

기후변화가 제주 농업 생산성과 지역 경제에 미치는 영향*

권오상**, 김호범***

Contents

1. 서론	133
2. 제주 농업과 기후변화	135
3. 연구 방법 및 절차	138
4. 기후변화의 품목별 생산성 영향 분석	139
5. 경제적 영향 분석	146
6. 요약 및 결론	156

Keywords

기후변화(Climatic Change), 농업 생산성(Agricultural Productivity), 경제적 파급효과(Economic Impacts), 응용일반균형모형(CGEModel)

Abstract

제주도는 1차산업 비중이 약 10%에 달할 정도로 농업 중요성이 높고, 채소 및 과실류 중심의 품목 구조와 빠른 아열대화라는 기후 특성도 갖고 있어 진행 중인 기후변화로 인해 큰 영향을 받을 것으로 예상된다. 그러나 기후변화의 농업 생산성 영향은 그동안 국내외적으로 식량작물 위주에만 분석되었고, 채소 및 과실류에 대한 분석은 잘 진행되지 않았다. 또한 제주도처럼 농업 의존도가 높은 지역은 기후변화가 경제 전체에 상당한 영향을 미칠 것이므로, 기후변화의 품목별 영향을 일반균형 분석에 반영할 필요도 있다. 본 연구는 기후자료와 작목 생산자료를 결합하여 기후변화가 채소 및 과실류 품목별로 생산성에 미치는 영향을 추정하였다. 그리고 제주도 지역 CGE 모형과 농업 부문 모형을 구축 연계한 후, 생산성 영향 추정 결과를 반영하여 기후변화가 제주 경제 전체에 미치는 영향을 도출하였다. 분석 결과, 전통적인 채소 및 과실류는 기후변화로부터 전반적으로 부정적인 영향을 받을 가능성이 큰 것으로 나타났다. CGE 경제모형 분석에서는 고수의 만감류와 아열대 품목으로의 전환과 생산성 관리가 원활히 이루어진다면 경제적 손실을 줄이고 심지어 양(+)의 효과까지 얻을 수 있으나, 수동적인 대응만을 한다면 제주 경제가 연간 상당한 손실을 볼 것으로 나타났다. 따라서 본 연구는 적절하게 계획된 기후변화 적응 조치가 중요하다는 점을 강조한다.

* 본 논문은 한국은행 제주본부의 재정지원을 받아 서울대학교 산학협력단에서 수행한 「기후변화가 제주 농업경제에 미치는 영향」 연구 보고서를 보완하여 학술논문 형식으로 작성한 것임.

** 서울대학교 농경제사회학부 농업·자원경제학전공 및 글로벌 스마트팜 융합전공 교수, 농업생명과학연구원 겸무 연구원, 교신저자.
e-mail: kohsang@snu.ac.kr

*** 에너지경제연구원 위촉연구원(논문 작성 시 서울대학교 농업·자원경제학전공 대학원 재학). e-mail: ghqja655@snu.ac.kr

The Impacts of Climate Change on Agricultural Productivity and General Equilibrium in Jeju Province*

Kwon Oh-Sang**, Kim Ho-Beom***

Keywords

Climate Change, Agricultural Productivity, Economic Impacts, CGE Model

Abstract

This study investigates the effects of climate change on agricultural productivity and the regional economy of Jeju Island, focusing on its major local crops. Agriculture accounts for approximately 10% of Jeju's gross regional domestic product, underscoring its economic significance. The region has a production structure heavily reliant on vegetables and fruits and is experiencing a more rapid transition to a subtropical climate than other regions. Against this background, this study estimated the crop-level effects of key climate variables, such as rising average temperatures, precipitation shifts, and an increased frequency of extreme heat days. Building on these estimates under the projected climate scenarios for 2041–2060, this study evaluates the broader macroeconomic impacts on the region using an integrated CGE and agricultural sector model. These findings indicate that conventional vegetable and fruit crops are likely to experience overall declines in productivity under the projected climate trends. While a few crops may experience marginal benefit from rising temperatures, greater climate volatility, particularly the surge on extreme heat days, deteriorates production conditions, and effectively offsets these potential gains. The economic analyses further suggests that strategic crop substitution and effective productivity management of high-value crops could mitigate these losses. However, delayed adaptation may lead to substantial annual economic losses in Jeju. This study contributes to the existing literature by providing an integrated assessment of the effects of climate change on both agricultural productivity and regional economy.

* This paper is based on the report "The Impact of Climate Change on Jeju's Agricultural Economy," prepared with financial support from the Jeju Branch of the Bank of Korea, and has been revised and supplemented for publication.

** Professor, Department of Agricultural Economics and Rural Development and Integrated Major in Global Smart Farm, Seoul National University, Corresponding author. e-mail: kohsang@snu.ac.kr

*** Project Assistant, Korea Energy Economics Institute; at the time of writing, Graduate Student, Department of Agricultural Economics and Rural Development, Seoul National University. e-mail: ghja655@snu.ac.kr

1. 서론

기후변화는 전 지구적 현상으로서 다양한 환경적·경제적 변화를 초래하고 있다. 산업혁명 이래 온실가스 배출이 증가하면서 지구 평균기온은 계속 상승하고 있고, 폭염, 가뭄, 홍수 등 극한기후 현상의 빈도와 강도가 높아지고 있는데, 이 현상은 앞으로도 지속될 것으로 예상된다. 온실가스로 인한 기온상승은 위도가 높을수록 심할 것으로 전망되고 있다(IPCC, 2021). 따라서 비교적 고위도인 한국의 기온상승이 지구 평균보다도 높을 것으로 예상되며, 그 영향을 분석하고 대응책을 마련하는 것은 국가적 관심사 가운데 하나이다(환경부·국립환경과학원, 2025).

특히 제주도는 국내 다른 지역에 비해 이미 기온이 상당히 높고, 해양성 기후조건을 갖고 있어 기후변화의 양상이 여타 지역과 다를 가능성도 있다. 또한 산업 구조 면에서도 관광업과 더불어 농업 부분 비중이 상대적으로 높다는 특성 때문에 기후변화의 산업적, 사회적 영향 역시 다른 지역과 차별화된다. 본 연구는 이러한 특성을 가지는 제주도가 현재 기후변화로 인해 어떤 영향을 받고 있으며, 미래에는 어떤 영향을 받을 것인지를 농업 부문을 중심으로 실증적으로 분석하고자 한다.

이와 같은 연구 목적을 달성하기 위해서는 크게 두 가지 분석이 연계되어 이루어져야 한다. 첫째, 기후변화로 인해 제주도 농산물 생산성에 어떤 변화가 발생하는지를 추정하고, 향후의 생산성 변화를 전망할 필요가 있다. 둘째, 그러한 생산성 변화가 어떤 경제적 영향을 초래할지를 경제모형을 이용해 분석할 필요가 있다. 기후변화가 농업에 미치는 일차적인 영향은 긍정적이든 부정적이든 생산성을 바꾸는 것이고, 그 영향의 방향과 크기는 작물과 지역에 따라 다를 것이다. 따라서 생산성 영향을 과학적으로 분석하는 것은 기후변화 영향 분석의 출발점이 되어야 한다. 그러나 생산성 변화가 곧 기후변화의 경제적 영향을 의미하지는 않는다. 특정 작물의 생산성이 변하면 가격변동이 발생하고, 이에 따라 생산자는 생산요소 이동이나 생산기술 조정을 통해 대응하게 되므로, 그러한 파급효과(spillovers)까지 반영하여야 경제적 효과 분석이 완료된다. 특히 제주도처럼 농업 부문이 경제 전체에서 차지하는 비중이 높은 지역에서는 기후변화의 농업 생산성 영향은 비농업 부문에까지 영향을 미치게 되므로, 일종의 일반 균형모형을 분석하는 것이 필요하다.

이상의 두 가지 효과를 연계해 분석하기 위해 본 연구는 생산함수 추정법과 CGE(Computable General Equilibrium) 모형 분석법을 개발·적용한다. 그리고 CGE모형 구축에 사용되는 원자료의 품목 선택 해상도가 낮은 한계를 극복하고자 채소 및 과수 부문의 세부 품목 배분 형태를 반영할 수 있는 농업 부문 모형(Agricultural Sector Model: ASM)까지 개발·적용하는 3단계 분석을 실행한다.

보다 구체적으로, 생산성 효과 분석에서는 제주도에 생산되는 거의 모든 경종 작물의 생산성이 기후변수에 의해 영향받는 정도를 계량경제 모형을 이용해 분석한다. 기후조건을 포함하는 생산함수를 모수적 및 비모수적으로 추정하며, 다수의 추정 모형을 시도하여 생산성과 기후변수 간의 가장 적합한 연관관계를 찾고자 한다. 그리고 추정 결과에 미래의 기후변화 시나리오를 반영하여 2041~2060년 기

간에서의 평균 생산성 전망치를 품목별로 도출한다.

또한 본 연구는 일반균형 효과 분석을 위해 2020년 기준 산업연관표를 활용하는 제주도 CGE 모형을 구축한다. 1) 곡물 및 식량작물, 2) 채소 및 과실, 3) 기타 작물, 4) 축우, 낙농 및 육류, 5) 기타 축산, 6) 임산물, 7) 수산물이 기후변화에 민감한 1차산업이기 때문에 이들 산업과 그 외 6가지 산업으로 통합된 13개 산업 구조를 가진 제주도 경제모형을 구축해 분석에 사용한다. 그리고 농업 부문 중에서도 2) 채소 및 과실은 가장 많은 세부 품목을 가지는 부문이고 또한 제주도 농업에서 중요도가 가장 높은 부문이지만, CGE 모형이 자료 제약으로 채소 및 과실류 세부 품목 간 선택 문제까지는 고려하지 못한다는 점을 보완하기 위해 채소 및 과실 부문 만의 39개 세부 품목의 균형 모형을 별도로 구축하여, 이 모형과 CGE 모형을 연계해 분석하도록 한다.

이상과 같이 진행되는 본 연구는 관련된 기존 연구와 몇 가지 유사점과 차이점을 가진다. 먼저 기후변화의 농업 생산성 영향은 Schlenker & Roberts(2009), Lobell et al.(2011), 그 외 Ortiz-Bobea(2021)의 리뷰 논문이 검토한 많은 해외 연구가 있고, 국내에서도 조현경·권오상(2014), 이병훈·문한필(2012)과 같은 여러 연구가 있다. 대부분의 연구가 개별 품목별 생산성 변화를 추정하였지만, 추가로 1961년 이래 전 세계 여러 국가의 농업 부문 전체 총요소생산성 변화를 분석한 Ortiz-Bobea et al.(2021)의 연구도 있으며, 보다 최근에는 주요 품목별 기후변화 적응 조치의 영향을 반영해 생산성 변화를 분석한 Hultgren et al.(2025)의 연구 등이 주목할 연구들이다. 계량경제모형을 추정하는 이들 연구의 모형 설정 방식이나 자료 활용 방식이 본 연구에 많이 활용되지만, 이 연구들이 대부분 쌀, 대두, 옥수수, 밀 등의 식량작물에 초점을 둔 반면, 본 연구는 식량작물 외에도 다수의 채소 및 과수를 분석 대상으로 한다는 큰 차이점이 있다.

기후변화의 일반균형 효과는 Hertel et al.(2010), Nelson et al.(2014)과 같은 글로벌 CGE 모형을 이용하거나, 권오상·이한빈(2012)과 같은 1국가 CGE 모형, 그리고 박경원 외(2015)와 같은 시장균형을 반영하는 농업 부문 모형(ASM)을 이용해 분석해 왔다. 이들 연구도 모두 쌀과 같은 식량작물 생산성 변화 효과만을 주로 반영하였다. 그리고 기존의 일반균형 연구들은 생산성 영향을 자체적으로 추정하지 않고 미래 수치 변화에 대한 간단한 가정을 적용하거나, 기존 연구의 추정 결과를 모형 구조와의 일관성을 확보하지 못한 채 가져다 사용하는 방식을 취하였다. 반면 본 연구는 생산성 변화 추정과 CGE 모형을 자료의 일관성을 최대한 확보하며 연계 분석한다. 아울러 품목 분류 기준으로 볼 때 CGE 모형이 가지는 낮은 해상도를 별도로 구축한 ASM 모형을 이용해 보완한다는 방법론상의 새로운 시도도 하였다.

논문의 구조는 다음과 같다. 먼저 제2장에서 진행되는 기후변화 양상과 제주도 농업 및 산업 구조를 개관한다. 이어서 제3장에서는 본 연구가 취하는 3단계 분석법의 절차와 기술적 내용을 설명한다. 그리고 제4장은 기후변화의 생산성 영향 추정과 그 결과를 보여주며, 제5장에서는 전체적인 경제적 효과를 도출하여 분석한다. 마지막 제6장에서는 모든 분석 결과를 종합하고 그 의미를 해석하도록 한다.

2. 제주 농업과 기후변화

2.1. 제주 경제와 농업

2022년 기준 제주도 GRDP는 전국의 약 1%,¹⁾ 인구는 약 1.31%²⁾이다. 산업에서 서비스업 비중이 81%로 가장 높지만, 농림어업도 약 9% 정도로서 전국 평균에 비하면 매우 높다. 2020년 기준 한국은행 『지역산업연관표』에 의하면 1) 곡물 및 식량작물, 2) 채소 및 과실, 3) 기타작물, 4) 축우, 낙농 및 육류, 5) 기타축산, 6) 임산물, 7) 수산물로 구성되는 1차산업은 전체 GRDP의 약 9.8%를 차지한다. 1차산업 내에서는 채소 및 과실이 가장 큰 비중을 차지하고, 이어서 수산물, 축우, 낙농 및 육류, 기타축산의 순서로 비중이 높다. 제주도의 2020년 총생산액은 38조 원이며, 투입된 부가가치가 약 20조 원이다. 나머지 중간재인데, 제주도 내 공급보다는 도외에서 수입된 중간재가 더 큰 비중을 차지하는 것이 특기 사항이다. 2020년 1차산업 총부가가치는 1조 7,630억 원이고 총생산액은 3조 6,940억 원이다.

2023년 제주도 농가 수는 약 3만 호이며, 호당 경지면적은 1.83ha로서 전국 평균보다 넓다.³⁾ 그러나 전업농 비율은 48.1%로서, 전국 평균인 55.4%보다 약간 낮다. 농가 연 소득은 약 6,100만 원이고, 이전소득을 제외한 순소득은 약 4,200만 원 정도인데 모두 전국 평균보다는 상당히 높다. 제주도는 전국 농지의 약 3.7%만을 차지하므로 다수 품목에서 국가 전체 생산량에서의 비중이 높지 않지만, 맥주 보리, 가을감자, 메밀, 기타잡곡, 노지호박, 노지무, 노지당근, 노지기타채소, 감귤, 기타특용작물의 경우 10% 이상의 점유율을 가지고 있다.

제주 농업의 특징 중 하나로 볼 수 있는 아열대 작물의 재배면적은 계속 증가하는 추세를 보인다. 참다래의 재배면적 비중이 가장 높으며, 이어 블루베리와 망고가 비교적 넓은 면적을 차지한다. 구아바, 용과 등도 재배되고 있으나 재배면적 비중은 상대적으로 크지 않다. 바나나 역시 제주에서 오래전부터 재배가 시도되었으나 생산이 안정적으로 지속되지 못한다.

제주 농업을 대표하는 작물인 감귤류 생산은 최근 상당한 구조적 변화를 겪고 있다. 노지감귤, 월동감귤, 하우스감귤을 포함하는 감귤류 전체 재배면적은 전반적으로 감소하는 추세를 보이고 있다. 특히 노지감귤의 재배면적이 계속 감소하는 반면, 월동감귤과 하우스감귤의 비중은 점차 높아지고 있다. 한편 한라봉, 천혜향, 레드향, 황금향 등을 포함하는 만감류의 재배면적은 감귤류와 달리 크게 증가하고 있는데, 이는 상대적으로 부가가치가 높고 출하 시기를 조절할 수 있는 장점 때문으로 해석된다. 만감류 가운데에서는 한라봉의 비중이 가장 높았으나 최근에는 천혜향, 레드향, 황금향 등 새로운 품종의 비중이 빠르게 확대되는 추세이다.⁴⁾

1) 제주특별자치도(2025). 제주경제통계.

2) 통계청(2025). 장래인구추계.

3) 농림축산식품부(2024). 농림축산식품 통계연보.

4) 제주감귤연합회(2025). 감귤류 및 만감류 재배면적 자료.

2.2. 제주도의 기후변화 및 전망

2.2.1. 제주도 기후

본 연구는 기후변화가 한반도와 제주도에서는 향후 어떻게 전개될 것인지를 전망하기 위해 기상청이 제공하는 『기상자료개방포털』을 가공해 활용하였다. 해당 자료원은 전국 103개 지점에서 관측된 평균 기온, 최고기온, 최저기온, 월별 강수량, 풍속, 적산온도 등의 여러 기후 데이터를 제공하고 있으며, 제주도의 경우 고산, 서귀포, 성산, 성산포, 제주 5개 지점 자료를 포함한다.

현재 한국의 SSP 기반 미래 기후 시나리오는 기상청 『기후정보포털』이 제공하며, 1km 해상도의 남한 상세 시나리오를 바탕으로 17개 광역시·도, 261개 시군구, 3,501개 읍면동 단위의 행정구역별 기후 전망 자료가 구축되어 있다. 이 자료는 기온(평균·최고·최저), 강수량, 극한 기후지수 등 총 27종의 기후 요소에 대해 2021년부터 2100년까지의 시나리오별 월·연 단위 미래 전망치를 산출한 것으로, 원래의 고해상도 격자(1km × 1km) 기후모델 결과를 행정구역 단위로 공간 집계하여 지역별 특성을 반영한 기후정보를 제공한다. 본 연구는 이러한 행정구역 기반 SSP 시나리오 자료를 관측 기반 기후 데이터와 결합하여, 제주지역을 중심으로 향후 기후변화가 농업 부문에 미칠 영향을 분석·예측하였다. <표 1>에서는 전국 및 제주도를 대상으로, 관측 기반 자료와 SSP2-4.5 및 SSP5-8.5 시나리오에 따른 평균기온 및 강수량 변화 비교 결과를 제시한다.

<표 1>에서 확인할 수 있듯이, 2001~2020년의 실제 관측치 평균과 비교할 때 SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오 모두에서 전국 및 제주도의 평균기온은 지속적인 상승 추세를 보인다. 특히 SSP5-8.5 시나리오에서는 2061~2080년 기간에 제주도의 평균기온이 20℃를 상회하는 것으로 나타나, 제주지역의 아열대화가 한층 더 뚜렷하게 진행될 것으로 전망된다. 강수량 역시 전반적으로 증가하는 경향을 보였으며, 그 증가 폭은 전국 평균에 비해 제주도에서 더욱 크게 나타날 가능성이 높다.

표 1. 관측 기반 자료와 SSP 시나리오에 따른 연평균 기온·강수량 변화 비교

시나리오	기간	전국 평균기온 (°C)	제주도 평균기온 (°C)	전국 평균 강수량 (mm)	제주도 평균 강수량 (mm)
과거	2001~2020	12.90	16.14	1,373.60	1,732.06
SSP2-4.5	2041~2060	14.97	18.11	1,432.81	1,851.96
SSP2-4.5	2061~2080	15.70	18.77	1,550.88	2,078.79
SSP5-8.5	2041~2060	15.66	18.75	1,431.24	2,031.08
SSP5-8.5	2061~2080	17.35	20.30	1,535.81	2,175.08

자료: 기상청(2025). 기상자료개방포털; 기상청(2025). 기후정보포털.

2.2.2. 제주도 극한기후

특정 임계온도를 초과하거나 미달하는 극한의 기후 조건은 생육 단계에 직접적인 영향을 미치므로 작물 생산성의 변화는 평균기온이나 강수량만의 변화로 충분히 설명하기 어려운 점이 있다. 예를 들어 일정 수준 이상의 고온이 지속되면 열 스트레스로 인해 열과(裂果) 현상이나 품질 저하가 발생하며, 반대로 임계온도 이하의 지속적인 저온 노출은 냉해로 이어질 수 있다. 또한, 작물마다 적정 생육 온도와 온도 민감도가 다르다는 점도 중요하다. 이에 따라 본 연구는 작물 분류에 맞춰 서로 다른 임계온도 기준과 계산 기간을 적용한 극한기후 변수를 구축하였다(〈표 2〉).

표 2. 극한 기온 변수 임계온도 기준표

작물 유형	기간	변수명	임계온도
겨울, 월동 작물	11~2월	고온 일수	평균기온 > 10℃
		저온 일수	평균기온 < 5℃
일반 작물	3~9월	고온 일수	평균기온 > 28℃
		저온 일수	평균기온 < 10℃

자료: 저자 작성.

〈표 2〉의 겨울 및 월동 작물의 임계온도를 설정하기 위해, 본 연구는 1960년부터 1990년까지의 제주도 일 평균기온 자료를 활용하여 겨울철(11월부터 이듬해 2월까지)의 월별 기온 분포를 산출하였다. 일반 작물도 같은 방식으로 생육기간인 3월부터 9월까지의 월별 기온 분포를 분석하였다. 이후 산출된 월별 기온 분포에서 하위 10%와 상위 10%에 해당하는 제10 백분위수(P10)와 제90 백분위수(P90)를 참고하여, 각각 저온 및 고온의 극한 임계온도로 설정하였다.

〈표 3〉과 〈표 4〉는 이러한 기준에 따라 산정한 극한 기온 일수를 전국과 제주도 단위에서 비교한 결과이다. 분석 결과, 제주도는 겨울철 저온일 수가 빠르게 감소하는 반면 10℃ 초과일 수는 큰 폭으로 늘어나는 것으로 나타났다. 생육기에도 28℃ 초과 고온일 수가 뚜렷하게 증가하고, 10℃ 미만 저온일 수는 감소하는 경향이 확인된다. 이러한 변화는 전국 평균보다 제주도에서 더욱 두드러지며, 제주도가 기후변화에 따라 고온화 및 아열대화의 영향을 상대적으로 크게 받고 있음을 시사한다.

표 3. 시나리오별 전국 및 제주도 3~9월 28℃ 초과일, 10℃ 미만일 수 전망

시나리오	기간	전국 (28℃ 초과)	제주도 (28℃ 초과)	전국 (10℃ 미만)	제주도 (10℃ 미만)
과거	2001~2020	7	15	36	17
SSP2-4.5	2041~2060	33	49	24	10
SSP2-4.5	2061~2080	43	57	20	7
SSP5-8.5	2041~2060	21	54	19	6
SSP5-8.5	2061~2080	65	76	14	3

자료: 기상청(2025). 기상자료개방포털; 기상청(2025). 기후정보포털.

표 4. 시나리오별 전국 및 제주도 11~2월 10℃ 초과일, 5℃ 미만일 수 전망

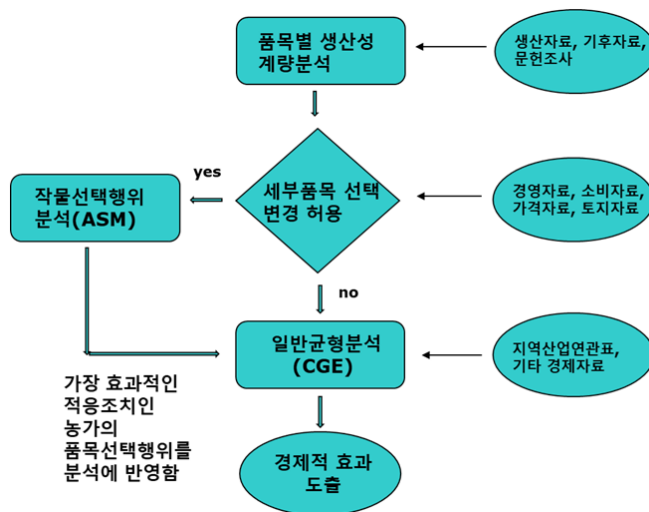
시나리오	기간	전국 (10℃ 초과)	제주도 (10℃ 초과)	전국 (5℃ 미만)	제주도 (5℃ 미만)
과거	2001~2020	1	9	50	20
SSP2-4.5	2041~2060	4	17	41	9
SSP2-4.5	2061~2080	5	19	39	8
SSP5-8.5	2041~2060	4	20	39	8
SSP5-8.5	2061~2080	8	30	31	1

자료: 기상청(2025). 기상자료개방포털; 기상청(2025). 기후정보포털.

3. 연구 방법 및 절차

〈그림 1〉이 본 연구의 전체 진행 절차를 보여준다. 최종적으로 본 연구는 제주도의 CGE 모형을 개발하여 기후변화가 유발하는 일반균형적 경제효과를 분석한다. CGE 모형은 제주도의 경제활동을 7가지 1차산업과 6가지 그 외 산업의 13개 산업으로 구분하여 구축되며, 도 내 노동, 토지, 자본과 각 산업이 공급하는 중간재, 그리고 외부에서 수입한 중간재를 이용해 생산하고, 생산된 제품도 수출하거나 수입하는 열린 경제를 분석한다. CGE 모형 구축에는 제주도의 『지역산업연관표』와 그 외 몇 가지 추가 자료가 활용된다. 그러나 경제적 효과 분석 이전에 먼저 55개 품목의 생산성 변화를 기후변화의 영향을 반영하여 계량경제모형을 이용해 분석한다. 여러 형태의 생산성 함수와 변수 조합을 시험하며, 추정 결과를 종합하여 품목별로 미래의 기후 시나리오별로 발생할 생산성 변화율의 대표치를 도출하고, 그 결과를 CGE 모형에 반영한다.

그림 1. 본 연구의 구조



자료: 저자 작성.

CGE 모형 내의 7가지 1차산업 중 채소 및 과실의 경우 제주도 농업의 주된 분야이면서 39가지의 세부 품목을 포함하기 때문에 기후변화 시 이들 품목 간의 자원배분이 중요한 문제가 된다. 따라서 본 연구는 채소 및 과실 부문이 기후변화 발생 시 39개 세부 품목별로 재배면적을 배정하는 과정을 먼저 분석하며, 이를 위해 ASM을 수립한다. 세부 품목의 지역별 경영자료와 자원 부존량 자료, 그리고 소비자자료와 가격자료를 결합하여 기후변화에 반응하여 채소 및 과실류의 세부 품목별 생산량이 달라지는 결과를 도출하며, 그 결과 채소 및 과실 부문 전체의 통합 생산성이 얼마나 변하는지를 추정한다. 이 추정 결과를 CGE 모형의 채소 및 과실 부문 생산성 지수로 반영하여 최종 경제적 효과 분석 결과를 도출한다. 품목의 변경은 생산자가 행할 수 있는 가장 근본적인 기후변화 적응 조치이기 때문에 이러한 분석 과정은 생산자 적응 조치를 적극 반영하는 분석법이라 할 수 있다.

4. 기후변화의 품목별 생산성 영향 분석

4.1. 분석 자료

기후변화가 농업 생산성에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 먼저 농업 생산성을 나타내는 지표를 구축하여야 한다. 모든 작물에 대해 공통으로 적용될 수 있으면서, 비교적 장기에 걸쳐 일관된 방식으로 집계된 생산성 지표를 활용하기 위해 본 연구는 농촌진흥청에서 제공하는 『표준소득』의 주산물가액 수량 지표를 활용하였다. 이 자료는 도 단위로 제공되기 때문에, 제주도에 생산되거나 제주도의 표준소득 자료가 별도로 제공되지 않는 품목은 가장 인접한 도의 자료를 활용하였다.

더불어 제주도에 재배되는 각 작목의 재배면적 자료와 생산 관련 자료는 KOSIS의 『농업면적조사』, 농림축산식품부의 『농림축산식품 주요통계』, 『농림사업정보시스템(Agrix)』 등 공공 통계를 통해 수집하였다. 특히 노지감귤, 월동감귤, 시설감귤 등의 감귤류와 한라봉, 천혜향, 레드향, 황금향 등 만감류의 경우에는 세부 재배면적을 정확하게 파악하기 위해 감귤연합회와 제주특별자치도 감귤진흥과에서 제공하는 상세 통계자료를 추가로 활용하였다. 또한 제주도 기후가 아열대화되는 추세에 따라 재배면적이 확대되고 있는 용과, 구아바, 망고 등 아열대 과수에 대해서는 제주특별자치도 감귤특작과로부터 생산 및 면적 자료를 확보하여 분석에 포함하였다. 이들 자료는 생산성 효과 분석은 물론, ASM과 CGE 모형 구축에도 사용된다.

4.2. 계량모형 추정 방법의 선택

그동안 관련 연구들은 기후변화의 생산성 영향을 크게 작물모형(crop model)과 계량경제모형

(econometric model) 두 가지 방법을 이용해 분석해 왔다. 작물모형은 작물의 유전적 특성, 기후 및 토양 특성, 경작 관행 변수들이 작물 성장에 미치는 영향을 수리적으로 표현하며, 주로 농학이나 작물학 분야에서 개발·사용되고, 기후변수 영향을 시뮬레이션할 수 있다(예: Rosenzweig et al., 2014; 남재철 외, 2021). 계량경제학 모형은 과거 관측된 기후/기상자료와 기술 변수, 생산 기반 특성들이 관측된 생산성에 미치는 영향을 계량경제기법으로 추정하는 분석법이다(예: Ortiz-Bobea, 2021; 조현경·권오상, 2014).

이 두 방법 모두 전 세계적으로 광범위하게 사용되었지만 쌀, 밀, 옥수수, 대두 등 식량작물에 주로 적용되었으며, 제주도의 주산물인 채소나 과실류에 적용된 사례는 찾기 어렵다. 본 연구는 계량경제 추정법을 사용하되, 1) 곡물 및 식량작물, 2) 채소 및 과실, 3) 기타작물, 4) 임산물로 구분되는 총 55가지 품목의 생산성 변화를 추정한다. 축산의 경우 기후변화의 영향을 받지만, 지역별 생산성 자료가 별도로 제공되지 않고 전국 자료만 제공되어 자료의 공간적 해상도가 낮고 사용할 수 있는 관측치 수도 매우 제한되는 문제가 있다. 따라서 기후조건의 글로벌 이질성을 반영한 Liu et al.(2024)의 축산 생산성 추정 결과 중 한국에 해당하는 추정치를 적용하며, 결과적으로 축산부문은 기후변화로 인해 1%의 생산성 손실을 가정한다.⁵⁾

4.2.1. 추정식 설정

생산성 모형 추정을 위해 다음의 모수적(parametric) 방법과 비모수적(nonparametric) 방법 모두 검토하였다.

$$y_{it} = f(\mathbf{X}_{it}; \boldsymbol{\alpha}) + \sigma(\mathbf{X}_{it}; \boldsymbol{\beta})\epsilon_{it} \quad (1a)$$

$$y_{it} = f(\mathbf{X}_{it}) + \sigma(\mathbf{X}_{it})\epsilon_{it} \quad (1b)$$

y_{it} = 시점 t 의 품목 i 단수(=생산성), \mathbf{X}_{it} = 기후변수를 포함하는 설명변수 벡터

$\boldsymbol{\alpha}$, $\boldsymbol{\beta}$ = 파라미터 벡터, ϵ_{it} = 교란항

식 (1a)의 모수적 추정식은 기후변화로 인해 발생하는 평균적인 생산성 $f(\mathbf{X}_{it}; \boldsymbol{\alpha})$ 의 변화와 그 가변성 $\sigma^2(\mathbf{X}_{it}; \boldsymbol{\beta})$ 의 변화를 모두 추정할 수 있는 모형이다. 이 모형은 최우추정법(MLE)를 이용해 한꺼번에 추정할 수도 있고, $f(\mathbf{X}_{it}; \boldsymbol{\alpha})$ 를 추정된 후 그 잔차를 이용해 가변성 부분 $\sigma(\mathbf{X}_{it}; \boldsymbol{\beta})$ 을 추정하는 2단계 추정법을 사용할 수도 있다.⁶⁾

⁵⁾ 환경부·국립환경과학원(2025)의 선행연구 종합보고서에서도 한국에서의 낙농 부문 생산성 변화가 이와 유사하다는 추정 결과가 소개된다.

⁶⁾ 실제로는 교란항의 이분산성(heteroskedasticity)을 감안하는 3단계 추정법을 사용한다(Just & Pope, 1978, 1979).

식 (1b)의 비모수 회귀모형은 2단계로 추정된다(Fan & Yao, 1998; Racine, 2019). 첫 번째 단계로 $f(\mathbf{X}_{it})$ 부분을 kernel 회귀분석과 같은 비모수 추정법으로 추정한 후, 그 잔차 제곱 $\hat{r}_{it} = (y_{it} - \hat{f}(\mathbf{X}_{it}))^2$ 을 구한다. 이어서 2단계로 이 잔차 제곱을 \mathbf{X}_{it} 에 kernel 회귀분석하여 $\sigma^2(\mathbf{X}_{it})$ 부분을 추정한다.

모수적, 비모수적 추정에는 제주도는 물론, 제주도 외 지역의 자료까지 포함하여 지역별 차이를 반영할 수 있도록 하였지만 관측치 수가 제한된 관계로 평균 생산성 부분 $f(\mathbf{X}_{it}; \boldsymbol{\alpha})$ 혹은 $f(\mathbf{X}_{it})$ 와 가변성 부분 $\sigma(\mathbf{X}_{it}; \boldsymbol{\beta})$ 혹은 $\sigma(\mathbf{X}_{it})$ 중 한 가지만 통계적으로 유의하게 추정되는 경향이 거의 모든 품목에서 나타났다. 따라서 본 연구는 $\sigma(\mathbf{X}_{it}; \boldsymbol{\beta})$ 혹은 $\sigma(\mathbf{X}_{it})$ 은 모두 1로 값이 고정된다고 보고 평균 생산성 부분만을 추정하되, 설명변수로 극한기후 지수를 추가하여 기후변동성의 영향을 부분적으로 반영하도록 하였다. 즉 모수적 추정은 OLS 방법을 적용해 $f(\mathbf{X}_{it}; \boldsymbol{\alpha})$ 를 추정하며, 비모수적 추정은 커널회귀분석을 통해 $f(\mathbf{X}_{it})$ 부분만 추정한다. 그리고 모수적 추정식에서는 선형함수와 로그 변환된 함수 등의 형태를 실험하였는데, 선형함수가 대부분 품목에서 상대적으로 안정적인 추정 성과를 보였기에 이를 최종 추정식으로 활용하였다.

4.2.2. 생산성 변화 도출

관측되는 실제 자료를 이용해 식 (1a) 혹은 (1b)를 추정한 후에는, SSP2-4.5 및 SSP5-8.5 기후 시나리오(2041~2060년)에 따른 미래 기후 전망치를 추정 결과에 대입하여, 기후변화가 향후 작물 생산성에 미칠 변화를 시나리오별로 예측하였다. 아울러 기후변화가 2001~2020년 평균에 비해 통계적으로 유의한 정도로 생산성 변화를 유발하는지를 확인하기 위해, 모수적 모형의 경우 데이터를 1,000회 복원추출하여 모형을 반복 추정하고 생산성 변화율의 분포를 구축하는 부트스트래핑 기법을 적용하였다. 유의성 검정은 10%, 5%, 1%의 유의수준을 기준으로 수행하였으며, 통계적으로 유의한 모형의 실제 유의수준은 대부분 1% 미만이었다. 비모수적 모형의 경우에는 추정 결과를 이용해 2001~2020년 평균 생산성 예측치의 90%, 95% 신뢰구간과, 2041~2060년 예측치의 90%, 95% 신뢰구간을 도출한 후, 두 신뢰구간이 서로 겹치는 부분이 있는지를 확인하였다.

이용가능한 관측치 수가 제한되지만, 식 (1a) 및 (1b)를 추정할 때 설명변수의 조합도 다양화를 시도하였다. 평균기온뿐만 아니라 일 최고기온 및 일 최저기온, 적산온도, 재배기간 동안 특정 온도(예: 작물별 고온·저온 임계치)를 초과하거나 혹은 미만인 날수, 강우량, 풍속, 증발산량 등 여러 종류의 기후변수를 잠재적 설명변수로 설정하여 분석을 시도하였다. 이는 작물의 생육기간 동안 나타나는 고온 스트레스, 저온 피해, 누적 온도 조건, 수분 부족에 따른 스트레스, 강풍 및 증발산 증가 등 다양한 메커니즘을 종합적으로 반영하기 위함이었다.⁷⁾ 그러나 품목별 관측치 수가 충분하지 않고, 기후변수 간 다중공선성(multicollinearity) 문제 등과 같은 현실적인 제약을 고려해야 하는 상황에서, 모든 변수를 동

시에 포함하는 것은 통계적 안정성과 추정 신뢰도를 낮출 위험이 있었다. 따라서 여러 변수 조합과 모형을 반복적으로 비교·검증한 끝에, 생산성 변화를 가장 안정적으로 설명하는 핵심 변수 및 모형을 <표 5>와 같이 선별하였다. <표 5>의 추정 모형과 변수 조합 외에도 여러 추정법과 변수 조합이 시도되었는데, 이용할 수 있는 관측치 수의 제한 등을 감안하여 이들 8가지 모형과 변수 조합을 중점 활용하였다.

<표 5>의 윗부분은 모수적 추정 모형에서 검토한 설명변수 조합을 나타낸다. 조합 1과 2는 평균기온, 평균기온 제곱항, 합계 강수량, 연도(기술 수준)를 포함한 기본 모형이며, 지역 더미 설정 방식에 서로 차이가 있다. 조합 3과 4는 기본 모형에 고온·저온 등 극한기후 변수를 추가한 모형이며, 조합 5와 6은 평균기온 관련 변수를 제외하고 극한기후 변수, 합계 강수량, 연도, 지역 더미만으로 구성된 모형이다. 이들 조합 외에도 연도 변수를 제외하거나 교호작용항을 추가하는 등 다양한 대안적 조합을 함께 검토하였다.

<표 5>의 아랫부분은 비모수적 추정 모형에서 검토한 설명변수 조합을 나타낸다. 조합 1은 평균기온, 합계 강수량, 연도(기술 수준), 극한기후 변수를 포함한 모형이다. 조합 2는 평균기온 관련 변수를 제외하고 합계 강수량, 연도, 극한기후 변수를 포함한 모형이다. 비모수적 추정에서는 제주도 기준 더미를 공통적으로 적용하였으며, 두 조합을 비교하여 평균기온 수준과 극한기후 조건이 생산성 변화에 미치는 영향을 보완적으로 검토하였다.

표 5. 추정 모형 설명변수 선택

모형	조합	설명변수 구성	더미 변수	극한 기온 변수
모수적 모형	조합 1	평균기온, 평균기온의 제곱항, 합계 강수량, 연도 (기술 수준)	제주도 기준 더미 (제주도 = 1, 다른 도 = 0)	미포함
	조합 2	평균기온, 평균기온의 제곱항, 합계 강수량, 연도 (기술 수준)	타지역 기준 더미 (제주도 = 0, 다른 도 = 개별 더미)	미포함
	조합 3	평균기온, 평균기온의 제곱항, 합계 강수량, 연도 (기술 수준)	제주도 기준 더미 (제주도 = 1, 다른 도 = 0)	포함
	조합 4	평균기온, 평균기온의 제곱항, 합계 강수량, 연도 (기술 수준)	타지역 기준 더미 (제주도 = 0, 다른 도 = 개별 더미)	포함
	조합 5	합계 강수량, 연도 (기술 수준)	제주도 기준 더미 (제주도 = 1, 다른 도 = 0)	포함
	조합 6	합계 강수량, 연도 (기술 수준)	타지역 기준 더미 (제주도 = 0, 다른 도 = 개별 더미)	포함
비모수적 모형	조합 1	평균기온, 합계 강수량, 연도 (기술 수준)	제주도 기준 더미 (제주도 = 1, 다른 도 = 0)	포함
	조합 2	합계 강수량, 연도 (기술 수준)	제주도 기준 더미 (제주도 = 1, 다른 도 = 0)	포함

자료: 저자 작성.

이러한 모수적, 비모수적 추정 모형과 다양한 설명변수 조합을 비교한 뒤, 생산성 변화가 통계적으로 유의하고 추정 결과가 비교적 안정적으로 나타나는 경우의 전망치를 최종적으로 채택하였다. 일부 품목에 대해서는 복수의 추정 결과 평균치를 활용하였다. 이들 최적 모형에 있어 사용된 자료의 관측치와

7) 적합한 설명변수 선정을 위해 현지 채소 및 과수 분야 전문가와의 면담도 거쳤다.

자료 수집 지역, 그리고 최적 모형으로부터 생산성 변화율 추정치를 도출하는 방법 등은 <부표 1>이 설명하고 있다.⁸⁾

4.3. 계량모형 추정의 결과

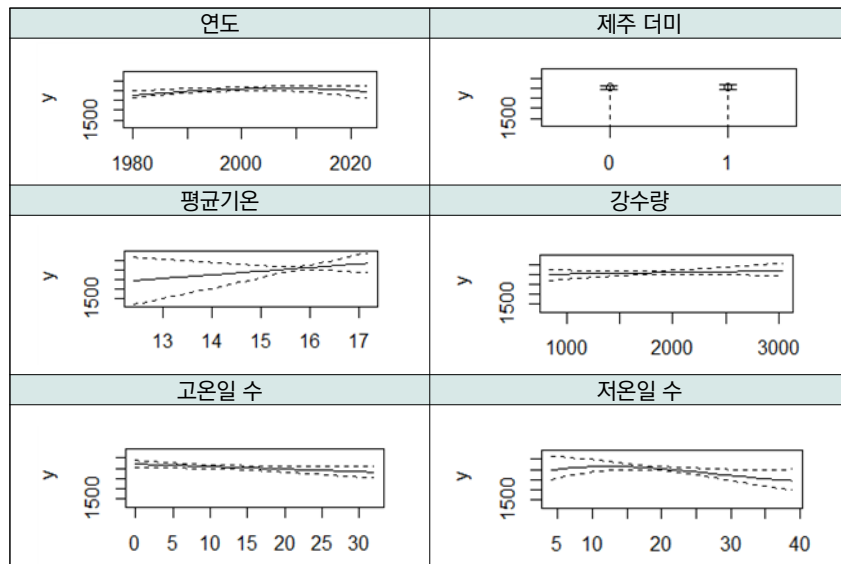
모수적 추정과 비모수적 추정의 결과는 작목별로 다를 수밖에 없으나, 평균기온의 상승이 (유의하게 혹은 유의하지 않게) 생산성을 높이는 경향이 있지만 고온일 수 증가는 반대로 생산성을 낮춘다는 결과는 다수의 품목에서 발견되는 현상이다. 아래의 <표 6>과 <그림 2>의 추정 예는 감귤을 대상으로 적용된 모수적, 비모수적 모형 추정 결과가 실제로 그려함을 보여준다.⁹⁾

표 6. 모수적 추정(조합 1) 노지감귤 회귀분석 결과

변수	계수(Coefficient)	표준오차(Standard Error)
연도	7.123656	7.323174
평균기온	5,551.428871**	2,235.008642
평균기온의 제곱항	-171.431218**	71.295791
강수량	0.179298	0.146269
제주도 더미	-504.721606	654.018544

주: *, **, ***는 각각 10%, 5%, 1% 유의수준에서 통계적으로 유의함을 의미함.
 자료: 저자 작성.

그림 2. 노지감귤 생산성 함수의 비모수적 추정



자료: 저자 작성.

8) 모수적 추정 결과가 우선 적용되고, 일부 품목은 비모수적 추정 결과가 함께 적용되었다. 두 가지 이상 모형의 추정 결과를 통합하여 평균적인 생산성 변화율을 도출하는 과정 등에서 연구진의 주관적 판단이 어느 정도 작용하였다.

9) 비모수적 kernel 회귀분석은 local-linear 추정치를 구하며, bandwidth 선택을 위해 expected Kullback-Leibler cross-validation 기법을 적용하였다. 추정에는 T. Hayfield와 J. S. Racine이 개발한 R 패키지 np가 사용되었다(Racine, 2019).

본 연구에는 SSP2-4.5와 SSP5-8.5 두 가지 기후변화 경로를 적용하였다. <부표 2>의 시뮬레이션 1에서의 생산성 변화 추정치가 본 연구가 취하는 기본 시나리오에서 2041~2060년간의 품목별 생산성이 2001~2020년에 비해 어느 정도나 변하는지를 보여준다.

다수 품목에서 기후변화로 인해 생산성이 감소하는 것으로 추정되었지만, 고추, 녹두, 마늘 등 일부 품목에서는 소폭이라도 생산성이 높아질 것으로 추정되기도 하였다. 생산성 변화율이 0으로 기록된 품목은 여러 생산성 함수 형태를 추정하여도 통계적으로 유의한 정도로 생산성 변화를 발견하기 어려운 품목이다. 미세한 차이기는 하지만 대부분 품목에 있어서 SSP2-4.5보다는 SSP5-8.5의 기후변화 시나리오에서 생산성 변화폭이 더 크다는 것도 확인된다.¹⁰⁾

아울러 특별히 언급할 필요가 있는 품목은 한라봉, 황금향, 구아바, 레드향, 천혜향, 망고, 블루베리, 용과의 8가지 만감류 혹은 아열대성 과일들이다. 이들 과일은 극히 최근 연도를 제외하면 제주도에에서만 주로 생산되고, 따라서 제주도 외 지역의 생산자료를 얻을 수 없다. 또한 제주도 역시 재배되기 시작한 것이 최근인 경우가 많아 생산성 함수 추정에 필요한 만큼의 관측치를 얻기가 힘들다. 대부분 10개 미만의 관측치만 활용할 수 있으며, 따라서 기후변수나 기술 변수(=연도) 등의 설명변수의 통계적 유의성 추정치를 신뢰할 수 없는 문제가 있다. 이들 품목의 경우 평균기온 상승은 대체로 생산성을 높이기는 하지만 야간 고온이 지속되면 열과 피해가 발생하는 것으로도 알려져 있다. 그리고 아직은 새로운 품목들이고, 따라서 재배 경험이 쌓이면서 생산성이 높아지는 학습효과(learning effect)도 있으므로 그러한 효과와 기후변화의 영향을 분리해 내기 어렵다는 문제도 있다.

따라서 본 연구는 또 다른 기후변화 효과 시뮬레이션 2를 도입한다. 기본 시나리오를 반영하는 시뮬레이션 1은 이들 8가지 품목의 생산성은 기후변화의 영향을 받지 않는다고 간주하는 비교적 소극적인 대응을 가정한다. 반면 시뮬레이션 2는 비록 통계적 유의성은 인정하기 어렵더라도 평균기온 상승으로 생산성이 높아지는 추정 결과 자체를 반영해 주어 이들 만감류와 아열대 작물 중 일부의 생산성이 높아진다고 보는 시뮬레이션이다. 즉 열과 피해 등은 재배관리로 통제하고, 기온상승으로 인한 생산성 증대 혹은 생산비 하락의 효과는 얻는 적극적인 대응을 한다는 전제 하의 시뮬레이션이 된다. 그러나 한라봉, 황금향, 구아바 세 품목은 평균기온 상승에 대한 반응도 매우 약하여 시뮬레이션 2에서도 여전히 생산성 증대가 없다고 가정한다.

<표 7>은 이러한 두 가지 시뮬레이션에서 기후변화로 생산성이 늘어나는지로 품목을 재분류하여 보여준다.

10) 온실가스는 배출된 후 장기간에 걸쳐(특히 CO₂의 경우 1,000년 이상) 기후변화를 유발한다. 따라서 비교적 가까운 미래인 2041~2060년의 생산성 변화는 지금부터의 사회·경제적 발전 경로 차이보다는 2020년 이전에 이미 배출된 온실가스의 영향을 많이 받기 때문에 SSP 시나리오별로 큰 차이를 가지지 않는다. 그러나 2100년 가까운 연도에서는 SSP 시나리오별로 생산성 변화가 보다 큰 차이를 가지게 된다.

표 7. 기후변화의 품목별 생산성 영향

생산성	시뮬레이션 1	시뮬레이션 2
증가	가지, 고추, 녹두, 들깨*, 마늘, 봄배추, 브로콜리*, 시설상추, 양파*, 월동무, 조, 참깨*, 팥	가지, 고추, 녹두, 들깨*, 마늘, 봄배추, 브로콜리*, 시설상추, 양파*, 월동무, 조, 참깨*, 팥, 레드향*, 천혜향*, 망고*, 블루베리*, 용과*
감소	가을감자*, 감귤, 고구마, 나리, 단감, 당근*, 대파, 더덕, 딸기*, 땅콩, 맥주보리*, 메밀, 방울토마토, 봄감자*, 봄무, 상추, 수박*, 시금치*, 시설감귤, 시설딸기*, 시설오이*, 시설토마토*, 시설호박*, 양배추, 오이, 유채, 옥수수*, 참외, 콩, 키위*, 호박	가을감자*, 감귤, 고구마, 나리, 단감, 당근*, 대파, 더덕, 딸기*, 땅콩, 맥주보리*, 메밀, 방울토마토, 봄감자*, 봄무, 상추, 수박*, 시금치*, 시설감귤, 시설딸기*, 시설오이*, 시설토마토*, 시설호박*, 양배추, 오이, 유채, 옥수수*, 참외, 콩, 키위*, 호박
유지	레드향, 쪽파, 월동배추, 한라봉, 천혜향, 황금향, 망고, 구아바, 블루베리, 용과	쪽파, 월동배추, 한라봉, 황금향, 구아바

주: *는 10% 이상 변화를 의미함.

자료: 저자 작성.

한편, 본 연구는 시뮬레이션 1과 2 외에서도 생산성 변화의 최상(the best) 시나리오와 최악(the worst) 시나리오를 각각 가정하는 시뮬레이션도 별도로 시행한다. 이 두 가지 추가 시뮬레이션을 시행하는 이유는 분석에 개입되는 불확실 요인과 시뮬레이션 1, 2의 생산성 변화 전망치 선택에 있어 어느 정도의 자의성이 개입되는 점을 감안하기 위함이다.¹¹⁾ 연구에 개입될 수 있는 불확실성은 기후변화 자체의 불확실성, 사용된 자료의 측정오차와 제한된 표본에 따른 불확실성, 생산성 변화 추정 모형 설정이 범할 수 있는 오류의 가능성, 생산성 변화를 반영하는 ASM 모형과 CGE 모형 내의 가정과 파라미터 사용의 불명확성 등, 여러 측면에서 발생할 수 있다. 이들 불확실성 요인을 모두 반영하는 데에는 현실적인 어려움이 있으므로 본 연구에서는 생산성 변화 추정에 개입된 불확실성에 초점을 맞춘 두 가지 추가 시뮬레이션을 하도록 한다.

단수 추정 모형에서도 불확실성 발생 요인은 여러 가지일 수 있으며, 특히 모형의 설정과 추정치의 확률적 성격이 모두 생산성 전망치 불확실성의 원인이 된다. 추정치가 확률변수이기 때문에 발생하는 불확실성은 추정된 분산-공분산 행렬을 활용하는 몬테카를로 시뮬레이션을 적용해 생산성 전망치를 다수 도출하여 반영할 수 있다. 하지만 이는 개별 품목별로만 가능하며, 기후변화 영향이 각 품목 생산성에 미치는 영향이 서로 다르므로 55개 모든 품목의 전망치 시뮬레이션 결과가 나타내는 조합을 모두 반영하기는 어렵다. 따라서 이런 경우에는 Pindyck(2022)과 Hassler et al.(2018)이 권하는 바와 같이 최상(the best)과 최악(the worst) 시나리오에서 발생할 기후변화의 영향을 함께 검토하는 대안을 선택할 수 있다. 이 방법은 생산성 변화 전망치의 신뢰구간을 제시하지는 않지만, 대표 시나리오와 함께 최악의 시나리오와 최상의 시나리오에서 발생할 수 있는 기후변화 영향을 함께 검토함으로써 기후변화 영향 분석에 개입된 불확실성이 미치는 영향의 크기와 방향을 가늠할 수 있게 한다.

시뮬레이션 1 및 2와 별도로 시행되는 최악 및 최상 시나리오에서의 시뮬레이션을 각각 시뮬레이션 3 및 4라 부를 수 있다. 최악 시나리오는 <표 5> 및 여타 추가 모형을 적용하였을 때 통계적으로 유의미하면서도 품목별로 생산성 감소율이 가장 높거나 증가율이 가장 낮은 경우를 반영하는 것이다. 반면 최

11) 이 두 추가 시뮬레이션은 SSP2-4.5 기후변화 경로에 적용된다.

상 시나리오는 품목별로 생산성 감소율이 가장 낮거나 증가율이 가장 높은 경우를 반영한다. <부표 2>가 최악 시나리오와 최상 시나리오의 시뮬레이션에 적용되는 생산성 변화율 전망치를 품목별로 정리하여 보여준다.¹²⁾

5. 경제적 영향 분석

본 연구는 1) 곡물 및 식량작물, 2) 채소 및 과일, 3) 기타작물, 4) 축우, 낙농 및 육우, 5) 기타축산, 6) 임산물, 7) 수산물의 7가지 1차산업과 그 외 6가지 산업, 총 13개 산업으로 제주도 경제를 분류한다. 그리고 1차산업의 경우 수산물을 제외한 6가지 산업 내 세부 품목의 생산성이 기후변화로 인해 영향을 받는 정도를 추정하는데, 축산부문은 글로벌 연구 결과를 그대로 적용하고, 나머지 경종 부문은 55개 세부 품목별 생산성 변화를 모두 계량모형을 이용해 추정한다.

이렇게 도출된 2041~2060년의 생산성 변화가 다른 부분은 불변인 채 2020년의 제주도 경제에 적용된다면 도 경제 전체에 어떤 영향이 발생하는지를 분석하는 것이 본 장의 목적이다. 분석을 위해서는 SSP2-4.5와 SSP5-8.5의 두 가지 기후변화 시나리오를 각각 적용하고 그 차이를 확인하는 데, 이미 앞에서 밝힌 바와 같이 기후변화 시나리오별 기온 상승 차이는 21세기 후반기에 갈수록 커지기 때문에 2041~2060년 기간에는 시나리오별 영향의 차이가 아직 크지 않다는 것이 확인될 것이다.

이상의 내용을 분석하는 주 분석 수단은 제주 경제 CGE 모형이며, 아래에서 모형의 기본 구조가 설명된다. 그리고 채소 및 과일 부문의 경우 39개의 많은 세부 품목을 포함하기 때문에 ASM에 세부 작물별 기후변화 생산성 영향을 반영해 작목 구성과 품목별 판매액 비중이 달라지도록 한 후, 그로부터 다시 채소 및 과일류 부문 전체의 생산성 변화를 가중 평균으로 도출해 CGE 모형에 반영한다.

5.1. CGE 모형 구축

제주도 CGE 모형은 2020년 『생산자가격 통합소분류 지역산업연관표』를 바탕으로 작성한 사회계정행렬(social accounting matrix: SAM)에 기반을 두고 있다. 산업 구분은 13개 부문을 가지도록 하되, 1차산업은 지역산업연관표를 그대로 따라 가능한 한 세밀하게 나타나도록 하였다.¹³⁾

12) 극히 일부 품목의 경우 시뮬레이션 1에서의 값보다도 더 높거나 낮은 생산성 변화율을 통계적으로 유의하게 보여주는 모형이 존재하지 않으며, 이 경우 시뮬레이션 1에 적용된 전망치가 최상 혹은 최악 시나리오에도 적용된다. 그리고 더덕의 경우 생산액은 매우 적으면서 최악/최상 시나리오에서 너무 큰 생산성 변화율을 보여 CGE 모형의 수렴을 어렵게 하기 때문에 최악/최상 생산성 변화율 전망치의 약 1/3을 각각 적용하였다. 일부 품목에서 나타난 생산성 변화율이 100% 넘는 추정 결과는 반영 대상 모형에서 제외하였다.

13) 본 연구가 사용하는 CGE 모형은 IFPRI가 개발한 표준적인 CGE 모형(Löfgren et al., 2002)을 최대한 따르고 있으나, 사용하는 자료의 성격과 연구 목적에 맞게 상당한 변형을 주어 새로이 구축한 것이다. 모든 가격은 소비자물가 대비 가격이며, 도외부 저축을 고정시키는 대신 정부 저축이 세입-세출 균형을 맞추도록 하며, 저축-투자 균형은 투자액이 맞추도록

부문별 생산은 노동, 토지, 자본의 3가지 부가가치재와 13가지 중간재를 투입 요소로 활용한다(〈그림 3〉). 산업연관표의 피용자보수가 노동투입이며, 자본투입은 영업잉여와 고정자본소모로부터 구축한다. 토지는 한국 산업연관표에서는 투입요소로 간주하지 않는다. 하지만 수산업을 제외한 1차산업은 생산에서 토지의 비중이 높을 수밖에 없다. 실제로 1차산업은 여타 산업에 비해 산업연관표상의 영업잉여 비중이 매우 높아 영업잉여 중 상당 부분이 토지로부터 기인한 것으로 해석하는 것이 적절하다. 따라서 1차산업의 영업잉여를 여타 산업의 영업잉여율과 비교하여 그 일부를 토지투입으로 전환하였다. 세 가지 부가가치 투입재는 CES(Constant Elasticity of Substitution) 생산함수를 통해 총부가가치 투입재를 만들어 낸다. 이때 총부가가치 생산의 비용최소화 원리가 적용된다.

『지역산업연관표』에서는 국가 전체 산업연관표와 달리 중간재도 제주도, 국내 각도, 그리고 해외 등 제공처가 별도로 집계된다. 따라서 제공처를 달리하는 중간재를 부문별로 통합하는 것이 필요하다. 〈그림 3〉의 예에서처럼 채소 및 과일 부문이 에너지 및 상수도를 중간재로 사용한다면, 제주도에서 공급되는 에너지 및 상수도와 타도와 해외에서 들여온 “수입” 에너지 및 상수도를 별개의 중간재로 간주하고,¹⁴⁾ 이 두 가지 유형의 중간재를 CES 생산함수를 통해 통합한 에너지 및 상수도 중간재를 만들도록 한다. 이러한 절차는 나머지 중간재에 대해서도 마찬가지로 적용한다.

13가지의 통합중간재는 다시 결합되어 하나의 총중간재가 되고 이것이 부가가치재와 결합되어 최종 산출물 생산에 사용될 수 있지만, 본 연구에서는 13가지 통합중간재 각각과 총부가가치재가 Leontief 형 생산함수를 통해 결합되도록 하였다.

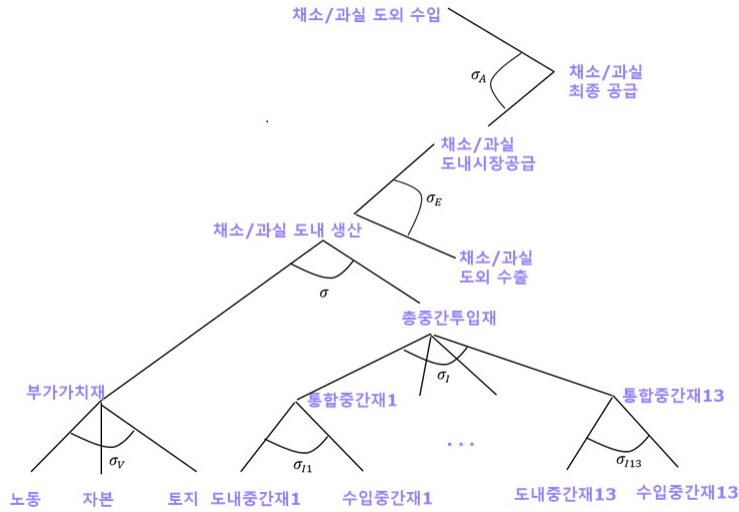
제주도에서 생산된 채소와 과일류는 도내 시장에 공급되기도 하고 도외로 “수출”되기도 한다. 생산된 양을 도내 시장과 수출 시장으로 배분하는 것은 판매 수입을 극대화하는 방식으로 이루어지며, 이때 CET(Constant Elasticity of Transformation) 함수 형태가 기술 관계식으로 적용된다.

제주도는 13가지 경제재를 중간재로 활용하기 위해서 수입하기도 하지만 소비재로 바로 수입하기도 한다. 이렇게 수입된 최종 소비재와 제주도에서 생산되어 제주도 내 시장으로 공급된 소비재가 합쳐져 제주도민이 최종 소비하는 소비재 양이 결정된다. 도내 공급 최종재와 수입 최종재 역시 CES 함수 형태를 적용해 결합하는 것으로 처리한다. 이 역시 표준적인 CGE 모형들이 취하는 절차이다. 도외 수출처를 제외한 최종 소비처는 제주도 소비자, 제주도 정부, 그리고 재고와 투자 부문 등이다.

하는 거시마감(closure) 방식을 선택하였다. 이 역시 IFPRI 모형의 선택 방식 중 한 가지이다.

¹⁴⁾ 즉 소위 Armington 가정이 적용되며, 도내 중간재와 수입 중간재가 서로를 불완전 대체하는 것으로 가정한다.

그림 3. 모형 내 산업 구조: 채소 및 과실 부문의 예



자료: 저자 작성.

제주도의 가계는 노동, 토지, 자본으로 얻은 소득을 이용해 소비하며, 일부는 저축한다. 소비지출은 LES(Linear Expenditure System) 수요체계를 따라 이루어지도록 한다. 가계는 저축 함수를 통해 저축하며, 정부와 해외를 포함하는 도외의 부문도 저축한다. 그리고 투자는 저축과 균형을 이루도록 내생적으로 도출된다. 경제 내 생산과 소비, 저축 등 모든 행위는 최적화 단계를 거치며, 각 단계에서 거래되는 투입 요소와 산출물의 시장균형이 각각 이루어지도록 가격도 내생적으로 도출된다. 모든 가격은 소비자물가지수 대비 상대가격으로 표시된다. 생산과 소비 각 단계에서 사용되는 여러 종류의 함수에는 각종 탄력성 추정치가 필요한데, 탄력성 추정치는 권오상(2015), 권오상 외(2018) 등 국내 추정치가 있는 경우는 이를 반영하고, 그렇지 않은 경우 CGE 모형들이 일반적으로 선호하는 추정치를 반영하였다.¹⁵⁾

5.2. ASM 분석 모형

채소 및 과실류 부문에서 부문 내 39개 품목의 재배면적과 생산량 결정을 위해 적용하는 ASM은 최적화 모형이자 균형 모형이다. 즉 최적화 모형의 형식을 취하되, 품목별 한계수입이 한계비용과 일치하는 시장균형 조건을 모형에 포함하고 있다.

ASM 내 39개 채소 및 과실류 품목은 다시 1) 채소류, 2) 시설작물, 3) 월동작물, 4) 과채류, 5) 만감류, 6) 아열대 작물의 6가지 그룹으로 분류하는데, 이는 이들 6개 증분류 부문 내 품목 간 생산 대체는

¹⁵⁾ 탄력성은 품목별로 다르며, 생산부문의 경우 σ_A 는 0.5~3, σ_E 는 0.5~2.0, σ_V 는 0.5~1.5, σ 는 0, σ_{I_n} 는 3을 적용하였다. 소비부문의 경우 LES 시스템의 지출탄력성은 0.7~1.2, Frisch 파라미터는 -2를 적용하였다.

상대적으로 원활하지만, 중분류 부문 간 대체는 상대적으로 어렵게 한다.¹⁶⁾

품목별 면적당 판매수입과 경영비 자료를 『농림수산물식품 주요통계』, 『농촌진흥청 농산물소득자료집』의 표준소득자료 등에서 확보하였으며, 2023년이 기준연도이다. 또한 품목별로 선형(linear) 수요곡선을 가정하며, 2차 비용함수구조를 가정한다. 분석을 위해서는 선형 수요곡선의 절편과 기울기를 식별하여야 하고, 2차 비용함수의 파라미터도 역시 식별하여야 한다. 이 과정을 포함하는 분석 모형은 총 $N(=39)$ 가지 품목을 구분하는 $K(=6)$ 가지 품목군이 있을 때 다음과 같은 비선형계획 모형으로 설정할 수 있다.

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{i \in B_k} \left[\bar{p}_{k,i} x_{k,i} \left(1 - \frac{x_{k,i} - 2\bar{x}_{k,i}}{2\epsilon_{k,i} \bar{x}_{k,i}} \right) \right] - \sum_{k=1}^K \sum_{i \in B_k} \left[\alpha_{k,i} x_{k,i} + \delta_{k,i} x_{k,i} + \frac{1}{2} \beta_k x_{k,i}^2 \right] \quad (2)$$

$$\text{s.t.}, \sum_{k=1}^K \sum_{i \in B_k} a_{k,i} x_{k,i} \leq b, \quad k = 1, \dots, K, \quad i = 1, \dots, N$$

$\bar{p}_{k,i}$ = 품목군 k 에 속하는 품목 i 의 BAU 시장가격

$\bar{x}_{k,i}$ = 품목군 k 에 속하는 품목 i 의 BAU 생산량

$\epsilon_{k,i}$ = 품목군 k 에 속하는 품목 i 의 수요의 가격탄력성

$\alpha_{k,i}, \delta_{k,i}$ = 품목군 k 에 속하는 품목 i 의 비용 파라미터

β_k = 품목군 k 에 속하는 품목의 비용 파라미터

$a_{k,i}$ = 품목군 k 에 속하는 품목 i 의 단위 생산당 필요 면적

b = 제주도 이용 가능 경지면적

식 (2)에서 내생변수는 각 품목군 내의 품목별 생산량 $x_{k,i}$ 이다($i = 1, \dots, N, k = 1, \dots, K$). 목적함수에서

$\sum_{k=1}^K \sum_{i \in B_k} \left[\bar{p}_{k,i} x_{k,i} \left(1 - \frac{x_{k,i} - 2\bar{x}_{k,i}}{2\epsilon_{k,i} \bar{x}_{k,i}} \right) \right]$ 는 채소 및 과실류 수요곡선 아래쪽 전체 면적이고,

$\sum_{k=1}^K \sum_{i \in B_k} \left[\alpha_{k,i} x_{k,i} + \delta_{k,i} x_{k,i} + \frac{1}{2} \beta_k x_{k,i}^2 \right]$ 는 생산비 합이다. 따라서 $x_{k,i}$ 로 미분하여 목적함수를 극대화하

는 과정에서 품목별 한계수입이 한계생산비와 일치하는 균형 조건이 충족되게 된다.

$p_{k,i} = a_{k,i} - b_{k,i} x_{k,i}$ 와 같은 선형의 수요함수 대신 탄력성 $\epsilon_{k,i}$ 와 BAU 가격 및 수량조건 ($\bar{p}_{k,i}, \bar{x}_{k,i}$)를 포함하는 비선형 함수가 목적함수에 포함된 것은, 이들 파라미터를 활용해 수요함수의 절편과 기울기 $a_{k,i}$

와 $b_{k,i}$ 를 식별할 수 있기 때문이다(Hazell & Norton, 1986). 수요함수에서의 파라미터 $a_{k,i}$ 와 $b_{k,i}$ 가

이처럼 $\epsilon_{k,i}$ 와 ($\bar{p}_{k,i}, \bar{x}_{k,i}$)로부터 식별되기 때문에 최적 해 $x_{k,i}$ 가 도출되면 시장가격 $p_{k,i}$ 도 내생적으로

16) 따라서 이는 각 품목의 수요함수에 대체재 가격을 포함하지 않는 한계를 완화하는 역할도 한다.

도출된다.17) 채소 및 과실류 세부 품목별 수요의 가격탄력성 $\epsilon_{k,i}$ 는 용희원 외(2023)의 추정 결과로부터 획득하였다.18)

비용함수의 세 가지 파라미터 $\alpha_{k,i}$, $\delta_{k,i}$, β_k 중 β_k 는 품목군에 공통으로 적용되고, 나머지 두 가지는 세부 품목별로 달리 적용된다. 표준소득자료에는 면적당 생산비만 기록되기 때문에 이 세 가지 파라미터는 자료로부터 바로 식별할 수 없다. 그럼에도 비용함수를 선형함수가 아닌 이와 같은 2차 함수로 설정하는 이유는 선형으로 설정하면 최적화 모형의 특성상 소위 과잉 특화(over-specialization) 현상이 발생해 모형의 $x_{k,i}$ 해가 수익성이 높은 특정 품목으로만 집중되고, BAU(Business-As-Usual)의 실제 생산량 자료와 큰 괴리를 보이기 때문이다.

따라서 세 파라미터 $\alpha_{k,i}$, $\delta_{k,i}$, β_k 를 기후변화가 없을 때의 모형의 해가 BAU 자료와 일치하도록 하는 식별 절차가 필요하다. 이 절차 때문에 $x_{k,i}$ 의 1차 항을 이루는 파라미터가 $\alpha_{k,i}$ 와 $\delta_{k,i}$ 두 가지로 구분된다. 식별 방식에 따라 차이가 있을 수 있지만, 예를 들어 $\alpha_{k,i}$ 는 자료상의 생산량 당 생산비가 되고, $\delta_{k,i}$ 는 β_k 와 더불어 별도의 절차를 통해 캘리브레이션(calibration)되어야 한다.

세 가지 파라미터 $\alpha_{k,i}$, $\delta_{k,i}$, β_k 를 식별하는 여러 방법이 있을 수 있는데, 본 연구는 실증적 수리계획법(Positive Mathematical Programming: PMP)이라 불리는 방법을 사용한다(Howitt, 1995; Röhm & Dabbert, 2003; 박경원 외, 2015). 이는 먼저 각 그룹 내 생산합 $\sum_{i \in B_k} x_{k,i}$ 가 실제로 관측되는 BAU 수치 $\sum_{i \in B_k} \bar{x}_{k,i}$ 보다 작지 않고, 또한 개별 품목별 생산량 $x_{k,i}$ 도 BAU 생산량 $\bar{x}_{k,i}$ 보다 작지 않도록 하는 제약(=캘리브레이션 제약)을 각각 추가한 선형 비용함수 모형을 푼다. 그리고 이어서 이 캘리브레이션 제약의 승수(multiplier)를 활용해 $\alpha_{k,i}$, $\delta_{k,i}$, β_k 를 식별하여, 이렇게 식별된 세 가지 파라미터를 반영하되 캘리브레이션 제약은 더 이상 포함하지 않는 식 (2)와 같은 비선형 모형을 완성한다. 이 최종 모형은 기후변화가 없다면 BAU에서의 생산량 $x_{k,i}$ 를 완전히 복원하게 된다. 기후변화의 생산성 변화 효과는 이 마지막으로 구축된 모형에 $a_{k,i}$ 를 계량경제모형 추정 결과를 반영하여 변형시킴으로써 도출할 수 있다. 즉 단위당 비용 계수 $a_{k,i}$ 를 생산성 변화율과 반비례하도록 조정해 주어 생산성 변화의 영향을 ASM에 반영한다.

이렇게 ASM 분석을 통해 기후변화로 인해 채소 및 과실류 부문 세부 품목의 생산량과 가격이 달라지는 정도를 도출한 후, 그 생산액 비중을 가중치로 하여 채소 및 과실류 부문 전체의 생산성이 달라지는 것을 다시 도출하여 CGE 모형에 반영하도록 한다.

17) 즉 $p_{k,i} = \bar{p}_{k,i} + b_{k,i}(\bar{x}_{k,i} - x_{k,i})$ 이고 $b_{k,i} = \frac{\bar{p}_{k,i}}{\epsilon_{k,i}\bar{x}_{k,i}}$ 의 관계가 성립한다.

18) $\epsilon_{k,i}$ 는 개별 품목 수요에서는 매우 높게 추정되는 경향이 있으므로 품목별로 4~8.6 분포 내에서 부여하였다.

5.3. 시뮬레이션 결과

기후변화의 경제적 효과 시뮬레이션은 네 가지로 시행된다. 시뮬레이션 1은 기본 시나리오를 반영하며, 기후변화로 인한 생산성 변화에 상대적으로 보수적인 가정을 적용하고 있다. 즉 만감류와 아열대 작물의 생산성이 기후변화에도 불구하고 유의하게 변하지 않는다고 가정한다. 이는 앞에서 밝힌 바와 같이 이들 작물의 생산성 변화에 대한 통계적 추정 결과가 유의성을 갖는다 하더라도, 자료상의 관측치 수가 너무 적은 문제를 반영한 것이다.

반면 시뮬레이션 2의 결과는 적어도 일부 만감류와 아열대 작물의 생산성이 고온을 필요로 하는 품목 특성상 평균기온 상승 시 생산성이 높아지는 것으로 나타나는 추정 결과를 통계적 유의성이나 관측치 수와는 별개로 그대로 수용한 분석 결과이다.

그리고 시뮬레이션 3과 4는 각각 최악 시나리오와 최상 시나리오의 시뮬레이션으로서, 발생 가능성은 시뮬레이션 1 및 2보다 훨씬 낮지만, 기후변화 경제적 효과의 발생 가능한 범위를 가늠하기 위해 추가로 실행된다.

이 네 가지 시뮬레이션을 각각 적용하기 전 ASM을 통해 도출한 39개 채소 및 과실류의 품목별 재배 면적 변화율은 <부록 3>에 정리되어 있다. 시뮬레이션 2에서는 시뮬레이션 1에 비해 만감류와 아열대 작물의 재배면적 증가율이 크게 나타난다. 그리고 전통적인 작물에서도 기온 상승 영향의 품목별 차이로 인해 재배면적 증감이 작목별로 꽤 다르다는 것을 알 수 있다.

시뮬레이션 3을 위해 최악의 생산성 변화 시나리오에서 ASM을 가동하면 채소 및 과실류 생산에 사용된 농경지 전체 면적의 약 29.6%가 휴경되거나 다른 작목 생산으로 전환되어야 한다. 이는 다수 품목에서 생산성 하락이 발생하기 때문에 벌어지는 일이다. 그리고 고수익/아열대성 과일 중 망고, 키위, 블루베리의 재배면적이 크게 줄어들며, 대신 레드향, 구아바, 용과의 재배면적이 늘어난다. 그 외 과채류 중에서도 당근, 시금치, 오이, 일부 시설작물 등 여러 작물의 생산이 거의 포기되는 일이 발생한다. 감귤 재배면적도 많이 줄어든다.

시뮬레이션 4를 위한 최상의 생산성 변화 시나리오에서는 황금향과 구아바를 제외한 모든 아열대 작물의 재배면적이 상당한 정도로 늘어난다. 용과, 키위, 레드향, 천혜향, 망고의 재배면적 증가율이 특히 높다. 전통적인 과채류 중에는 토지 이용의 경합으로 인해 당근, 배추류, 감귤 등의 재배면적이 줄어들지만, 시금치, 양파, 오이, 그리고 일부 시설작물의 재배면적은 상당한 정도 늘어난다.

5.3.1. 시뮬레이션 1

<그림 1>이 보여주는 분석 절차대로, 1) 2041~2060년 기후조건에서 발생할 품목별 생산성 변화 전 망치를 도출하고, 2) ASM을 가동하여 채소 및 과실류의 39개 작목의 생산액 비중 변화를 도출한 후, 3)

변화된 생산액 비중을 가중치로 적용해 채소 및 과실 부문 생산성 변화를 도출하고 CGE 모형을 가동한 결과를 아래에서 정리한다. CGE 모형 내에는 많은 종류의 변수가 있지만, 본 연구의 주요 관심사인 부문별 생산량, 가격, 부가가치, 총부가가치, 소득원별 부가가치의 변화를 <표 8> 및 <표 9>과 같이 제시한다.

<표 8>에 의하면 기타작물을 제외한 모든 농림축산물의 생산량이 줄어든다. 기후변화에 의한 생산성 감소 정도가 곡물 및 식량작물이 두 가지 기후변화 시나리오에서 모두 제일 높아서 생산 자체의 감소율도 농산물 중 가장 높다. 이어서 임산물, 축우, 낙농 및 육류, 기타축산, 채소 및 과실류의 순서로 생산량 감소율이 높다. 그러나 생산 규모의 차이로 인해 생산액의 감소는 채소 및 과실류와 축산부문이 크다고 보아야 한다.

가격은 생산량 변화와 당연히 반대 방향으로 움직인다. 하지만 도 외부에서 수입되는 양이 생산 및 소비에서 차지하는 비중이 높은 관계로 가격변화율은 도내 생산량 변화율보다는 낮다. 결과적으로 산업별 부가가치, 즉 산업이 투입된 노동, 토지, 자본에 대해 지급하는 금액은 곡물 및 식량작물이 거의 50% 전후로 감소하고, 축산관련 부문이 약 5%, 채소 및 과실이 약 4%, 그리고 임산물도 14% 전후로 감소한다. 이미 밝힌 바와 같이 기후변화 시나리오로 SSP2-4.5와 SSP5-8.5 중 무엇을 적용하는지가 증감률에 큰 영향을 주지는 않는데, 그래도 1차산업에서는 후자의 경우가 영향이 더 크게 발생하지만 채소 및 과실류의 경우 반대로 전자에서 약간 더 큰 변화가 발생한다.

1차산업 외의 부문에서는 식품가공업, 경공업, 주거 및 건설, 중화학 및 전자산업, 운송 및 서비스, 그리고 음식, 주점, 숙박 부문에서는 부가가치가 감소하지만, 에너지 및 상수도 부문에서는 조금 늘어난다. 이는 1차산업과 그 외 산업 간 토지를 제외한 노동 및 자본의 이동이 있을 수 있고, 또한 1차산업 생산물이 공급하는 원료가격이 변하고, 가계소득이 달라지면서 부문별 수요가 변하며, 수출입 거래가 부문별로 다른 영향을 받아서 발생하는 파급효과이다. 이 파급효과는 농식품 소비와 직접 연관성이 높은 식품가공업과 음식, 주점, 숙박업에서 상대적으로 크게 나타난다.

<표 9>는 제주도 경제에서 발생할 총부가가치의 변화와 그 소득원별 변화를 보여준다. 부가가치는 연간 약 670억 원 정도 감소할 것으로 나타났으며, 이는 2020년 GRDP 기준 변화율로는 0.33%에 해당한다. 소득원별로 보면 농업 부문에 생산성 감소가 집중되어 나타나므로 토지(농지)소득의 감소율이 35% 전후로 가장 높다. 그리고 노동과 자본의 총공급량은 고정되어 있지만 농업 부문 및 비농업 부문 수요가 감소하기 때문에 두 소득원의 부가가치도 줄어들며, 자본소득 감소율이 조금 더 높다.¹⁹⁾ 이처럼 비농업 부문에서 사용되는 노동과 자본의 소득도 감소한다는 것은 1차산업에 주로 발생하는 기후변화의 생산성 변화 효과가 비농업 부문에도 적지 않은 경제적 손실을 입힐 수 있음을 의미한다.

¹⁹⁾ 한편, 제주도 내 부가가치의 소득원별 비중 자체는 노동, 자본, 토지(농지)의 순서를 가진다. 농업부문에서 BAU 자본의 토지 대비 비중이 곡물 및 식량작물 0.42, 채소 및 과실 0.61, 기타작물 1.01, 기타축산 3.02, 임산물 0.52이다.

표 8. 시물레이션 1

단위: %

산업부문	생산성 변화율		생산량 증감률		가격 증감률		부가가치 증감률	
	SSP 2-4.5	SSP 5-8.5	SSP 2-4.5	SSP 5-8.5	SSP 2-4.5	SSP 5-8.5	SSP 2-4.5	SSP 5-8.5
곡물 및 식량작물	-10.38	-13.19	-46.86	-56.09	9.56	13.28	-42.58	-50.96
채소 및 과실	-2.42	-2.32	-3.53	-3.28	0.32	0.29	-4.06	-3.79
기타작물	3.86	4.65	79.60	98.72	-5.08	-5.78	69.51	86.29
축우, 낙농 및 육류	-1.00	-1.00	-5.67	-5.82	1.62	1.64	-4.83	-4.99
기타축산	-1.00	-1.00	-5.28	-5.50	0.89	0.93	-5.48	-5.66
임산물	-5.55	-5.96	-15.66	-17.59	3.76	4.32	-13.34	-14.84
수산물			3.46	3.14	0.00	-0.01	3.31	2.99
식품가공업			-0.57	-0.79	0.14	0.15	-0.66	-0.88
경공업+주거/건설			-0.07	-0.07	-0.02	-0.03	-0.20	-0.21
중화학 및 전자산업			-0.09	-0.09	0.02	0.00	-0.25	-0.26
에너지 및 상수도			0.35	0.34	-0.06	-0.06	0.14	0.14
운송 및 서비스			0.07	0.06	-0.08	-0.09	-0.09	-0.11
음식, 주점, 숙박			-0.42	-0.44	0.13	0.12	-0.51	-0.54

자료: 저자 작성.

표 9. 시물레이션 1: 소득변화

구분	SSP2-4.5		SSP5-8.5	
	변화율 (%)	증감액 (10억 원)	변화율 (%)	증감액 (10억 원)
총부가가치(GRDP)	-0.33	-67.56	-0.33	-66.79
노동소득	-0.11	-11.46	-0.12	-12.53
자본소득	-0.24	-18.52	-0.23	-17.96
토지(농지)소득	-4.98	-36.69	-4.77	-35.20

자료: 저자 작성.

5.3.2. 시물레이션 2

<표 10>와 <표 11>은 일부 만감류와 아열대 작물의 생산성이 기온 상승으로 인해 높아질 수 있음을 전제한 시물레이션 결과이다. 시물레이션 1과의 차이는 채소 및 과실류 부문에서 주로 발생하며, 이 부문에서 이제는 생산량이 BAU에 비해 증가한다. 그리고 부가가치도 6.04%(SSP2-4.5) 혹은 8.76%(SSP5-8.5) 증가하는 것으로 바뀐다.

여타부문의 경우 생산량과 부가가치의 변화율에서 시물레이션 1에 비해 큰 차이는 없지만, 채소 및 과실류 부문의 생산성 증대로 투입 요소가 이 부문으로 일부 이전하면서 시물레이션 1에 비해 대체로 여타부문의 생산과 부가가치 감소율이 조금 더 커지거나 증가율이 감소한다. 하지만 채소 및 과실류를 많이 소비한다고 볼 수 있는 음식/주점/숙박 부문의 경우 생산량과 부가가치 감소율이 시물레이션 1에 비해 낮아진다.

〈표 11〉을 보면, 이제는 시뮬레이션 1과 달리 제주도의 GRDP가 증가하는 것으로 바뀐다. 연간 61억 원(SSP2-4.5) 혹은 254억 원(SSP5-8.5) 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 소득원별로 보면 토지(농지)를 많이 사용하는 채소 및 과실류 부문의 생산이 늘어나면서 토지(농지)에 주어지는 보수가 꽤 높은 비율로 증가한다. 반면 노동보수는 여전히 감소하며, 자본은 기후변화 시나리오에 따라 변화율의 방향이 달라진다. 이러한 결과는 시뮬레이션 2에서 생산성이 높아지는 채소 및 과실 부문 작목들이 상대적으로 식부면적이 넓고 또한 다른 농산물에 비해 자본 집약적 생산구조를 가짐을 암시한다.

표 10. 시뮬레이션 2

단위: %

산업부문	생산성 변화율		생산량 증감률		가격 증감률		부가가치 증감률	
	SSP 2-4.5	SSP 5-8.5	SSP 2-4.5	SSP 5-8.5	SSP 2-4.5	SSP 5-8.5	SSP 2-4.5	SSP 5-8.5
곡물 및 식량작물	-10.38	-13.19	-57.02	-65.44	13.38	18.16	-51.11	-58.86
채소 및 과실	1.69	2.79	5.87	8.38	-0.42	-0.62	6.04	8.76
기타작물	3.86	4.65	37.36	40.48	-3.08	-3.32	33.79	36.92
축우, 낙농 및 육류	-1.00	-1.00	-6.88	-7.28	1.84	1.91	-5.98	-6.37
기타축산	-1.00	-1.00	-7.37	-8.04	1.36	1.51	-5.82	-6.04
임산물	-5.55	-5.96	-26.70	-30.10	7.50	8.98	-20.90	-23.26
수산물			-0.88	-2.16	-0.08	-0.11	-0.98	-2.26
식품가공업			-1.29	-1.64	0.04	0.02	-1.36	-1.70
경공업+주거/건설			0.04	0.07	-0.09	-0.12	-0.07	-0.04
중화학 및 전자산업			0.04	0.08	-0.08	-0.12	-0.03	0.02
에너지 및 상수도			-0.18	-0.32	-0.06	-0.07	-0.22	-0.31
운송 및 서비스			-0.03	-0.07	-0.07	-0.07	-0.11	-0.13
음식, 주점, 숙박			-0.23	-0.19	0.01	-0.03	-0.32	-0.29

자료: 저자 작성.

표 11. 시뮬레이션 2: 소득변화

구분	SSP2-4.5		SSP5-8.5	
	변화율 (%)	증감액 (10억원)	변화율 (%)	증감액 (10억원)
총부가가치(GRDP)	0.03	6.13	0.12	25.42
노동소득	-0.14	-14.63	-0.16	-16.25
자본소득	-0.00	-0.06	0.06	4.91
토지(농지)소득	3.28	24.20	5.55	40.88

자료: 저자 작성.

5.3.3. 최악과 최상 시나리오(시뮬레이션 3과 4)

〈표 12〉와 〈표 13〉은 최악과 최상의 생산성 변화율을 기후변화 시나리오 SSP2-4.5에 적용했을 때의 시뮬레이션 결과들을 보여준다. 이 두 결과는 각각 시뮬레이션 1과 시뮬레이션 2의 결과를 더 증폭

시킨 모습을 보여준다. 최악의 생산성 시나리오, 즉 모든 농작물의 생산성 전망치를 가장 낮은 수치로 취할 경우 GRDP 손실이 2,406억 원에 달한다. 토지소득 손실이 1,621억 원 정도로 가장 크지만, 자본과 노동의 소득 손실도 상당하다. 재배 비중이 높지 않은 기타작물을 제외한 모든 농산업의 생산량이 크게 줄어들며, 음식/주점/숙박업의 생산 손실도 다른 2, 3차 산업에 비해서는 크다. 그러나 농업 투입 요소의 상당 부분이 수산업과 일부 서비스 업종으로 이전하여 이들 분야의 생산 규모가 대신 커진다.

최상의 생산성 변화 시나리오에서는 반대로 5,902억 원의 GRDP 증가가 발생한다. 이 소득 증가의 대부분은 토지소득의 증가에서 오지만, 자본소득의 상당한 증가도 나타난다. 특히 부가가치율이 높고 생산액에서 차지하는 비중도 높은 채소 및 과일 부문의 생산성 향상으로 인해 축산과 수산업을 포함하는 1차산업의 투입요소 사용량 상당 부분이 채소 및 과일부문으로 이동하고, 따라서 이 부문의 생산과 부가가치 증가가 많은 반면, 나머지 1차산업에서는 감소 혹은 정체가 나타난다. 식품가공업과 그의 일부 2, 3차산업에서도 자원이 채소 및 과일 부문으로 이동할 수 있는 것으로 나타났다.

표 12. 최악과 최상 시나리오

단위: %

산업부문	생산성 변화율		생산량 증감률		가격 증감률		부가가치 증감률	
	최악 SSP 2-4.5	최상 SSP 2-4.5	최악 SSP 2-4.5	최상 SSP 2-4.5	최악 SSP 2-4.5	최상 SSP 2-4.5	최악 SSP 2-4.5	최상 SSP 2-4.5
곡물 및 식량작물	-31.85	-1.45	-79.38	-76.81	33.89	26.17	-74.06	-67.81
채소 및 과일	-11.04	29.17	-19.90	62.63	1.90	-4.29	-21.95	69.07
기타작물	2.03	9.97	190.08	-30.42	-7.78	3.03	166.14	-23.11
축우, 낙농 및 육류	-1.00	-1.00	-3.57	-13.92	1.22	2.75	-2.96	-12.51
기타축산	-1.00	-1.00	-1.44	-19.21	0.04	3.93	-5.84	-8.16
임산물	-17.55	15.0	-31.48	-32.26	10.13	8.56	-27.95	-20.52
수산물			13.58	-27.64	0.13	-0.86	13.22	-27.41
식품가공업			-0.20	-6.64	0.48	-0.93	-0.41	-6.45
경공업+주거/건설			-0.38	0.79	0.06	-0.70	-0.65	0.96
중화학 및 전자산업			-0.42	1.02	0.17	-0.99	-0.85	1.70
에너지 및 상수도			1.44	-3.78	-0.11	-0.22	0.78	-2.52
운송 및 서비스			0.28	-0.96	-0.18	-0.03	-0.15	-0.32
음식, 주점, 숙박			-1.00	0.61	0.38	-0.98	-1.17	0.63

자료: 저자 작성.

표 13. 최악과 최상 시나리오: 소득변화

구분	최악 SSP2-4.5		최상 SSP2-4.5	
	변화율 (%)	증감액 (10억 원)	변화율 (%)	증감액 (10억 원)
총부가가치(GRDP)	-1.18	-240.64	2.99	590.23
노동소득	-0.16	-16.52	-0.16	-16.59
자본소득	-0.79	-62.56	1.73	136.17
토지(농지)소득	-21.99	-162.06	63.85	470.64

자료: 저자 작성.

최악/최상의 생산성 변화 시나리오를 적용한 시뮬레이션 3과 4에서 두 가지의 주목할 사실이 확인된다. 첫째, 최악의 시나리오보다는 최상의 시나리오에서의 소득변화 폭이 크다. 즉 전체적으로 생산성의 부정적 효과가 드러나는 시뮬레이션 1과 최악 시나리오하의 시뮬레이션 3간의 손실액 격차보다는 긍정적 효과가 드러나는 시뮬레이션 2와 최상 시나리오하의 시뮬레이션 4 간의 소득 증대 격차가 더 크다. 이는 제주도 경제에 있어 기후변화의 긍정적 효과가 부정적 효과에 비해 상대적으로 더 가변적이며, 그만큼 불확실한 요소를 더 많이 가짐을 의미한다.

둘째, 예상을 뛰어넘는 긍정적 혹은 부정적인 생산성 효과가 나타나도 결국 경제적 영향에 가장 큰 영향을 미치는 것은 채소 및 과실, 그중에서도 아열대성 신품종의 생산성과 생산량 변화이다. 따라서 이들 품목의 비중을 늘릴 수 있는 것이 기후변화 적응 조치로서 중요하다는 것이 다시 확인된다.

6. 요약 및 결론

본 연구는 1) 기후변화의 품목별 생산성 변화 효과 추정, 2) 기후변화로 인한 세부 작물별 비중 변화 분석, 3) 파급효과를 포함하는 제주도 전체 경제적 효과 분석의 3단계 분석법을 적용해, 진행되고 있는 기후변화가 향후 제주도 농업과 경제에 미칠 영향을 계량 분석하였다. 제주도 경제는 부가가치의 약 10% 정도를 농림어업축산 부문이 생산하는, 1차산업 비중이 상대적으로 높은 구조를 아직 가지고 있다. 또한 1차산업 내에서도 여타 지역과는 달리 채소 및 과실류의 비중이 높으며, 일부 품목은 전국 시장 점유율이 상당히 높다. 그리고 순 농가소득이 전국 평균을 상회하며, 따라서 농가경제 상황도 평균보다는 양호한 편이다.

진행되는 기후변화는 제주도의 평균온도를 높이고 고온일 수를 늘리며, 저온일 수는 줄이고, 강우량은 늘릴 것으로 전망된다. 평균기온의 변화 폭은 전국 평균보다 크다고 할 수 없지만 고온일 수는 보다 많이 증가할 것이다. 제주도의 기상 및 기후변수의 변화 방향이 생산성에 미치는 영향은 식량작물과 전통적인 채소 및 과실류의 경우 음(-)의 방향이 주를 이룰 것으로 보인다. 반면 만감류와 아열대 작물의 경우 평균기온 상승은 생산성을 높이지만 고온일 수의 증가는 생산 피해를 유발하고 생산성을 낮추는 것으로 나타나고 있다. 하지만 만감류와 아열대 작물의 경우 생산통계 관측치가 충분하지 않아 추정 결과의 통계적 신뢰도를 부여하기 어려운 문제도 있다.

만감류와 아열대 작물 생산에 대한 기상 및 기후변수 변화의 영향을 감안하지 않을 경우 2041~2060년에 예상되는 기후조건이 2020년 경제에 닥치면 상당한 액수의 부가가치 손실이 발생할 것으로 분석 결과가 나타났다. 반면 만감류와 아열대 과일의 열 피해를 영농 관리를 통해 적절히 조절하고 평균기온이 상승하는 장점은 살린다면 오히려 부가가치는 상당히 늘어날 수 있음도 파악되었다. 그러나 생산성 변화 시나리오를 달리했을 때 기후변화의 긍정적 측면보다는 부정적 측면이 가정 변화에 상대적으로

영향을 덜 받는 것으로 나타났다.

따라서 기후변화의 피해를 줄이고 그 장점을 살리기 위해서는 전통적 재배 품목의 경우 적응조치와 기반 투자를 통해 생산성 감소를 줄이는 것이 중요하다. 그러나 부가가치에 보다 큰 영향을 미치는 것은 새로운 기후조건에 적합한 고부가가치 품목을 효과적으로 육성하는 것이다. 그리고 고부가가치 신규 도입종이나 신품종의 경우 수요관리를 통해 공급량 증가 시 가격이 급락하고 시장 수용성이 낮아지는 것을 방지할 필요성도 제기된다. 실제로 소비자들의 아열대 및 만감류 과일 선택이 보다 가격 탄력적이라고 가정하고 분석하면 품목 전환이 순조로울 때 기후변화의 경제적 이득이 더 커진다는 것이 확인되었다.

따라서 1) 소비자들이 선호할 수 있도록 품종을 개량하고, 2) 아열대 및 제주 특산품의 소비 진작과 이미지 개선 전략을 적절히 수립·시행하고, 3) 특히 젊은 층을 중심으로 하는 소비패션의 창출을 시도하고, 4) 가공품 개발, 관광산업과의 효과적 연계 등 일반적인 “유통 전략”의 성공적 개발도 생산성 관리 못지않게 중요하다.

이상의 결론은 본 연구가 시행한 일련의 계량 분석에 기초한 것으로서, 분석 자체의 한계도 있다. 우선 주식인 쌀과 달리 제주도의 주 품목인 채소, 과실류, 축산 등은 활용할 수 있는 생산자료의 시간적, 공간적 해상도가 낮아 본 연구의 생산성 추정의 통계적 기반이 강하다고 할 수는 없다. 또한 모형 설정 방식별로 생산성 변화율 추정치가 큰 차이를 보이는 어려움도 있었다. 실제 관측되는 농업 생산성 자료에는 이미 어느 정도의 적응 조치가 반영되어 있을 수 있어 순수한 기후변화 효과를 정확히는 나타내지 못한다는 점도 감안할 필요가 있다. 본 연구는 자료 이용가능성 때문에 축산부문의 영향을 매우 제한된 형태로 반영한 한계도 있다. 그리고 제주도 외 지역의 기후변화와 그로 인한 생산성 변화의 영향, 혹은 피드백 역시 제주도 경제에 영향을 미칠 수 있음도 고려할 필요가 있다.



이 저작물은 크리에이티브 커먼즈 저작자표시-비영리-변경금지 4.0 국제 라이선스에 따라 이용하실 수 있습니다.

This work is licensed under CC BY-NC-ND 4.0.

참고문헌

- 권오상. (2015). 가계동향조사 자료를 이용한 농식품 수요 및 생계비지수 분석. *농업경제연구*, 56(4), 1-30.
UCI: G704-000586.2015.56.5.007
- 권오상, 이한빈. (2012). 기후변화에 따른 농업생산성 변화의 일반균형효과 분석. *자원·환경경제연구*, 21(4), 947-980. UCI: G704-000752.2012.21.4.008
- 권오상, 한미진, 반경훈, 윤지원. (2018). 한국 경제의 KLEM DB구축과 중첩 CES 생산함수 추정. *자원·환경경제연구*, 27(1), 1-38. <https://doi.org/10.15266/KEREA.2018.27.1.029>
- 기상청. (2025). 기후정보포털: SSP 기반 남한상세 기후변화 시나리오 자료. <https://www.climate.go.kr>
- 기상청. (2025). 기상자료개방포털: 지상관측 기후자료. <https://data.kma.go.kr>
- 남재철, 김광수, 권오상. (2021). 농업에서의 기후변화와 그 영향. 대한민국학술원 (편), *학문연구의 동향과 쟁점: 농학·축산학*. 대한민국학술원.
- 농림축산식품부. (2024). 농림축산식품 통계연보. <https://www.mafra.go.kr>
- 농림축산식품부. (2024). 농림사업정보시스템(Agrix). <https://www.agrix.go.kr>
- 농림축산식품부. (2024). 농림축산식품 주요통계. <https://www.mafra.go.kr>
- 농촌진흥청. (2024). 농산물소득자료집: 표준소득 자료. 농사로. <https://www.nongsaro.go.kr>
- 박경원, 권오상, 김광수. (2015). 농업부문모형을 이용한 기후변화의 지역별·품목별 경제적 효과 분석. *경제학연구*, 63(1), 61-91. <https://doi.org/10.22841/kjes.2015.63.1.003>
- 용희원, 이승호, 권오상. (2023). 신식품종 과일류에 대한 지불의사와 수요의 탄력성 추정: 수량 선택실험 분석. *농촌경제*, 46(1), 27-56. <https://doi.org/10.36464/jrd.2023.46.1.002>
- 이병훈, 문한필. (2012). 공간계량경제 방법론을 이용한 단수반응모형의 예측력에 관한 비교연구. *농업경제연구*, 53(3), 23-43. UCI: G704-000586.2012.53.3.001
- 제주감귤연합회. (2025). 감귤류 및 만감류 재배면적 자료. <http://jejugamgyul.or.kr/>
- 제주특별자치도 감귤특작과. (2025). 아열대 과수 생산 및 면적 자료.
- 제주특별자치도. (2025). 제주경제통계. <https://www.jeu.go.kr>
- 조현경, 권오상. (2014). 재배 시기별 기후변수가 논벼의 단위면적당 생산성과 변동성에 미치는 영향 분석. *농업경제연구*, 55(3), 115-140. UCI: G704-000586.2014.55.3.004
- 통계청. (2025). 농업면적조사. <https://kosis.kr>
- 통계청. (2025). 장래인구추계. <https://kosis.kr>
- 한국은행. (2025). 지역산업연관표. <https://www.bok.or.kr>
- 환경부·국립환경과학원. (2025). 한국 기후위기 평가보고서 2025: 기후위기 영향 및 적응. 환경부.
- Fan, J. & Yao, Q. W. (1998). Efficient estimation of conditional variance functions in stochastic regression. *Bio metrika*, 85(3), 645-660. <https://doi.org/10.1093/biomet/85.3.645>
- Hassler, J., Krusell, P. & Olovsson, C. (2018). The consequences of uncertainty: Climate sensitivity and economic sensitivity to the climate. *Annual Review of Economics*, 10, 189-205.
<https://doi.org/10.1146/annurev-economics-080217-053229>
- Hazell, P. B. R. & Norton, R. D. (1986). *Mathematical programming for economic analysis in agriculture*. MacMillan, <https://doi.org/10.2307/2531573>
- Hertel, T. W., Burke, M. B. & Lobell, D. B. (2010). The poverty implications of climate-induced crop yield changes by 2030. *Global Environmental Change*, 20(4), 577-585.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.07.001>
- Howitt, R. E. (1995). Positive mathematical programming. *American Journal of Agricultural Economics*, 77(2), 329-342. <https://doi.org/10.2307/1243543>
- Hultgren, A., Carleton, T., Delgado, M., Gergel, D. R., Greenstone, M., Houser, T., Hsiang, S., Jina, A., Kopp,

- R. E., Malevich, S. B., McCusker, K. E., Mayer, T., Nath, I., Rising, J., Rode, A. & Yuan, J. (2025). Impacts of climate change on global agriculture accounting for adaptation. *Nature*, 642, 644-652. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09085-w>
- IPCC. (2021). Summary for policymakers. In *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Just, R. E. & Pope, R. D. (1978). Stochastic specification of production functions and economic implications. *Journal of Econometrics*, 7(1), 67-86. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(78\)90006-4](https://doi.org/10.1016/0304-4076(78)90006-4)
- Just, R. E. & Pope, R. D. (1979). Production function estimation and related risk considerations. *American Journal of Agricultural Economics*, 61(2), 276-284. <https://doi.org/10.2307/1239732>
- Liu, W., Zhou, J., Ma, Y., Chen, S. & Luo, Y. (2024). Unequal impact of climate warming on meat yields of global cattle farming. *Communications Earth & Environment*, 5, Article 65. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01232-x>
- Lobell, D. B., Schlenker, W. & Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616-620. <https://doi.org/10.1126/science.1204531>
- Löfgren, H., Harris, R. L. & Robinson, S. (2002). A standard computable general equilibrium (CGE) model in GAMS. International Food Policy Research Institute. <https://hdl.handle.net/10568/158026>
- Nelson, G. C., Valin, H., Sands, R. D., Havlik, P., Ahammad, H., Deryng, D., Elliott, J., Fujimori, S., Hasegawa, T., Heyhoe, E., Kyle, P., von Lampe, M., Lotze-Campen, H., Mason-D' Croz, D., van Meijl, H., van der Mensbrugghe, D., Muller, C., Popp, A., Robertson, R., Robinson, S., Schmid, E., Schmitz, C., Tabeau, A. & Willenbockel, D. (2014). Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3274-3279. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222465110>
- Ortiz-Bobea A. (2021). The empirical analysis of climate change impacts and adaptation in agriculture. *Handbook of Agricultural Economics*, 5, 3981-4073. <https://doi.org/10.1016/bs.hesagr.2021.10.002>
- Ortiz-Bobea, A., Ault, T. R., Carrillo, C. M., Chambers, R. G. & Lobell, D. B. (2021). Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. *Nature Climate Change*, 11(4), 306-312. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01000-1>
- Pindyck, R. S. (2022), *Climate future: averting and adapting to climate change*, Oxford University Press, <https://doi.org/10.1257/jel.61.2.736.r3>
- Racine, J. S. (2019). *An introduction to the advanced theory and practice of nonparametric econometrics: A replicable approach using R*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108649841>
- Röhm, O. & Dabbert, S. (2003). Integrating agri-environmental programs into regional production models: An extension of positive mathematical programming. *American Journal of Agricultural Economics*, 85(1), 254-265. <https://doi.org/10.1111/1467-8276.00117>
- Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A. C., Muller, C., Arneth, A., Boote, K. J., Folberth, C., Glotter, M., Khabarov, N., Neumann, K., Piontek, F., Pugh, T. A. M., Schmid, E., Stehfest, E., Yang, H. & Jones, J. W. (2014). Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3268-3273. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222465110>
- Schlenker, W. & Roberts, M. J. (2009). Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(37), 15594-15598. <https://doi.org/10.1073/pnas.0906865106>

부록

부표 1. 품목별 생산함수 추정자료 및 최종 선택 모형(기본생산성 변화)

품목	관측치	사용 지역	모수적 추정 (SSP2-4.5)	모수적 추정 (SSP5-8.5)	비모수적 추정
가을감자	178	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	조합 2**
가지	114	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***	조합 5***	
감귤	49	경남, 전남, 제주	조합 5***.6***	조합 5***.6***	조합 2**
고구마	291	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	조합 2**
고추	196	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	
나리	63	강원, 경기, 전남, 전북, 제주, 충남	조합 5***.6***	조합 5***.6***	
녹두	98	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	
단감	134	경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남	조합 5***.6***	조합 5***.6***	
당근	210	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	조합 2**
대파	208	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 6***	조합 6***	
더덕	52	강원, 경기, 경북, 전남, 전북, 제주	조합 5***	조합 5	조합 2
들깨	154	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	
딸기	167	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	조합 2
땅콩	194	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 1***.3***.4***	조합 1***.3***.4***	
마늘	149	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	
맥주보리	131	경남, 전남, 제주	조합 5***.6***	조합 5***.6***	조합 2**
메밀	39	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 4***	조합 4***	
방울토마토	78	경기, 경남, 전남, 전북, 제주, 충남	조합 5*.6***	조합 5***.6***	
봄감자	355	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	조합 2**
봄무	242	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	
봄배추	252	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	
브로콜리	23	제주, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	조합 2**
상추	121	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	
수박	240	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북			조합 2**
시금치	125	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	
시설감귤	28	제주	조합 5***.6***	조합 5***.6***	조합 2**
시설딸기	74	경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	
시설상추	123	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	조합 1**
시설오이	93	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	
시설토마토	87	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 3***.4***	조합 3***.4***	
시설호박	243	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	조합 2
양배추	181	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	조합 2*
양파	98	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	
오이	165	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***	조합 5***	
월동감귤	13	제주	조합 6***	조합 6***	
월동무	14	제주	조합 5***.6**	조합 5***.6**	조합 2
월동배추	21	전남, 제주	생산성 변화 없음 가정		
유채	40	경남, 전남, 전북, 제주	조합 5***.6***	조합 5***.6***	조합 2**
옥수수	51	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 6***	조합 6***	조합 2**
조	37	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 6	조합 6	
쪽파	125	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남	조합 5***.6***	조합 5***.6***	
참깨	104	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	
참외	124	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	
콩	231	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	
키위	86	경남, 전남, 제주	조합 5***.6***	조합 5***.6***	조합 2**
팥	106	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6***	
호박	148	강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 제주, 충남, 충북	조합 5***.6***	조합 5***.6	
한라봉	44	경남, 전남, 제주	생산성 변화 없음 가정		
황금향	5	제주	통계적 유의 x		
구아바	23	전남, 제주	통계적 유의 x		
레드향	7	전남, 제주	조합 5***.6***	조합 5***.6***	조합 2**
천혜향	13	제주	조합 5***.6***	조합 5***.6***	조합 2**
망고	29	제주	용과 생산성 가정		
블루베리	13	제주	조합 5*.6*	조합 5*.6*	
용과	24	전남, 제주			조합 1*

주: *, **, ***는 모형의 기후변화로 인한 생산성 변화가 각각 10%, 5%, 1% 유의수준에서 통계적으로 유의함을 의미함. 비모수적 추정 결과는 5%와 10% 유의수준에서 검정함.

부표 2. 기본 및 Best/Worst 생산성 변화 시나리오

단위: %

품목	기본 생산성 변화 (SSP2-4.5)	기본 생산성 변화 (SSP5-8.5)	최악 시나리오 생산성 변화 (SSP2-4.5)	최상 시나리오 생산성 변화 (SSP2-4.5)
가을감자	-13.34	-16.89	-36.0	4.83
가지	0.26	0.13	-17.22	15.61
감귤	-8.06	-9.23	-29.09	4.83
고구마	-6.14	-8.69	-35.53	3.03
고추	2.93	3.81	1.2	17.94
나리	-1.6	1.27	-10.29	13.98
녹두	4.06	4.73	2.1	5.19
단감	-6.85	-8.8	-50.46	-3.33
당근	-10.29	-12.06	-47.2	-4.64
대파	-1.32	-1.32	-8.51	5.99
더덕	-5.46	-5.76	-17.55	15.0
들깨	11.8	12.35	9.87	56.52
딸기	-11.96	-15.47	-32.53	-11.96
땅콩	-3.1	-4.33	-4.36	-1.52
마늘	3.17	3.83	-4.29	21.65
맥주보리	-14.66	-18.16	-17.39	-12.7
메밀	-3.32	-3.46	-3.32	7.15
방울토마토	-8.11	-7.74	-18.34	17.34
봄감자	-15.7	-18.24	-34.98	-6.23
봄무	-2.85	-2.98	-34.81	6.78
봄배추	7.19	8.32	-2.81	8.48
브로콜리	30.03	35.89	10.43	43.52
상추	-0.99	-0.11	-19.86	0.35
수박	-21.66	-23.56	-56.71	39.42
시금치	-15.38	-19.55	-79.91	73.36
시설감귤	-5.43	-6.67	-35.26	-5.43
시설딸기	-49.3	-50.73	-158.12	-47.67
시설상추	9.44	12.71	9.44	73.45
시설오이	-38.31	-37.88	-41.83	63.71
시설토마토	-26.71	-16.61	-67.44	-18.49
시설호박	-10.04	-10.04	-11.12	55.23
양배추	-7.3	-8.17	-39.72	-2.01
양파	14.8	18.08	-35.48	32.98
오이	-1.11	-2.26	-39.28	33.73
월동감귤	9.23	9.1	-185.03	9.23
월동무	5.04	9.12	2.94	51.8
월동배추	0	0	0	83.54
유채	-7.17	-7.44	-15.36	-6.23
옥수수	-9.74	-10.92	-12.92	22.56
조	2.17	2.15	0.65	15.6
쪽파	1.76	-0.58	-33.23	2.57
참깨	24.15	27.19	16.8	44.91
참외	-3.74	-4.59	-7.12	33.04
콩	-9.12	-12.45	-39.86	-6.59
키위	-15.61	-18.9	-18.66	67.11
팔	9.49	11.08	5.9	10.68
호박	-3.41	-3.91	-5.52	1.97
한라봉	0	0	-10.99	40.0
황금향	0	0	0	0
구아바	0	0	0	0
레드향	0 (S2는 24.00)	0 (S2는 32.77)	0	66.86
천혜향	0 (S2는 22.73)	0 (S2는 25.23)	0	81.44
망고	0 (S2는 22.14)	0 (S2는 19.68)	-62.33	22.14
블루베리	0 (S2는 14.04)	0 (S2는 15.36)	-270.92	14.04
용과	0 (S2는 22.14)	0 (S2는 19.68)	0	62.72

부표 3. ASM분석 결과: 39개 채소 및 과실류의 재배면적 변화

단위: %

품목	시뮬레이션 1		시뮬레이션 2		최악 시나리오	최상 시나리오
	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP2-4.5
가지	4.4	4.3	3.9	3.7	-22.4	17.7
고추	21.1	26.2	20.4	25.4	26.3	78.4
나리	-5.42	8.9	1.4	8.5	-40.8	58.3
당근	-31.8	-38.4	-33.0	-39.8	-100.0	-57.9
대파	4.9	5.3	3.8	4.0	11.5	-20.6
마늘	23.1	26.6	22.0	25.2	15.9	60.4
봄무	2.3	2.4	1.3	1.2	-32.2	-19.8
봄배추	53.5	59.6	50.6	56.1	76.0	-57.3
브로콜리	129.8	152.9	127.8	150.5	100.8	101.0
상추	-1.5	2.5	-1.9	2.0	-75.1	-10.8
시금치	-36.0	-48.8	-37.8	-51.0	-100.0	177.5
양배추	-10.0	-12.1	-11.8	-14.3	-73.5	-66.8
양파	72.5	87.0	71.3	85.6	-100.0	102.5
오이	1.0	-3.6	0.3	-4.6	-100.0	120.2
쪽파	9.2	4.0	8.5	3.2	-56.1	-16.2
호박	-10.5	-12.2	-10.7	-12.4	-14.0	1.3
시설감귤	-8.6	-10.7	-8.7	-10.8	-57.6	-12.5
시설딸기	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0
시설상추	49.8	66.3	49.4	65.8	71.0	349.9
시설오이	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	258.6
시설토마토	-100.0	-98.7	-100.0	-98.9	-100.0	-100.0
시설호박	-41.9	-41.8	-42.1	-42.0	-41.7	232.1
월동감귤	31.0	30.8	30.6	30.3	-100.0	13.7
월동무	10.4	14.6	9.7	13.8	25.4	25.9
월동배추	15.5	16.3	13.5	13.8	62.97	221.4
감귤	-15.5	-18.7	-16.8	-20.3	-51.6	-27.7
딸기	-77.6	-100.0	-80.0	-100.0	-100.0	-100.0
방울토마토	-42.9	-40.7	-43.2	-41.1	-92.2	85.8
수박	-53.0	-58.3	-55.2	-60.9	-100.0	55.2
참외	-12.3	-15.7	-12.8	-16.3	-15.5	124.9
레드향	0.7	0.7	17.7	23.9	2.87	44.5
천혜향	0.6	0.6	16.1	17.9	2.3	53.6
한라봉	0.5	0.5	0.4	0.4	-4.3	20.9
황금향	0.9	1.0	0.8	0.8	3.8	-4.0
키위	-14.7	-18.0	-14.9	-18.3	-12.7	63.0
망고	0.9	0.9	37.0	33.0	-98.5	32.5
구아바	3.3	3.5	2.9	3.0	13.7	-14.8
블루베리	2.3	2.4	28.2	30.7	-100.0	16.0
용과	3.0	3.1	33.6	30.3	12.0	75.2