Vol.35, No.4, pp.382-397, 2023

Journal of Agricultural, Life and Environmental Sciences

RESEARCH ARTICLE

pISSN 2233-8322, eISSN 2508-870X
https://doi.org/10.22698/jales.20230031

기후변화가 지역 과수 생산에 미치는 영향 분석

김의준[1], 지앙민[2*], 진동영[3]
[1]서울대학교 농경제사회학부 교수, [2]푸젠농림대학교 조교수, [3]서울대학교 공간경제연구실 연구원

Analyzing Impacts of Climate Change on Regional Fruit Production

Euijune Kim[1], Min Jiang[2*], Dongyeong Jin[3]
[1]Professor, Department of Agricultural Economics and Rural Development and Research Institute of Agricultural and Life Science, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea
[2]Assistant Professor, Department of Economics, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, 350002, China
[3]Researcher, Spatial Economics Laboratory, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

***Corresponding author:** Min Jiang (E-mail: minmin@fafu.edu.cn)

Received: 16 August 2023
Revised: 1 November 2023
Accepted: 10 November 2023

A B S T R A C T

This study analyzed the effects of climate change on apple and pear production. The fruit production function was estimated with spatial econometric models. The regional production changes in 2040 according to climate change scenarios were simulated based on the spatial error model. First, the production of apples and pears will decrease due to climate change, with apples in Gyeongbuk and pears in Chungnam expected to experience the largest declines. Second, the production of apples and pears will decrease by 4.7 times and 2.0 times when temperature and precipitation or sunshine duration changes, respectively, are considered compared to when only temperature is considered an independent variable in the simulation model. Finally, production losses of 70.934%－97.048% and 90.984%－98.595% are expected for apples and pears, respectively, when the greenhouse gas (GHG) reduction policy was implemented compared to that without the GHG reduction policy. This study is expected to contribute to providing references for the local government to implement GHG reduction strategies and cope with the reduction of fruit production due to climate change.

Keywords: Climate change, Fruit production, Greenhouse gas reduction, Spatial econometric model

서 론

기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 산업화 이전(1850－1900년) 대비 2011－2020년 전 지구 지표면 온도는 1.09°C 상승하였다고 밝혔다(IPCC, 2021). 이러한 수준은 2014년 제5차 평가보고서에서 분석한 2003－2012년 전 지구 지표면 온도 상승폭 0.78°C를 상회한 것으로서 기후변화가 지속

© Journal of Agricultural, Life and Environmental Sciences. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

해서 이루어지고 있음을 알 수 있다. 한국은 1912 – 1940년 대비 1991 – 2020년 연평균기온이 전 지구 연평균기온 상승폭 0.8°C보다 높은 1.6°C 정도 상승하여 온난화 속도가 상대적으로 빠르게 진행되고 있다(Korea Meteorological Administration, 2021). 농작물 수확 규모는 생산 조건뿐만 아니라 기상환경에 따라 변동하기 때문에, 이와 같은 기후변화가 어떻게 전개되느냐에 따라 지역별 농업 생산량 변화가 차별적으로 이루어질 수 있다(Moriondo and Bindi, 2010). 예를 들어, 망고와 같은 고온성 농작물은 재배할 가능성이 커지고 월동 작물의 저온 피해도 줄어드는 장점도 있지만, 기온 상승으로 인한 농작물의 품질이 떨어지고, 병해충 발생이 증가하는 부정적인 효과가 나타날 것으로 예상된다(Kim, 2009). 실제로 기온이 상승하면서 국내 농작물 재배 입지도 달라졌는데, 사과는 경북 영천에서 강원 정선·영월·양구로, 복숭아는 경북 청도에서 충북 충주·음성과 강원 춘천·원주로 재배지가 확대되었다. 즉, 농작물의 재배한계선과 재배 적지가 북쪽으로 이동하면서, 농작물의 주산지도 남부지방에서 충북과 강원 지역 등으로 이동하고 있다.

기후변화가 전지구적으로는 분명히 부정적인 효과를 창출하지만, 지역 농업에 미치는 영향력은 지리적 위치와 재배작물 종류에 따라 상이하며, 이에 따라 지역별로 경제적 위기가 될 수도 있지만, 오히려 기회로도 작용할 수 있다(Kim, 2009). 이러한 맥락에서, 본 연구에서는 한국 기후변화가 과수 작물 생산에 지역별로 어떠한 영향을 미치는지를 살펴보고자 한다. 즉 기후변화에 따라 작물 생산 적정 입지가 변동할 경우, 기존 재배지역의 생산량은 줄어들게 되지만, 새로운 재배 적지가 입지한 지역 생산은 증가하게 된다. 결국 한국 총생산 변화는 기존 입지 지역 생산량 하락 규모와 신규 입지 지역 생산량의 상승 규모 차이에 달라진다.

본 연구의 목적은 기후변화가 지역 작물 생산에 미치는 영향을 분석하는 것이다. 본 연구는 분석대상 작물로 사과와 배를 선정하였다. 사과 재배 적지의 연평균기온은 7.5 – 11.5°C로 다른 과수에 비해 4 – 7°C 낮다. 기후변화로 인해 재배 적지가 확장될 것으로 예상되는 다른 과수와 달리, 사과는 이미 재배 적지 감소와 이동 현상을 겪고 있어서, 기후변화 분석에 적합한 작물이다. 또한, 사과와 같은 장미과 작목이지만, 연평균 생육 기온이 높은 배에 대해서도 동일한 분석을 적용하여 작물의 특성에 따라 기후변화 영향의 차이가 있는지 분석하였다. 이러한 지역별 과수 생산에 영향을 미치는 요인과 기상요인의 영향을 살펴보기 위해, 네 가지 유형의 계량모형을 적용하여 과수 생산함수를 추정하였다. 기존 연구들에서 기본적으로 수행되는 최소자승모형(Ordinary Least Squares, OLS)을 비롯해 공간자료 분석에서 발생할 수 있는 문제점을 고려한 공간계량모형(Spatial Econometrics Model) 세 가지 모형을 활용하였다. 시군구 지역 단위의 자료를 수집하여 사과와 배의 생산함수를 추정하고, 기후변화 영향 분석에 타당한 모형을 선정하였다. 기후변화에 따른 기상요인 전망치로 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP) 시나리오에 따른 기상청 미래 기후 전망 자료를 활용하였다. 연구 결과를 통해 농촌 지역의 기후변화 대응 방안을 수립하는데 기여할 수 있을 것이다.

기후변화와 과수 생산(Climate Change and Fruit Production)

선행연구

기후변화에 따른 농업 부문의 경제적 분석 방법론과 모형은 주로 속성가격(Hedonic price) 모형, 프로그래밍 시뮬레이션(programming simulation) 모형, 연산일반균형(Computable General Equilibrium) 모형, 그리고 생산함수를 기반으로 하는 농경제모형(Agro-economic model) 네 가지로 구분되어 사용되고 있다. 속성가격모형은 기후변화가

자산가치, 토지 가치에 미치는 영향을 추정하는데 활용될 수 있으며 대표적으로 Ricardian model(Jawid, 2020; Mendelsohn et al., 1994; Sadiq et al., 2019) 있다. 이는 기후변화에 따른 작물 생산성의 변화와 같은 직접적인 영향과 투입된 생산요소의 대체효과, 농지 이용의 변화와 같은 간접적인 영향을 모두 고려하여 농지 가치 또는 수익의 변화를 측정할 수 있다. 기후변화에 직면한 농업 부문의 경제적 비용과 편익을 농지 가치의 변화 측면에서 식별하는 접근 방식으로 간주될 수 있으나 기후변화와 토지수익과의 관계에서 조정비용을 고려하지 못한 한계점이 지적되고 있다(Kim, 2008). 연산일반균형모형은 농업생산, 기후변화와 경제시스템을 연계하여 농업부문과 국가 경제에 미치는 중장기효과를 분석한다. 수요와 공급 측면을 모두 고려하여 기후변화 등 외부 충격이 생산(농업생산 및 국내 총생산), 고용, 가격, 소득, 수출입 효과, 정부 재정 및 복지 등 경제 전반에 직간접적으로 미치는 영향을 추산할 수 있다. 연산 일반균형 모형을 이용한 농업부문의 경제적 분석을 위해 농업 부문을 중심으로 한 산업연관표 및 사회계정행렬 같은 커다란 기초 자료의 구축 및 농업 부문의 생산함수 관련 모수 추정하는 작업이 필요하다(Calzadilla et al., 2011; Kwon and Lee, 2012). 프로그래밍 시뮬레이션은 가상의 조건에서 기후, 환경과 토지정보 등 다양한 기술적 파라미터값을 설정하고 기후변화에 따른 생산과 수익성 예측, 최적 산출물 공급, 투입물 수요 등 추정하는데 적용되고 있다(Chang, 2002; Fathelrahman et al., 2014; Momeni and Zibaei, 2013; Zilberman et al., 2004).

생산함수를 이용한 농경제모형은 모수적방법론, 비모수적 또는 준모수 방법론이 적용되고 있으며 다양한 환경조건에서 온도, 일사량 등 기후요소가 변화하는 경우 농산물 생산성과 농가수익변화를 분석할 수 있다. Chmielewski et al.(2004)에서는 1961년부터 2000년까지 독일 지역 사과와 체리 생산에 대한 온도의 영향을 조사하였는데, 개화기의 낮은 온도에 의한 서리 피해가 작물 단수에 가장 큰 영향을 주었다고 주장하였다. Bindi et al.(1996)는 온도와 이산화탄소 농도가 포도 생산량에 큰 영향을 미치는 것으로 분석하였다. Baldocchi and Wong(2008)은, 기후변화로 인해 작물의 겨울철 저온 요구도가 감소할 경우, 미국 캘리포니아의 살구, 배, 자두 등 과수와 호두, 아몬드 등 견과류의 재배 가능 면적이 줄어들 것으로 전망하였다. Bhagat(2020)은 인도와 전지구적 기후변화와 사과 생산 시나리오를 평가하였는데, 겨울철 기온 상승이 사과의 개화기를 앞당기면 서리 피해 위험이 늘어나게 되고, 이는 사과 생산과 품질에 부정적 효과를 낳을 것으로 분석하였다. 국내에서는 RCP 시나리오를 활용하여 기온, 강수량, 일조시간 등 기후변수와 생산성 관계를 탐색하였다. Kim and Lee(2005)은 사과 단수에 영향을 미치는 기상요인으로 기온, 강수량 및 일조시간을 적용하여 사과 단수와 기상요인 간의 관계를 검토하였다. 3월 최저 기온이 높을수록, 9월 최저 기온이 낮을수록, 6－8월의 일조시간이 길어질수록, 단수가 증가하였다. Kim and Kim(2014)는 생육 단계를 고려한 자연과학 접근 방법, 상관분석 및 요인분석 등을 통해 기온, 강수량, 일조시간 등 기상요인과 사과 생산량 관계를 분석하였다. Kim(2015)은 Kim and Kim(2014)를 바탕으로 주요 과수 주산지를 대상으로 지리 가중회귀모형(Geographically Weighted Regression, GWR)을 적용하여 RCP 4.5 시나리오에 따른 주요 과수의 단수 변화를 예측하였다. Kim et al.(2010)은 지역별 사과 재배면적 및 생산량과 생육기간 평균 기온 및 일교차의 상관관계를 분석하였다. 평균 기온 상승 및 일교차 감소는 재배면적 및 생산량에 부정적인 영향을 미쳤다고 주장하였다. Heo and Lee(2017)는 경남 지역을 대상으로 생육시기별 기온, 강수량, 일조시간 등의 변수와 단감 생산성의 관계에 대해 상관분석을 적용하였으며 RCP 시나리오에 따른 단감의 생산성 변화를 예측하였다. RCP4.5와 RCP 8.5 시나리오 하에서 경남의 단감 생산성은 단기적으로 증가하지만, 변화율은 지속적으로 감소하였다.

이와 같이 대부분 연구들은 상관분석, 최소자승모형, 지리가중회귀모형 등 분석방법을 이용하여 기온, 강수량, 일조시간 등의 기후요인과 단수 간 관계를 분석하였다. 그러나 농작물 생산에 있어서 인접 지역 간 농가의 영농방법 공

유를 통한 지식의 전파와 협업 등이 발생한다는 점에서 생산량의 공간적 자기상관성이 존재할 수 있다. 이러한 특성을 고려하지 않고 통상 최소자승모형으로만 추정할 경우, 추정량에 편의가 발생하여 모형의 적정식별(Identification)이 어려울 수 있다. 본 연구에서는 선행연구의 한계를 보완하기 위해 전국 시군구 대상 자료를 구축하고 공간계량모형을 적용하여 기상요인과 기타 요인들이 과수 생산에 미치는 영향을 추정하였다. 또한, 선행연구를 바탕으로 시군별 면적당 과수 생산량에 초점을 맞추고 다양한 RCP 시나리오에 따라 장기적으로 과수 생산량을 예측하는데 기여한다.

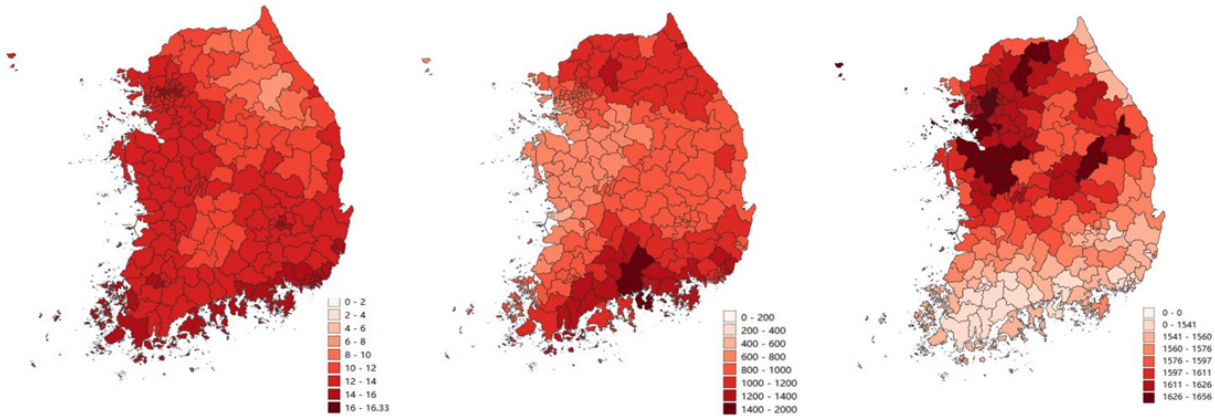
지역별 기후 특성

기상청 기후정보포털을 이용하여 Fig. 1과 같이 지역별 재배 여건에 가장 큰 영향을 끼치는 기온, 강수와 일사량 자료의 시군구별 분포를 살펴봤다. 연평균기온의 경우, 남해안, 주요 특별시 및 광역시의 연평균기온이 높으며 강원, 경북, 충북 및 전북의 산간지역을 중심으로 연평균기온이 상대적으로 낮게 나타난다. 연평균강수량은 남부지역이 가장 높으며 동해안에서 서부로 갈수록 감소하는 경향을 보인다. 연평균일사량은 지역별로 큰 차이가 보이지 않으며 사과의 주산지(경북 영주시, 예천군 등), 배의 주산지(충남 아산, 천안, 경기 안성시 등)의 일사량이 상대적으로 가장 높게 나타난다.

재료 및 방법(Materials and Methods)

분석 자료

본 연구는 기후변화가 생산에 미치는 영향을 식별하기 위해 종속변수를 시군구별 생산량이 아닌 시군구별 면적당 사과와 배 생산량으로 선정하였다. 이는 생산량으로 종속변수로 설정할 경우, 농지 이용변화도 반영하게 되어 당해연도의 기상 조건이 아닌 과거 기상 조건에 의해 결정되기 때문이다. 농림축산식품부 2015년부터 2020년까지 농업경영체 데이터베이스를 통해 각 시군구의 시도 내 재배면적 비중을 계산하였으며, 시군구별 면적당 사과와 배 생산량은 시도별 생산량 자료와 시군구별 재배면적 비중을 활용하여 추산하였다. 본 연구에서 활용한 분석 자료와 기초통계량은 Table 1과 같다. 독립변수로는 기상요인, 토양요인 및 지역 요인을 고려하였다. 기상요인으로는 기상청에서 제공하는 RCP 시나리오에 따른 기온, 강수량 및 일사량 자료를 활용하였다. RCP 뒤의 숫자는 온실가스로 인한 추가적인 태양



(A) Average annual temperature (B) Average annual precipitation (C) Average annual insolation

Fig. 1. Average annual temperature, precipitation, and insolation per region in 2020 (Unit: °C, mm, W/m^2).

복사에너지의 지구흡수량을 의미하며, 현 추세의 온실가스 배출이 이루어지는 RCP 8.5와 온실가스 저감정책의 실현 정도에 따른 RCP 6.0, RCP 4.5 및 RCP 2.6 총 4가지 시나리오로 구성된다. 기후변화 시나리오 활용사례집(Korea Meteorological Administration, 2018)에서 제시한 한반도 연평균기온 편차(°C) 전망 시계열에 따르면, 21세기 전반기(2020 – 2040), 4개의 시나리오 중에 RCP 2.6, RCP 4.5과 RCP 8.5가 뚜렷한 차이를 보이지 않지만, RCP 6.0과 RCP 8.5가 가장 뚜렷한 차이가 나타난다. 본 연구는 기후변화에 따라 한국 21세기 전반기(2021 – 2040년)의 과수 생산변화를 전망하기 위해서 RCP 6.0과 RCP 8.5 시나리오를 선정한다.

기온은 작물의 재배 가능 여부에 큰 영향을 미치는 기상요인이기 때문에 연평균기온을 변수로 포함하였다. 지역별 변화 경향의 차이를 한반도 북부의 산악지역과 북동 해안 지역에서 기온의 상승 경향이 더 뚜렷하게 나타날 것으로 예상된다(Korea Meteorological Administration, 2018). 2025 – 2020년 229개 시군구의 연평균기온 편차가 1.546 – 1.631로 나타났고 7 – 8월 평균 기온 편차는 0.998 – 1.066이다. 시군구의 최고기온의 차이가 뚜렷하지 않다. 따라서 연평균기온은 지역별 과수 생산량 변화의 차이를 반영하는데 더 적절한 변수이다.

또한, 지구온난화의 영향을 반영하여 연평균기온뿐만 아니라, 최고/최저 기온을 고려하여 분석하였지만 유의한 결과가 도출하지 못했다(부록 참조). 따라서 본연구에서는 기온 변화를 설명하기 위해 최고/최저 기온보다 연평균기온이 더 적절한 변수라고 판단된다.

기온뿐만 아니라 강수량과 일사량도 작물의 생산에 영향을 미친다는 선행연구의 연구 결과를 바탕으로 사과와 배의 생육기인 4 – 10월의 강수량과 일사량 변수를 추가하였다. 토양요인으로는 농촌진흥청 토양환경정보 시스템에서 지형, 경사, 심토토성, 배수등급, 유효토심, 자갈함량 등을 고려하여 설정한 사과 및 배의 재배적지 면적을 활용하였다. 지역 요인으로는 통제변수로서 시군구별 사과 및 배의 농가 수를 활용하였다. 농가 수를 통제 변수로 활용하는 이유는, 농가 수가 연구에 영향을 미칠 수 있는 다양한 사회경제적, 인프라, 농업정책 및 환경적 변수와 관련이 있기 때문이다. 이것은 농업 생산과 관련된 다른 변수들과 상호작용할 수 있으며, 결과에 왜곡을 일으킬 수 있다. 예를 들어, 특정 지역의 사과 및 배 생산량을 예측하고자 할 때, 농가 수는 농작물 생산에 중요한 역할을 하다. 더 많은 농가가 해당 작물을 재배한다면, 더 많은 생산량이 발생할 가능성이 있습니다. 따라서, 농가 수를 통제변수로 사용함으로써, 농가 수의 변화로 인한 생산량의 변동을 고려하지 않고 순수하게 기상 및 토양 변수에 의한 변동을 분석할 수 있다. 이 논문은 기후변화 요인이 생산성에 영향을 미치지만, 농지 면적이나 농가 수에 직접적으로 영향을 주지 않는다는 것을 가정하다.

과수 생산함수

229개 시군구 중 사과의 생산량이 있는 지역은 경북 청송군, 경북 안동시 등 172개, 배의 생산량이 있는 지역은 충남 천안시, 전남 나주시 등 194개 지역이다. 이들 지역을 대상으로 2015년부터 2020년까지 6개년 동안의 패널자료를 구축하였다.

$$
\begin{aligned}
y_{it} &= \beta_0 + \sum_{k=1}^{m} \beta_k x_{itk} + e_{it} \\
e_{it} &= \mu_i + \epsilon_{it} \\
\epsilon_{it} &\sim iid(0, \sigma_\epsilon^2) \\
i &= 1, 2, \cdots, I \\
t &= 1, 2, \cdots, T
\end{aligned}
\tag{1}
$$

y_{it}는 i 번째 지역의 t 시점에서의 종속변수로 사과 또는 배의 생산량을 뜻하며, x_{itk}는 독립변수로 기상요인, 토양요인 및 지역요인을 의미한다. β_k는 독립변수 x_{itk}의 추정계수를 나타내며, e_{it}는 오차항을 의미한다. 오차항 e_{it}는 시간불변의 지역 특성을 나타내는 μ_i와 시간과 지역에 따라 변하는 오차항인 ϵ_{it} 두 개의 항으로 구분할 수 있다. 오차항 μ_i를 고정효과로 보는지 확률효과로 보는지에 따라 추정방법이 달라진다. 고정효과 모형에서는 μ_i를 지역별로 고정된 모수로 해석하는 반면 확률효과 모형에서는 확률분포를 따르는 확률변수로 해석한다. 고정효과 모형과 확률효과 모형 중 어느 모형이 더 적합한지는 하우스만 검정을 통해 판정한다. 하우스만 검정 결과 독립변수와 오차항 μ_i사이에 상관성이 존재하지 않는다는 귀무가설을 기각하는 경우 고정효과 모형을 사용하며 기각하지 않을 때는 확률효과 모형을 채택한다.

공간 단위로 수집된 통계자료를 활용하여 분석할 경우 종속변수끼리 상관관계를 가지게 되는 공간적 종속성(Spatial Dependence)이 존재할 수 있다. 공간계량모형은 공간적 종속성을 고려해줌으로써 이를 고려하지 않았을 때 발생할 수 있는 추정치의 편의(Bias) 문제를 해결할 수 있다(Lee et al., 2006). 본 연구에서는 최소자승모형을 비롯하여 공간오차모형(Spatial Error Model, SEM), 공간자기회귀모형(Spatial Autocorrelation Model, SAR), 일반공간모형(General Spatial Model, SAC)을 활용하여 분석하고 이 중 가장 적합한 모형을 선정하였다.

최소자승모형은 가장 일반적으로 사용되는 회귀분석모형으로 등분산성과 비자기상관성을 가정하고 있다. 수식 (1)을 행렬 형태로 나타내면 다음의 수식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} y &= X\beta + \epsilon \\ \epsilon &\sim N(0, \sigma^2 I_n) \end{aligned} \tag{2}$$

최소자승모형은 비자기상관성을 가정하기 때문에 종속변수인 사과 및 배 생산량이 인접 지역 간에 상관관계를 가질 경우 추정치의 편의 문제가 발생한다. 이러한 공간적 종속성을 어떻게 통제하느냐에 따라 공간계량모형의 차이가 존재한다. 첫 번째로 소개할 공간오차모형은 오차항에 공간적 종속성을 포함한 모형으로 수식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. W는 공간가중행렬(Spatial Weight Matrix)을 나타내고 λ는 공간가중행렬의 계수로 공간적 자기상관성을 보정하는 역할을 수행한다.

Table 1. Data description

	Variable	Data Source	Unit	Mean	Standard Deviation	Min	Max
Dependent variable	Apple production per unit area	National Statistical Office Crop Production Survey	ton	8	4	0	14
	Pear production per unit area		ton	13	4	0	21
Independent variable	Average annual temperature	Korea Meteorological Administration	°C	12.4	1.6	6.7	15.7
	Average annual precipitation		mm	927	237	242	1,759
	Average annual insolation		W/m^2	1,601	72	1,291	1,748
	Apple plantation area	Rural Development Administration	ha	4,408	4,147	29	18,948
	Pear plantation area		ha	8,354	7,672	123	39,666
	Number of apple farms	Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs	-	279	640	0	4,462
	Number of pear farms		-	134	279	0	2,950

$$y = X\beta + u \quad (3)$$
$$u = \lambda Wu + \epsilon$$
$$\epsilon \sim N(0, \sigma^2 I_n)$$

공간자기회귀모형은 종속변수의 공간적 종속정도가 지역 간 인접정도에 따라 다르다는 것을 가정하는 모형으로 수식 (4)와 같이 표현할 수 있다. ρ는 종속변수의 공간 래그 항(Spatial Lagged Term)의 계수를 나타낸다.

$$y = \rho Wy + X\beta + \epsilon \quad (4)$$
$$\epsilon \sim N(0, \sigma^2 I_n)$$

일반공간모형은 앞서 설명한 공간오차모형과 공간자기회귀모형을 통합하여 종속변수와 오차항 모두에서 공간적 종속성을 고려한 가장 일반적인 형태의 모형으로 수식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y = \rho W_1 y + X\beta + \epsilon \quad (5)$$
$$u = \lambda W_2 u + \epsilon$$
$$\epsilon \sim N(0, \sigma^2 I_n)$$

공간계량모형의 적용을 위해서는 공간가중행렬을 어떻게 정의하는지가 중요하다. 공간가중행렬은 크게 인접성(Contiguity)을 기준으로 구축하는 방법과 거리(Distance)를 기준으로 구축하는 방법이 있다. 인접성을 기준으로 하는 경우 Rook, Queen 등의 방법이 있으며 거리를 고려하는 경우 임계거리(Threshold Distance)를 설정하고 그 이내인 경우 1의 값을 부여하거나 거리의 역수를 사용한다. 본 연구에서는 다양한 공간가중행렬을 생성하여 비교하였으며 그중 선행연구에서 주로 활용되는 역거리(Inverse Distance) 행렬을 공간가중행렬로 활용하였다. 또한, 이때의 임계거리는 모든 지역이 최소한 하나의 지역과 연계되도록 두 지역 간 거리의 최대값을 활용하였다. 공간계량모형 적용의 타당성을 검증하기 위해 종속변수로 설정한 사과 및 배 생산량의 공간적 자기상관성 여부를 검증하였다. 2020년 사과 및 배 생산량에 대해 Moran's I 검증기법을 적용한 결과 사과와 배 모두 1%의 유의수준 하에서 공간적 자기상관성을 지니는 것으로 도출되었다. 또한, 사과의 Moran's I 지수가 0.438로 배의 Moran's I 지수 0.036보다 더 높은 것으로 분석되어 사과의 공간적 자기상관성의 정도가 배에 비해 높게 나타남을 알 수 있다. 검정 결과를 통해 공간계량모형의 적용이 타당함을 확인할 수 있다.

추정식에서 기상요인의 변화에 따른 변화율을 파악하기 위해 종속변수인 생산량을 로그변환하였으며 연평균기온 외에 다른 독립변수도 로그변환하였다. 연평균기온 변수는 특정 온도 범위에서 재배적지인 조건을 반영하기 위해 연평균기온의 이차항 변수를 함께 고려하였다.

$$\log(\text{단위면적당 생산량}) \quad (6)$$
$$= \beta_0 + \beta_1 \text{연평균기온} + \beta_2 \text{연평균기온}^2 + \beta_3 \log(\text{강수량}) + \beta_4 \log(\text{일사량}) + \beta_5 \log(\text{재배적지면적}) + \beta_6 \log(\text{농가수})$$

OLS, SEM, SAR, SAC 모형에 대한 하우스만 검정 결과, 사과 분석에서의 OLS 모형에서만 통계적으로 유의하지 않았으며 나머지 모형에 대해서는 P-value 값이 0.01보다 작았다. 따라서 사과의 OLS 모형에서는 임의효과 모형을, 이

외의 모형에서는 고정효과 모형을 선택하는 것이 적절하다. 공간계량모형에서는 R^2이 아닌 로그우도(Log-likelihood), AIC(Akaike Information Criterion), BIC(Bayesian information criterion)로 모형의 적합성을 검정하여, 일반적으로 로그우도가 증가하고 AIC, BIC 가 감소하면 모형적합성의 향상을 나타낸다(Anselin, 2005). 모형비교 결과, 사과생산함수의 경우, SEM모형이 가장 낮은 AIC, BIC 와 가장 높은 로그우도를 나타나고 있어 SEM모형이 가장 설명력이 높은 것으로 판단된다. 배생산함수의 경우, AIC, BIC값이 유사하여 로그우드가 가장 높은 SEM 모형으로 선정한다.

결과 및 고찰(Results and Discussion)

사과 생산함수의 분석 결과는 Table 2와 같다. SEM 모형에서 연평균기온 및 연평균기온 이차항, 강수량, 일사량, 재배적지 면적, 농가 수, 그리고 ρ는 1% 유의수준 하에서 통계적으로 유의한 결과가 도출되었다. 연평균기온 변수는 이차함수의 형태로서 약 11.16°C일 때 생산량이 가장 많으며 이보다 낮거나 높을 때 생산량이 감소함을 의미한다. 또한, 강수량이 1% 증가할 때 생산량은 1.035% 증가하며 일사량이 1% 증가할 때는 생산량이 0.647% 증가하는 것으로 추정되었다. 토양요인을 고려한 재배 적지 면적이 1% 증가할 때는 사과 생산량이 0.509% 증가할 것으로 예상된다. 마지막으로 농가 수가 1% 증가할 때 생산량이 1.054% 증가하며, 이를 통해 사과 재배에 있어 농가 수 증가에 따른 규모의 경제 효과가 있음을 알 수 있다.

배 생산함수의 분석 결과는 Table 3과 같다. 연평균기온 및 연평균기온 이차항, 강수량, 일사량, 재배적지 면적, 농가 수, 그리고 ρ 변수에 대해 1% 유의수준 하에서 통계적으로 유의한 결과가 도출되었다. 연평균기온이 약 11.64°C일 때 생산량이 가장 많은 것으로 추정되었다. 또한, 강수량이 1% 증가할 때 생산량은 0.151% 감소하며 일사량이 1% 증가할 때에는 생산량이 4.895% 증가할 것으로 예측된다. 토양요인을 고려한 재배적지 면적이 1% 증가할 경우에는 배 생산량이 0.052% 증가할 것으로 예상된다. 농가 수가 1% 증가할 때 생산량이 0.149% 증가하여 규모의 경제 효과

Table 2. Analysis results of the apple production function

	OLS	SEM	SAR	SAC
Constant	-13.693 **			
Average annual temperature	0.122 ***	0.495 ***	0.287 ***	0.385 ***
Average annual temperature quadratic term	-0.006 ***	-0.026 ***	-0.013 ***	-0.016 ***
Average annual precipitation	0.915 **	1.035 *	1.065 *	1.032 *
Average annual insolation	3.481 ***	0.647 **	-3.819 **	-2.861 *
Plantation area	0.518 ***	0.509 **	0.547 **	0.505 ***
Number of farms	1.031 ***	1.054 ***	1.063 ***	1.080 ***
Hausman test	1.020	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***
ρ			0.922 ***	0.868
λ		2.561 ***		0.881
R^2	0.414	0.421	0.057	0.157
Log-likelihood		-1243.296	-1519.194	-1479.364
AIC		2505.592	3054.380	2976.721
BIC		2541.574	3093.906	3021.177

Note: ***,**,* means 1%, 5%, 10% significance level

가 있는 것으로 관측되었다.

사과와 배의 온도, 강수량, 및 일사량에 대한 반응 차이는 각자의 생리적, 생물학적 특성이 있기 때문이다. 사과와 배는 최대 생산을 위해 각자 다른 최적의 온도 범위를 선호하다. 이러한 온도 선호도의 차이는 두 과수가 로 다른 생물학적 특성과 진화적 배경에 기인하다. 사과는 상대적으로 더 낮은 온도를 선호하는 경향이 있으며, 이는 사과나무가 성장하고 생산하기 위해 상대적으로 서늘한 기후를 선호한다는 그것으로 나타났다. 배는 사과에 비해 강수량 변화에 민감하게 반응하다. 이는 배가 과도한 수분에 민감할 수 있거나, 더 건조한 환경을 선호하는 것으로 이해될 수 있다. 사과와 배는 모두 일사량 증가에 긍정적으로 반응하지만, 이 반응의 크기는 다르다. 배는 사과보다 햇빛에 민감하게 반응하며, 이를 통해 햇빛에 더 민감하게 반응하는 것으로 보이다.

기후변화에 따른 지역별 사과 및 배 생산량 변화를 분석하기 위해 SEM 모형 추정 결과를 바탕으로 모의실험을 구성하였다. 온실가스 저감정책의 실현정도에 따른 비교를 위해 RCP8.5 시나리오와 RCP 6.0 시나리오를 가정하였다. 또한, 기후변화에 따라 사과의 재배적지는 감소하지만 2040년까지 배의 재배적지는 증가한다는 Rural Development Administration(2015)의 연구결과를 바탕으로 분석 대상 시점은 2040년으로 선정하였다. RCP 시나리오에 따른 각 지역의 연평균기온, 강수량 및 일사량 등 기상요인 전망치를 반영하여 지역별 사과 및 배의 생산량 변화를 추정하였다. 단연도 기상요인 값의 변동성을 고려하여 기상요인 전망치는 2015 – 2020년 대비 2035 – 2040년의 변화분을 활용하였다. 과수의 재배적지 구분에 중요한 기준이 되는 연평균기온 변수를 중심으로 기온의 변화만 고려하는 경우와 강수량과 일사량 변화도 함께 고려하는 경우를 분석하였다. SEM 모형에 따른 2020년 생산량 추정치와 기상요인 전망을 반영한 2040년 추정치 간의 변화율을 계산하고, 이를 2020년 실측치에 곱하여 2040년의 예측치를 추산하였다.

RCP 시나리오에 따른 사과 생산량 변화는 Table 4와 같다. RCP 6.0 시나리오 하에서 기온의 변화만 고려할 경우 사과 생산량은 322,830톤 감소할 것으로 추정된다. 주요 재배지인 경북 지역은 생산량이 215,878톤으로 가장 크게 감소할 것으로 예상된다. 반면, 강수량과 일사량 변화도 함께 고려할 경우에는 사과 생산량이 68,746톤 감소할 것으로 전망되며 특히 경북 지역의 생산량 감소폭이 49,467톤으로 가장 크게 나타난다. RCP8.5 시나리오에서 전국적인 사

Table 3. Analysis results of the pear production function

	OLS	SEM	SAR	SAC
Constant	-6.147 ***			
Average annual temperature	0.568 ***	0.368 ***	0.426 ***	1.714 ***
Average annual temperature quadratic term	-0.024 ***	-0.016 ***	-0.018 ***	-0.079 ***
Average annual precipitation	-0.078	-0.151 **	-0.152 **	-0.073 *
Average annual insolation	1.598 ***	4.896 ***	4.660 ***	2.886 ***
Plantation area	0.143 ***	0.052 ***	0.144 ***	0.434 ***
Number of farms	-0.057 ***	0.149 ***	-0.044 ***	1.035 ***
Hausman test	1.020	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***
ρ			0.027 ***	0.023
λ		0.046 ***		0.212
R^2	0.311	0.222	0.215	0.028
Log-likelihood		528.592	528.411	528.378
AIC		-1040.751	-1037.991	-1039.184
BIC		-1000.612	-1000.295	-993.593

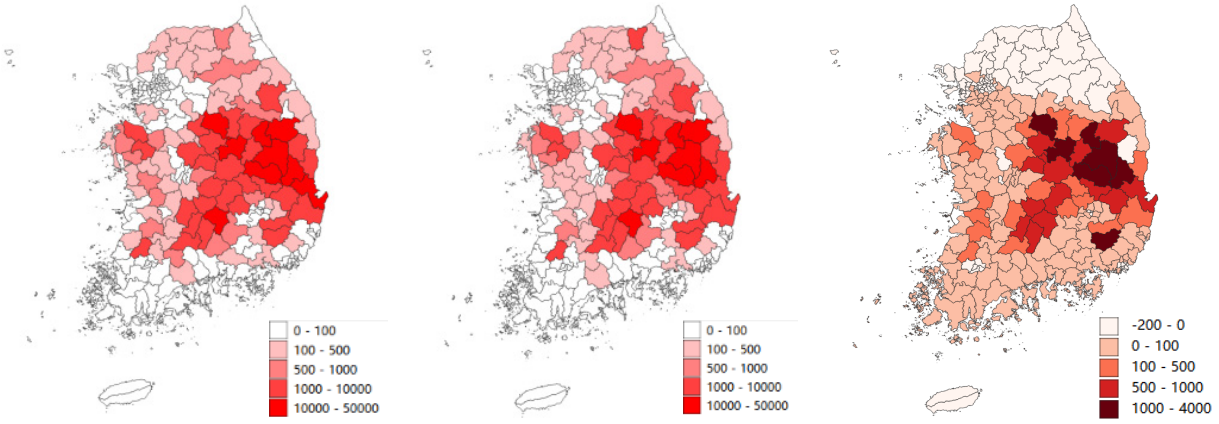
Note: ***,**,* means 1%, 5%, 10% significance level

과 생산량은 기온만 고려할 경우에는 332,647톤 감소하는 반면, 강수량과 일사량의 변화도 고려하면 96,915톤 감소할 것으로 계측된다. RCP 8.5 시나리오와 비교하면, RCP 6.0 시나리오에서 기온만 고려할 경우 생산량 감소폭이 97.048%로 예상되며, 다른 기상요인도 고려했을 때에는 70.934%로 줄어들었다. 이는 RCP8.5 시나리오에 따른 기온, 강수량 및 일사량의 증가폭이 RCP 6.0 시나리오보다 크기 때문이다. 지역별 변화를 살펴보면 RCP 6.0 시나리오와 유사하게 기온만 변화할 때 경북 지역 221,799톤 감소를 비롯해 대부분 지역의 생산량이 감소하는 양상을 보인다. 강수량 및 일사량의 변화를 함께 고려하면 경북 지역의 생산량이 67,259톤으로 가장 많이 감소하고 모든 지역의 생산량이 감소할 것으로 추산된다.

시군구별 사과 주산지의 변화를 파악하는 게 중요할 것으로 판단된다. Fig. 2에서 2040년 시나리오별 시군구별 사과 생산량 예측 결과를 알 수 있으며 온실가스 저감 정책을 시행할 경우, 생산량 증가가 가장 높은 지역은 경북의 영주

Table 4. Changes in apple production according to the RCP scenarios (unit: tons)

	RCP 6.0		RCP 8.5	
	Temperature	Temperature + precipitation + insolation	Temperature	Temperature + precipitation + insolation
Gyeonggi	-865	-113	-953	-73
Daejeon	1	3	-1	1
Chungbuk	-31,621	-2,628	-32,713	-6,721
Chungnam	-12,956	-1,405	-13,705	-2,612
Jeonbuk	-16,297	-2,381	-16,852	-4,666
Jeonnam	-1,774	-85	-1,989	-682
Daegu	-483	-115	-511	-196
Gyeongbuk	-215,878	-49,467	-221,799	-67,259
Busan	-14	-2	-17	-7
Ulsan	-19	-1	-28	-8
Gyeongnam	-37,380	-11,261	-38,512	-14,002
Gangwon	-5,544	-1,291	-5566	-689
Total	-322,830	-68,746	-332,647	-96,915



(A) RCP 6.0 (B) RCP 8.5 (C) RCP 6.0 - RCP 8.5

Fig. 2. Apple production forecast in 2040 (Unit: ton).

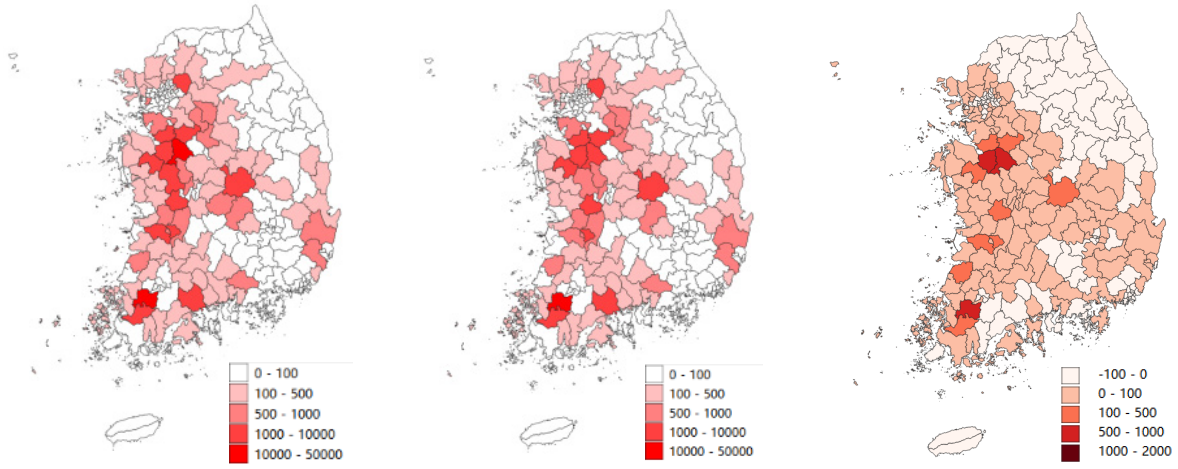
시, 의성군, 안동시, 문경시, 청송군, 예천군, 상주시에 집중되어 있다. 저감 정책을 적용하지 않을 경우에 비해 각각 3,285톤, 2,547톤, 2,029톤, 1,796톤, 1,707톤, 854톤, 800톤 증가할 것으로 예상된다. 이밖에도 충북 충주시(1,244톤), 경남 밀양시(1,115톤), 거창군(848톤)는 큰 생산량 증가폭이 나타난다.

배의 생산량 변화는 Table 5와 같다. RCP6.0 시나리오에서 기온만 변화할 경우 생산량이 107,585톤 감소할 것으로 전망된다. 충남 지역 34,348톤 감소를 비롯해 대부분 지역에서 생산량이 감소할 것으로 예상된다. 강수량과 일사량도 고려하면 배 생산량 감소폭은 54,792톤으로 줄어든다. 충남 지역의 생산량은 17,462톤 감소한다. 배 생산함수 추정결과 강수량의 계수가 음의 값으로 도출되어 강수량 증가에 따라 생산량이 감소하였고 사과 생산함수 추정결과에 비해 작아 기온 상승으로 인한 생산량 감소폭을 축소시키는 데 그친 것으로 판단된다.

RCP8.5 시나리오에서 생산량은 기온만 변화할 때 109,118톤 감소하고, 강수량과 일사량도 함께 변화할 때 60,221톤 감소할 것으로 예상된다. 온실가스 감축 정책이 시행될 때는 사과와 배의 생산량 감소폭이 온실가스 감축 정책을 시행하지 않을 때의 90.984% – 98.595%로 추산되다. 이는 RCP8.5 시나리오에서 기상요인의 변화가 더 크고 특히 기온 변화로 인한 영향이 크기 때문으로 추정된다. 지역별로는 기온만 변화할 때 충남 지역 34,672톤 감소를 비롯해 나머지 지역의 생산량은 감소하였다. 강수량 및 일사량도 고려할 경우 충남 지역 생산량 감소폭은 19,462톤으로 가장 컸다. Fig. 3에 따르면 온실가스 저감정책을 적용할 경우, 2040년 배 생산량 가장 많이 증가하는 지역은 전남 나주(942톤), 충남 천안(606톤), 충남 아산시(588톤), 경기 안성시(316톤) 인 것을 알 수 있다.

Table 5. Changes in pear production according to the RCP scenarios (unit: tons)

	RCP 6.0		RCP 8.5	
	Temperature	Temperature + precipitation + insolation	Temperature	Temperature + precipitation + insolation
Seoul	-179	-90	-183	-97
Incheon	-1,441	-632	-1,473	-755
Gyeonggi	-22,144	-11,932	-22,399	-12,726
Daejeon	-946	-438	-963	-526
Sejong	-959	-470	-974	-535
Jeonbuk	-3,047	-1,396	-3,063	-1,511
Jeonnam	-34,348	-17,462	-34,672	-19,462
Gwangju	-154	-71	-158	-85
Jeonbuk	-9,131	-4,340	-9,262	-5,091
Jeonnam	-21,602	-10,100	-22,171	-11,327
Daegu	-75	-38	-77	-41
Gyeongbuk	-8,038	-4,205	-8,110	-4,419
Busan	-254	-135	-263	-149
Ulsan	-770	-453	-815	-497
Gyeongnam	-2,935	-1,867	-2,984	-1,880
Gangwon	-1,563	-1,163	-1,551	-1,121
Total	-107,585	-54,792	-109,118	-60,221



(A) RCP 6.0 (B) RCP 8.5 (C) RCP 6.0 - RCP 8.5

Fig. 3. Pear production forecast in 2040 (Unit: ton).

결 론

본 연구에서는 향후 기후변화로 인해 예상되는 지역별 사과 및 배 생산량의 변화를 분석하였다. 지역별 과수 생산에 영향을 미치는 요인은 무엇이며, 특히 기상요인은 어떠한 영향을 미치는지 분석하기 위해 과수 생산함수를 추정하였다. 시군구 지역 단위의 사과 및 배 생산량 자료와 기상, 토양 및 지역 요인 자료를 바탕으로 다양한 공간계량모형을 적용하였다. 이 중 공간오차모형을 분석에 가장 적합한 모형으로 선정하여 기후변화 시나리오에 따른 2040년의 지역별 사과 및 배 생산량 변화를 모의실험하였다. 온실가스 저감정책의 실현 정도에 따른 차이를 살펴보기 위해 RCP 6.0과 RCP 8.5 두 가지 시나리오를 가정하였으며 기온만 변화하는 경우와 강수량 및 일사량도 함께 변화하는 경우를 분석하고 비교하였다.

분석 결과 기후변화로 인해 사과 및 배 생산량이 모두 감소하며 그중에서 경북의 사과 생산, 충남의 배 생산이 가장 많이 감소할 것으로 예상되며 온실가스 저감 정책을 시행할 경우, 사과 및 배의 주산지의 생산량 증가가 가장 높게 나타난다. RCP 6.0 시나리오에서는 RCP 8.5 시나리오보다 사과 및 배의 생산량 감소폭이 약 70.934% – 97.048%, 90.984% – 98.595%로 줄어들 것으로 추산되어 온실가스 저감정책의 실현 정도에 따라 피해 양상이 달라질 것으로 예상된다. 기온 변화만 고려하는 경우와 강수량 및 일사량 변화도 반영하는 경우 모두 생산량이 감소하였다. 기온 변화만 고려할 때보다, 강수량과 일사량도 고려할 경우 생산량 감소폭이 다소 줄어들었으며, 이는 RCP 6.0과 RCP 8.5 두 가지 시나리오에서 비슷한 양상으로 나타났다.

본연구결과는 농촌 지역에서 기후변화로 인한 작물 생산 감소에 대응하는 방안을 마련하는 데 기여할 것으로 기대된다. 기후변화는 전 세계적인 온실가스 배출로 인해 나타나기 때문에 농촌 지역에서의 노력만으로 기후변화 현상을 완화하기에는 한계가 있다. 그러므로 농촌 지역에서는 이러한 기후변화 현상에 적응하고 그 영향에 대처하는 데 초점을 맞추는 것이 적절하다. 지역별로 해당 지역에서 주로 재배하는 작물이 기후변화로 인해 어떠한 영향을 받을 것인지 사전에 예측하고 선제적으로 대응할 필요가 있다. 해당 지역에서 향후 생산이 감소할 것으로 예측되는 작물의 경우 품종 개량 등의 방식을 통해 대응하거나 이러한 노력에 한계가 있을 경우 재배작물 전환 등의 대응이 필요하다. 또한, 생산이 증가할 것으로 예측되는 지역에서는 사전에 해당 작물 재배에 대해 검토하고 재배가 적절한 시기 동안 가능한 많

은 생산을 할 수 있도록 준비하는 것이 지역경제 성장의 측면에서 바람직할 것이다.

본 연구의 한계로는 작물의 재배지와 재배면적이 변화하는 원인으로 기후변화 외에도 소비자의 소비패턴 변화, 품종개발 및 재배기술의 변화 등이 고려될 수 있으나 기후변화 한 가지 요인만을 고려하였다는 점을 들 수 있다. 향후 연구에서는 작물의 생리학적 특성과 함께 연평균기온 외에도 최고/최저 기온의 변동, 기상 조건의 급격한 변화, 적절한 강수량 범위 등을 종합적으로 고려함으로써, 과수의 생산에 영향을 보다 체계적으로 이해하고 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 본 연구는 기상요인과 과일 생산량 사이의 연관성에 초점을 맞췄으며, 재배적지 면적 및 농가 수의 변화 가능성을 고려하지 않았다. 향후 충분한 기간의 시군구 단위 생산량 자료가 구축된다면 기후변화로 인한 재배지의 이동을 모형에 반영하고 이를 활용한 예측의 정확도가 높아질 것으로 기대된다. 분석방법과 자료의 한계로 인해 현재의 작물 품종과 재배방식을 유지한다는 가정하에 분석을 진행하였다. 2020년 지역별 생산량에 기상요인의 변화로 인한 생산량 변화율을 반영하다 보니 현재 재배가 이루어지는 지역이 그대로 유지되고 생산량이 많은 지역의 변화가 크게 나타났다. 마지막으로 작물 생산변화의 파급효과 분석에 있어 향후 연산일반균형모형 등으로의 확장을 통해 기후변화가 과수산업과 국가 경제에 미치는 중장기효과를 분석할 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 2021년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 한국사회과학연구(NRF-2021S1A3A2A01087370) 지원을 받아 수행된 연구임

인용문헌(References)

Anselin, L. (2005) Exploring spatial data with GeoDaTM: a Workbook. CSISS. Available online: http://csiss.org/clearinghouse/GeoDa/geodaworkbook.pdf

Baldocchi, D., Wong, S. (2008) Accumulated winter chill is decreasing in the fruit growing regions of California. Clim Change 87:S153-S166. doi:10.1007/s10584-007-9367-8

Bhagat, R. M. (2020) Impact of climate change on apples production: World Scenario. J Pharmacogn Phytochem 9:1219-1228.

Bindi, M., Fibbi, L., Gozzini, B., Orlandini, S., Miglietta, F. (1996) Modelling the impact of future climate scenarios on yield and yield variability on Grapevine. Clim Res 7:213-224.

Calzadilla, A., Rehdanz, K., Tol, R. S. J. (2011) Trade liberalization and climate change: a CGE analysis of the impacts on global agriculture, ESRI Working Paper 381.

Chang, C. C. (2002) The potential impact of climate change on Taiwan's agriculture. Agric Econ 27:51-64.

Chmielewski, F. M., Müller, A., Bruns, E. (2004) Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000. Agric For Meteorol 121:69-78. https://doi.org/10.1016/S0168-1923(03)00161-8

Fathelrahman, E., Davies, A., Davies, S., Pritchett, J. (2014) Assessing climate change impacts on water resources and Colorado agriculture using an equilibrium displacement mathematical programming model. Water 6:1745-1770.

Heo, I. H., Lee, S. H. (2017) Impact of climate on yield of sweet persimmon in Gyeongsangnam-Province, South Korea. J Clim Res 12:133-147.

IPCC (2021) Summary for policymakers. in: climate change (2021): The Physical Science Basis. Cambridge

University Press.

Jawid, A. (2020) A Ricardian analysis of the economic impact of climate change on agriculture: Evidence from the farms in the central highlands of Afghanistan. J Asian Econ 67:101177.

Kim, C. G. (2008) Impacts of Climate change on the agricultural sector in korea. Korea Rural Economic Institute (TRKO201700002118). The Office for Government Policy Coordination(OPC). https://doi.org/10.23000/TRKO201700002118

Kim, C. G. (2009) The impact of climate change on the agricultural economy. Meteorological Technology Policy 2:30-42.

Kim, K. P., Lee, W. J. (2005) Apple production observation improvement research. No. 6-0007. KREI.

Kim, M. R., Kim, S. G. (2014) Examining Impact of weather factors on apple yield. Korean. J Agric For Meteorol 16:274-284.

Kim, S. G. (2015) Developing yield prediction model for major fruits (TRKO201500010786). Rural Development Administration (RDA). https://doi.org/10.23000/TRKO201500010786

Kim, S. Y., Heo, I., Lee, S. H. (2010) Impacts of temperature rising on changing of cultivation area of apple in Korea. The Korean Association of Regional Geographers (KARG) 16:201-215.

Korea Meteorological Administration (2018) Casebook of climate change scenarios.

Korea Meteorological Administration (2021) Korea 109 years climate change analysis report. Seoul, Korea Meteorological Administration Climate Change Monitoring Division, National Institute of Meteorological Sciences, Future Basic Research Division, 11-1360000-001694-01.

Kwon, O. S., Lee, H. B. (2012) Climate change, agricultural productivity, and their general equilibrium impacts: a recursive dynamic CGE analysis. Environmental and Resource Economics Review (KREA) 21:947-980.

Lee, S. W., Yoon, S. D., Park, J. Y., Min, S. H. (2006) (The) Practice on Spatial Econometrics Models. Pakyoungsa.

Mendelsohn, R., Nordhaus, W. D., Shaw, D. (1994) The impact of global warming on agriculture: a ricardian analysis. Am Econ Rev 753-771.

Momeni, S., Zibaei, M. (2013) The potential impacts of climate change on the agricultural sector of Fars province. J Dev Agric Econ 27:169-179.

Moriondo, M., Bindi, M. (2010) Impact of adaptation opportunities for European agriculture in response to climatic change and variability. Mitig Adapt Strateg Glob Change 15:657-679. https://doi.org/10.1007/s11027-010-9219-0

Rural Development Administration(RDA) (2015) Fruit trees sensitive to climate change. What will the farmland look like in 100 years? https://www.rda.go.kr/board/board.do?mode=view&prgId=day_farmprmninfoEntry&dataNo=100000706869

Sadiq, S., Saboor, A., Mohsin, A. Q., Khalid, A., Tanveer, F. (2019) Ricardian analysis of climate change-agriculture linkages in Pakistan. Clim Dev 11:679-686.

Zilberman, D., Liu, X., Roland-Holst, D., Sunding, D. (2004) The economics of climate change in agriculture. Mitig Adapt Strateg Glob Change 9:365-382.

Appendix

Appendix 1. Analysis results of apple production function (considering the effects of highest/lowest temperature)

	OLS	SEM	SAR	SAC
Constant	-17.231 ***			
Average annual temperature	0.816 ***	0.664 *	0.767 **	0.665 **
Average annual temperature quadratic term	-0.041 ***	-0.033 **	-0.038 **	-0.033 **
Highest temperature	0.019 *	-0.009	-0.033	-0.010
Lowest temperature	0.158 ***	0.222 ***	0.158 ***	0.221 ***
Average annual precipitation	1.346 ***	1.116 **	1.364 **	1.115 **
Average annual insolation	4.142 **	3.378	1.166	3.376
Plantation area	0.332 ***	0.371 **	0.378 **	0.373 **
Number of farms	0.957 ***	1.102 ***	1.009 ***	1.104 ***
ρ			0.847 ***	0.080
λ		2.372 ***		2.367 ***
AIC		2437.618	2694.659	2439.430
BIC		2487.010	2744.051	2493.761
Log-likelihood		-1208.809	-1337.329	-1208.715
R^2	0.574	0.562	0.174	0.553

Appendix 2. Analysis results of apple production function (considering the highest/lowest temperature variables and their quadratic terms)

	OLS	SEM	SAR	SAC
Constant	-9.721 **			
Average annual temperature	1.295 ***	0.854 **	1.047 ***	0.964 ***
Average annual temperature quadratic term	-0.063 ***	-0.042 ***	-0.051 ***	-0.047 ***
Highest temperature	-0.018	0.007	0.002	0.003
Highest temperature quadratic term	0.001 ***	0.000	0.000	0.000
Lowest temperature	0.519 ***	0.556 ***	0.430 ***	0.514 ***
Lowest temperature quadratic term	0.014 ***	0.012 ***	0.010 ***	0.012 ***
Average annual precipitation	1.195 ***	1.046 **	1.181 **	1.112 **
Average annual insolation	0.810	2.103	0.393	0.932
Plantation area	0.305 ***	0.352 **	0.360 **	0.353 **
Number of farms	0.958 ***	1.103 ***	1.013 ***	1.072 ***
ρ			0.849 ***	0.679 ***
λ		2.282 ***		0.920 ***
AIC		2401.738	2651.418	2528.565
BIC		2461.009	2710.689	2592.775
Log-likelihood		-1188.869	-1313.708	-1251.282
R^2	0.601	0.577	0.207	0.408

Appendix 3. Analysis results of pear production function (considering the effects of highest/lowest temperature)

	OLS	SEM	SAR	SAC
Constant	-6.241 ***			
Average annual temperature	0.539 ***	0.421 ***	0.420 ***	0.421 ***
Average annual temperature quadratic term	-0.023 ***	-0.018 ***	-0.018 ***	-0.018 ***
Highest temperature	-0.004 ***	-0.001	-0.001	-0.001
Lowest temperature	-0.008 ***	-0.002	-0.002	-0.003
Average annual precipitation	-0.095 *	-0.157 **	-0.159 **	-0.157 **
Average annual insolation	1.724 ***	4.669 ***	4.662 ***	4.661 ***
Plantation area	0.141 ***	0.143 ***	0.143 ***	0.143 ***
Number of farms	-0.050 ***	-0.042 **	-0.041 **	-0.041 **
ρ			-0.111	-0.338
λ		0.019		0.273
AIC		-1041.095	-1041.412	-1040.155
BIC		-990.448	-990.764	-984.443
Log-likelihood		530.547	530.706	531.078
R^2	0.2031	0.221	0.2342	0.2562

Appendix 4. Analysis results of pear production function (considering highest/lowest temperature variables and their quadratic terms)

	OLS	SEM	SAR	SAC
Constant	-5.712 **			
Average annual temperature	0.551 ***	0.416 ***	0.415 ***	0.415 ***
Average annual temperature quadratic term	-0.024 ***	-0.017 ***	-0.017 ***	-0.017 ***
Highest temperature	-0.017 ***	0.003	0.003	0.003
Highest temperature quadratic term	0.000 ***	0.000	0.000	0.000
Lowest temperature	-0.016 **	-0.005	-0.006	-0.006
Lowest temperature quadratic term	-0.0003	0.000	0.000	0.000
Average annual precipitation	-0.103 **	-0.158 **	-0.158 **	-0.158 **
Average annual insolation	1.483 ***	4.684 ***	4.678 ***	4.678 ***
Plantation area	0.141 ***	0.144 ***	0.143 ***	0.143 ***
Number of farms	-0.049 ***	-0.042 **	-0.042 **	-0.042 **
ρ			-0.143	-0.349
λ		-0.014		0.251
AIC		-1039.258	-1039.773	-1038.377
BIC		-978.481	-978.9957	-972.5348
Log-likelihood		531.629	531.8864	532.1883
R^2	0.2957	0.2161	0.2342	0.2534