용 지수에서는 광역화가 대형관정보다 약간 큰 값을 보이고 있었다.

현재와 미래 2050년 시나리오를 기준으로 볼 때, 미래 2050년 시나리오가 3가지 지수 모두 크게 나타나는 것을 보인다. 이러한 차이는 가장 크게 영향을 미치고 있는 물부족량으로서 미래 기상시나리오가 물부족량이 현재보다 최저 20,798 m³/일에서 최고 36,759 m³/일로 감소하는 경향을 보이기 때문에, 미래 2050년 시나리오의 지수값이 크게 나타났다. 미래 농업용수 수요량의 가장 영향을 미치는 인자는 기상조건보다는 미래 작물 재배면적이 가장 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

미래 2050년 RCP 4.5 시나리오를 기준으로 볼 때, 제주시의 경우 대형관정이 회복탄력성 비율에서 3.28로 가장 큰 값을 보였으나, 지속가능성지수와 내구성-비용지수에서는 광역화가 1.66, 2.85로 다른 대안보다 높은 값을 보였으며, 그다음으로는 대형관정과 지표수 개발이 높은 값을 보였다. 서귀포시의 경우 대형관정이 회복탄력성 비율과 지속가능성에서 3.15, 1.55으로 보였으나, 내구성-비용지수에서는 광역화가 2.31로 대형관정 2.20보다 큰 값을 보였다. 이러한 결과는 대형관정이 가뭄피해가 발생했을 경우 더욱 유리한 대안이 될 수 있으나 가뭄피해를 고려하지 않은 내구성-비용지수 면에서는 광역화가 더욱 유리한 대안이 될 것으로 판단된다.

따라서, 지역별로 여유수량이 있는 경우에는 광역화대안이 가장 우수한 대안으로 평가될 수 있으나, 여유수량이 많지 않은 경우는 가뭄으로 발생한 피해 등을 고려했을 때, 대형 관정 개발이 가장 우수한 대안으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 용수공급 불균형 해소 및 토지이용변화와 기후변화에 따른 가뭄에 대비하여 항구적으로 가뭄을 극복하

기 위한 대책을 평가하는 것으로 물 수요량과 제주도 전역에 대해 회복탄력적인 농업용수 공급방안을 평가하는 3가지의 회복탄력성 지수 적용방안을 제시하였다.

회복탄력성 지수가 높을수록 가뭄재해 규모를 경감시키기 때문에 농업생산기반시설의 가뭄극복 대안을 회복탄력성 지수로 평가하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

구조적 대안 중 소형관정과 포강개발은 3가지의 회복탄력성 지수 모두 1미만의 결과가 도출되는 등 설치비용의 증가폭이 증가하는 대안은 가뭄에 대해 적절한 대책이 아닌 것으로 나타났다. 반면에 대형관정과 지표수개발, 광역화는 RCP 4.5, RCP 8.5 두가지 기후변화 시나리오에도 모든 회복탄력성 지수가 1이상의 값을 보여 효율적인 대책으로 분석되었으며, 광역화방안은 물이 충분한 지역의 잉여수를 물이 부족한 지역으로 공급하기 때문에 그에 따른 설치비용이 감소하는데 기인한다. 따라서, 제주도의 경우에는 많은 관정을 개발하기 힘든 점을 감안할 때 여유수량이 있는 곳을 부족한 읍면동으로 연결하는 방안을 마련할 필요가 있는 것으로 분석되었다.

회복탄력성 지수가 클수록 가뭄재해 규모를 경감에 효과적이기 때문에 향후 농업생산기반시설의 가뭄극복 대안 선정시 회복탄력성 지수로 평가하는 접근 방법을 적용할 필요가 있는 것으로 판단된다. 하지만, 본 연구에서는 회복탄력성을 시설비용과 피해액으로만 정적으로 판단하였지만 가뭄피해가 발생하는 기간과 구조적 대안을 설치하는 시간을 고려한 회복탄력성 평가방법의 마련을 위한 추가적 연구가 필요하며, 본 연구에 적용된 미래 토지이용변화는 기후변화에 따른 작물 재배지 변화는 고려되지 않아 향후 기후변화를 고려하여 작물 재배지 변화를 고려한 추가적인 연구가 필요하다.

REFERENCES

1. Bates, B. C., Z. W. Kundzewicz, S. Wu, and J. P. Palutikof, 2008. Climate change and water. Paper of the inter-governmental panel on climate change. IPCC Secretariat, Geneva.
2. Choi, K. J., S. H. Song, J. S. Kim, and C. U. Lim, 2013. Estimation of regional agricultural water demand over the Jeju Island. *Journal of Environmental Science* 22(5): 639-649 (in Korean). doi:10.5322/JESI.2013.22.5.639.
3. FAO, 1998. Crop evapotranspiration, FAO Irrigation and Drainage Paper 56.
4. Holling, C. S., 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4: 1-23.

5. IPCC, Climate Change, 2007. Synthesis report. Contribution if 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, 102.
6. Jeju National University, 2003. Estimation of irrigation water requirements for upland crops in Jeju (in Korean).
7. Jeju Special Self-Governing Province, 2013. Jeju special self-governing province master plan for water resources management, 7-19 (in Korean).
8. Jeju Special Self-Governing Province and Korea Rural Community Corporation (KRC), 2013. Jeju Island agricultural comprehensive planning (in Korean).
9. Jeju Special Self-Governing Province and KRC, 2018. Groundwater well performance unit price (in Korean).
10. Jeju Special Self-Governing Province, 2016. Groundwater management status. <http://water.jeju.go.kr/> (in Korean).
11. Jung, U, Y., S. J. Kim, and H. K. Choi, 2009. Recovery cost evaluation and practical application for index assessment of private facilities damaged by natural disaster. *Journal Korean Society of Hazard Mitigation* 9(3): 67-73 (in Korean).
12. Kang, D. S., T. U Kim, and J. H. Ahn, 2013b. Water resources infrastructure, sustainability and resilience. *Journal of Disaster Manage* 13(1): 309-315. doi:10.9798/KOSHAM.2013.13.1.309
13. Kang, S. J., 2013a. A policy implication for community resilience from natural disasters. *Journal Gyeonggi Research Institute* 121(102): 102 (in Korean).
14. Kim, T. H., H. J. Kim, and K. J. Lee, 2011. The concept and functional objectives of the urban resilience for disaster management. *Journal of the Korean Society of Safety* 26: 65-70 (in Korean).
15. Kim, S. U., 2016. Policy tasks for efficient drought management (Focus on hydrological drought), National Assembly Legislative Survey, 2 (in Korean).
16. Kingwell, R., 2006. Climate change in Australia: agricultural impacts and adaptation. *Australasian Agribusiness Review* 14(1): 29.
17. Korea Development Institute (KDI), 2016. Juju special self-governing province preliminary feasibility study report for intergrated agricultural water consolidation project (in Korean).
18. KRC, 2005. Estimation of irrigation water requirements for upland crops in Jeju (in Korean).
19. KRC, 2017. Seongup district rural water development project, Chapter 6 Operating expenses (in Korean).
20. Lee, C. M., J. H. Jung, J. S. An, J. Y. Kim, and Y. J. Choi, 2016. Establishment of resilient infrastructures for the mitigation of an urban water problem: 1. Robustness assessment of structural alternatives for the problem of urban floods. *Ecology and Resilient Infrastructure* 3: 117-125.
21. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), 2017. Drought countermeasure price list.
22. MAFRA and KRC, 2014. Gujwa district rural demand regionalization project plan, Chapter 6 Operating expenses.
23. MAFRA and KRC, 2017. Jeju agricultural water intergrated regionalization project basic survey report, Chapter 6 Operating expenses.
24. National Infrastructure Advisory Council (NIAC), 2009. Critical infrastructure resilience. http://www.dhs.gov/xlibrary/assets/niac/niac_critical_infrastructure_resilience.pdf; Retrieved on Dec 1 2015.
25. O'Brien, K., R. Leichenko, U. Kelkar, H. Venema, G. Aandahl, H. Tompkins, A. Javed, S. Bhadwal, S. Barg, L. Nygaard, and J. West, 2004. Mapping vulnerability to multiple stressors: climate change and globalization in India. *Glob Environ Change* 14: 303-313.
26. Park, J. H., J. H. Go, Y. J. Jo, K. H. Jung, M. H. Sung, H. M. Jung, H. K. Park, S. H. Yoo, and K. S. Yoon, 2018. Water supply alternatives for drought by weather scenarios considering resilience: Focusing on Naju Reservoir. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers* 60(5): 115-124 (in Korean).
27. KRC, 2016. Post-Management report of underground water development facilities to public well for agricultural use, (Jeju 2013~2016, Seogwipo 2015~2016) (in Korean).
28. Ribot, J. C., 1996. Climate variability, climate change, and social vulnerability in the semi-arid tropics, Cambridge, New York, NY, Cambridge University Press, 190.
29. Seo, S. K., B. C. Jeon, G. S. Lee, and S. H. Song, 2019. Change of groundwater usage according to increase of facilities in agricultural complex near river, 1 p. (in Korean).
30. Song, S. H., and K. J. Choi, 2012a. An appropriate utilization of agricultural water resources of Jeju Island with climate change (I). *Journal of Soil and Groundwater Environment* 17(2): 62-70 (in Korean). doi:10.7857/JSGE.2012.17.2.062.

31. Song, S. H., K. J. Choi, and J. S. Kim, 2012b. Correlation between groundwater level fluctuation and climate change with spring drought in 2012. In *Proc. of Workshop for 6th Jeju Water Resources Management Advancement*, 47-68 (in Korean).
32. Vugrin, E. D., and R. C. Camphouse, 2011. Infrastructure resilience assessment through control design. *International Journal of Critical Infrastructures* 7: 243-260. doi:10.1504/IJCIS.2011.042994.
33. Vugrin, E. D., D. E. Warren, M. A. Ehlen, and R. C. Camphouse, 2010. A framework for assessing the resilience of infrastructure and economic systems. In Gopalakrishnan, K. and Peeta, S. (eds.), *Sustainable and Resilient Critical Infrastructure Systems*, Springer-Verlan, Berlin, Germany, 77-116. doi:10.1007/978-3-642-11405-2_3.
34. Yu, S. Y., S. W. Kim, K. H. Park, C. W. Oh, D. K. Park, and C. Y. Kim, 2012. Quantitative resilience analysis of Fiji to cyclones. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 12: 55-63 (in Korean). doi:10.9798/KOSHAM.2012.12.2.055.