

PMP 최적화 모형을 이용한 기후변화 대응 작물전환 분석*

권오상** 강혜정*** 정학균**** 김창길*****

Keywords

기후변화(climate change), 작물선택(crop choice), 제주도(Jeju Island), PMP 모형(PMP model), 혼합정수 비선형계획법(mixed integer nonlinear programming)

Abstract

Our study analyzes producer's crop choice adaptation responses to climate change using the data of Jeju Island, Korea. A regional level positive mathematical programming model is used for the analysis, where prices as well as outputs are endogenously determined. The impacts of forecasted temperature increase on production costs are incorporated, based on the IPCC scenarios. Our simulation results show that the planted areas of newly introduced tropical fruits such as mango, guava and pitaya will be raised substantially due to temperature change. Moreover, production of high-valued energy intensive greenhouse tangerines will also increase. Because of the responses to climate change total regional agricultural profit of Jeju Island may increase by about 20 percent in 2040. Our paper provides a case study where climate change results in potentially positive economic impacts.

차례

- | | |
|---------------|------------|
| 1. 서론 | 4. 분석 결과 |
| 2. 분석모형 | 5. 요약 및 결론 |
| 3. 분석에 사용된 자료 | |

* 본 논문은 한국농촌경제연구원이 지원한 연구사업 「농업생산 최적화 모형을 이용한 기후변화 적응조치의 경제적 효과 분석」의 성과물이며, 김창길 외(2015)의 연구보고서에 게재된 일부 내용을 보완·확장한 것임.

** 서울대학교 농경제사회학부 농업·자원경제학전공 교수 겸 농업생명과학연구원 겸무연구원, 교신저자. e-mail: kohsang@snu.ac.kr

*** 전남대학교 농업경제학과 부교수.

**** 한국농촌경제연구원 연구위원.

***** 한국농촌경제연구원 원장.

1. 서론

그동안 기후변화가 농업에 미치는 영향에 대한 분석은 우선적으로 주요 품목의 생산성이 기후변화에 의해 어떤 영향을 받는지를 분석하는 데 초점이 맞추어져 왔다. 주로 쌀이나 옥수수 등을 대상으로 작물 시뮬레이션 모형들이 이용되어 왔는데, 특히 쌀의 경우 국제적으로 잘 알려진 ORYZA, CERES-Rice 등의 시뮬레이션 모형들이 있고, 한국의 경우에도 작물학 연구자들이 참여한 환경부(2011) 등의 연구보고서가 이들 모형을 이용해 쌀이나 보리와 같은 몇몇 작물의 생산성이 기후변화 시나리오에 따라 어떻게 변할지를 분석·제시한 바가 있다.

작물학 분야와 달리 경제학 분야에서는 측정된 단수 및 기후자료를 이용하여 기후변수가 단수에 미치는 영향을 계량경제학적으로 분석하고, 향후 기후변수의 예측치를 추정식에 대입하여 미래의 생산성 변화를 예측하였다. 여기에는 권오상·김창길(2008), 조현경 외(2013), 조현경·권오상(2014) 등의 연구가 속하는데, 모두 주곡인 쌀을 대상으로 분석을 행하였다.

이상의 작물 시뮬레이션 기법이나 계량경제학적 추정모형은 모두 기후변화가 주요 농작물의 생산성에 미칠 영향에 관해 유용한 정보를 제공하지만, 기후변화에 대한 생산자들의 적응이나 반응을 분석하지 못한다는 큰 한계를 가진다. 사실 기후변화는 몇몇 품목의 생산성 변화뿐 아니라 농업 생산여건 전반을 광범위하게 바꿀 것으로 예상된다. 이러한 기후변화에 대한 적응조치로는 고온에 강한 신품종을 개발하고, 수리시설과 같은 농업 기반시설을 강화하는 것 등이 논의되고 있지만, 생산자 입장에서는 생산품목을 적절히 선택하는 것이 가장 효과적인 적응조치가 된다. 제한된 투입요소를 가진 농업 생산자들은 기후변화와 같은 생산여건 변화에 직면하여 최적의 품목과 생산방법을 선택하게 되는데, 이러한 행위를 분석하기 위해서는 생산자들의 생산행위를 반영하는 균형모형이나 최적화 모형의 분석이 필요하다.

특히 최적화 모형은 개별 농민이나 국가가 가지고 있는 자원부존 현황이나 생산기술여건 등을 세밀하게 반영하면서 기후변화를 포함하는 생산여건 변화가 품목 선택행위에 미치는 영향을 분석할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이런 이유로 해외의 경우 Adams et al.(1998), Reilly et al.(2001), Chang(2002), 그리고 국내의 경우 박경원·권오상(2011), 박경원 외(2015) 등의 연구가 최적화 모형을 이용해 기후변화가 농업부문에 미치는 영향을 분석하였다. 이들 보고서나 논문 외에도 미국의 B. McCarl 교수가 개발한 FASOM, 미국 농무부의 REAP, 유럽연합의 CAPRI 등과 같은 최적화 모형이, 기후

변화를 포함하는 생산환경 변화가 농업부문 품목 선택이나 토지 이용에 미치는 영향을 분석하는 데 활용되고 있다.

본고는 이상에서 설명한 바와 같은 유용성을 가지는 최적화 모형을 활용하여, 기후변화가 품목선택을 어떻게 바꾸는지를 제주도의 사례를 통해 분석하고자 한다. 제주도는 감귤, 참다래 및 기타 몇 가지 종류의 고온성 작물을 이미 생산하고 있고, 향후 본격적으로 아열대성 기후대에 편입될 가능성이 높아 망고나 구아바, 용과 등의 열대과일을 중심으로 품목 전환의 가능성이 높게 예측되는 곳이기 때문에 이러한 분석 사례로 적절할 것으로 판단된다.

최적화 모형을 이용해 기후변화에 대응하는 작목 선택을 분석할 때 본고는 상당히 많은 요소들이 결과에 영향을 미칠 수 있음에 주목하고, 또한 최적화 모형 자체가 가지고 있는 방법론상의 한계도 극복하는 방안을 마련코자 한다. 기후변화가 품목 선택에 영향을 미치는 이유는 무엇보다도 생산성 혹은 경영비에 영향을 미치기 때문일 것이다. 그렇다면 향후 기후변화, 특히 기온상승이 어느 정도나 발생할 것인지가 예측이 되어야 한다. 이어서 기온상승이 예측되더라도 이로 인해 새로 도입될 품목의 경영비는 물론이고, 기존 품목의 생산성이나 경영비는 얼마나 달라질지도 파악이 되어야 한다. 마지막으로, 최적화 문제이긴 하지만 기후변화에 대한 반응으로 품목선택이 달라지면 각 품목의 공급량이 달라지고, 이로 인해 가격 자체가 변할 수 있음을 감안하여야 한다. 즉, 최적화 문제에 어떻게 가격변화를 내생화하며, 생산량 변화 시 가격이 얼마나 달라질지를 예측해야 하는 문제가 있다.

자료상의 문제에 있어서 기온상승 예측치는 기상청이 제시하는 시나리오별 예측치를 이용할 수 있지만, 그로 인한 작물의 생산성 혹은 경영비 변화는 쌀 등 기존의 소수 품목에 대해서만 연구가 되어 있기 때문에 예측치를 얻는 것이 어렵다. 본고는 대안으로서, 고온성 작물의 생산이 가능한 전남지역과 제주지역에서의 시설재배 시 기온 차이로 인해 연료비 변화가 어느 정도 나는지를 확인하고 이를 최종 경영비 변화에 반영하여, 작물학적 연구가 제시하지 못하는 과수품목의 경영비 변화 정보를 도출·사용한다. 또한 생산량 변화에 따른 가격변화를 반영해야 하는데, 이는 근거 자료를 얻기가 가장 어려운 부분이라 본고는 일종의 시뮬레이션 기법을 이용한다. 가격과 경영비의 차이를 제주도가 생산하는 품목별 수요함수의 가격탄력성으로 전환하고, 이에 대한 다양한 가정하에서 어떠한 결과가 발생하는지를 보여주도록 한다.

최적화 모형 방법론 자체의 문제는 모형의 특성상 과도한 구석 해(corner solution)가 선택되고, 그 결과 모형이 제시하는 해가 자료상으로 관측되는 실제 현상과는 크게 다르게 된다는 점이다. 따라서 기존 연도에서도 모형의 해가 실제 자료와 다르기 때문에

기후변화 효과를 분석하는 것도 부정확할 수밖에 없다. 최적화 모형에 개입된 이러한 문제는 전통적으로 해가 가질 수 있는 범위를 제약하는 방식을 통해 해결해 왔지만, 이 방식은 상당한 정도의 자의성을 가질 수밖에 없으며, 특히 기후변화의 효과를 시뮬레이션 할 때에도 기후가 변하기 이전의 자료를 기준으로 자의적으로 부과한 제약을 계속 유지해야 하는 문제가 발생한다.

최적화 모형이 가지는 구석 해 선택 문제, 즉 과잉특화 문제의 해결을 위해서는 Howitt(1995)에 의해 도입된 PMP(positive mathematical programming) 기법을 본고의 목적에 맞게 개량하여 적용하는데, 기존의 PMP 모형이 현재에는 생산되지 않고 있는 새로운 품목까지 모형에 도입하는 데에는 한계가 있음을 인지하고, 본 연구처럼 현재 생산되지 않거나 미약한 생산만 이루어지고 있는 품목까지 포함할 수 있도록 모형을 설정하는 방법을 제시한다. 또한 기존의 PMP 모형이 선형계획법(LP)에 의존하고 있음에 반해 본고의 모형은 가격을 내생화하고, 아울러 신규 도입 품목의 경우 도입 초기 시장여건과 품목 생산이 일반화된 이후의 시장여건이 다를 수 있음도 반영하는 혼합정수 비선형계획법(mixed integer nonlinear programming: MINLP)에 PMP 기법을 최초로 적용하고자 한다.

제2절은 본고가 사용할 PMP 모형에 대해 설명한다. 제3절은 분석에 사용된 자료의 출처와 자료의 특성 및 적용방식에 대해 설명한다. 제4절은 몇 가지 시나리오하에서 기후변화의 품목선택 효과를 분석하고 그 결과를 제시하며, 마지막 제5절은 논문의 분석결과를 요약하고 시사점을 찾는다.

2. 분석모형

특정 지역의 최적 농업 생산행위를 도출하기 위해서 생산자의 선택문제를 구축하되, 본고의 분석목적과 자료특성을 감안하기 위해 생산과정에 계층구조를 도입한다. 총 N 가지의 생산활동이 가능한데, 이들은 다시 $B_1, \dots, B_K$ 의 K 가지로 분류되고, 이 중 특정 생산활동군 B_k 에는 N_k 개의 세부 생산활동이 포함된다고 하자. 예를 들면 쌀의 경우 논벼와 밭벼, 두 가지 재배방법이 있어 쌀 재배활동을 B_1 이라 하면, 여기에는 논벼와 밭벼라는 두 가지 생산활동이 포함된다.¹ k 번째 생산활동군에 속하는 세부 생산행위 i 의 수준을 $x_{k,i}$ 로 표현하고, N 개의 모든 생산활동 수준을 벡터 x 로 표기하면, 생산자의 전체 최적화 모형은 다음과 같다.

$$(1) \quad \max f(x) - \sum_{k=1}^K \sum_{i \in B_k} c_{k,i} x_{k,i}$$

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

위의 문제에서 함수 $f(x)$ 는 생산행위로 인해 벌어들이는 수입(revenue) 혹은 편익이다. $c_{k,i}$ 는 k 번째 그룹 내 품목 i 의 재배면적 $x_{k,i}$ 의 단위당 가변비용이고, 파라미터 $a_{k,i,j}$ 는 $x_{k,i}$ 한 단위가 필요로 하는 j 번째 자원량이다. b_j 는 자원의 부존량이다. 이 문제의 주어진 조건에서 실제로 관측되는 생산행위 $x_{k,i}$ 의 값을 $x_{0k,i}$ 라 하자. 관측되는 모든 $x_{0k,i}$ 의 값이 0보다 커서 실제로 생산이 된 품목만을 모형에 포함했다고 하더라도 최적화 문제의 특성 상 상당 수 품목의 $x_{k,i}$ 값이 0으로 선택된다. 이러한 과잉특화는 $f(x)$ 가 선형일 경우 가장 심하게 나타나고, 비선형 함수일 경우에도 특별한 장치를 모형에 포함하지 않는 한 그 정도가 약해지긴 하지만 여전히 나타난다.

이러한 과잉특화 문제의 해결책으로 Howitt(1995)에 의해 도입된 PMP 기법은 목적 함수 중 비용함수 $c_{k,i}x_{k,i}$ 도 비선형함수로 변환하되, 변환하는 과정에서 $x_{k,i}$ 가 $x_{0k,i}$ 와 일치되도록 한다. PMP 기법의 첫 번째 단계에서는 수식 (1)의 최적화 모형의 해가 기준점(BAU)에서 관측되는 자료로부터 벗어나지 않도록 하는 추가 제약을 포함하는 다음의 모형을 푼다.

¹ Röhm and Dabbert(2003)는 다른 부분집합에 속하는 품목에 비해 동일 부분집합 내에 속하는 품목 간의 생산대체가 더 원활할 수 있기 때문에 이런 계층화를 제안하였다.

$$\begin{aligned}
(2) \quad & \max f(x) - \sum_{k=1}^K \sum_{i \in B_k} c_{k,i} x_{k,i} \\
\text{s.t.,} \quad & \sum_{k=1}^K \sum_{i \in B_k} a_{k,i,j} x_{k,i} \leq b_j, \quad j = 1, \dots, M \quad (\mu_j) \\
& \sum_{i \in B_k} x_{k,i} \leq \sum_{i \in B_k} x_{0k,i} (1 + \tau_1) \quad (\lambda_k) \\
& x_{k,i} \leq x_{0k,i} (1 + \tau_2) \quad (\lambda_{k,i})
\end{aligned}$$

수식 (2)의 PMP 1단계 모형에서는 각 부분집합에 속하는 생산활동의 합이 관측되는 값보다 크지 않아야 한다는 제약과, 각 개별 생산활동이 그 실제 활동 수준보다 크지 않아야 한다는 두 가지 캘리브레이션 제약이 추가로 반영되며, 이 제약에는 두 가지의 매우 작은 양(+)의 파라미터 τ_1 과 τ_2 가 활용된다.² 수식 (2)에서 괄호 안의 변수는 모두 각 제약식의 라그랑지안 승수를 나타낸다.

$x_{k,i}$ 에 대한 미분을 취했을 때 도출되는 수식 (2)의 최적화 조건은 다음과 같다.

$$(3) \quad \frac{\partial f(x)}{\partial x_{k,i}} - c_{k,i} - \sum_j \mu_j a_{k,i,j} - \lambda_k - \lambda_{k,i} = 0$$

이제 수식 (2)의 두 가지 캘리브레이션 제약은 포함하지 않되, 비용함수로 2차함수 형태를 가지는 다음의 문제를 검토하자.

$$\begin{aligned}
(4) \quad & \max f(x) - \sum_{k=1}^K \sum_{i \in B_k} \left[\alpha_{k,i} x_{k,i} + \delta_{k,i} x_{k,i} + \frac{1}{2} \beta_k x_{k,i}^2 \right] \\
\text{s.t.,} \quad & \sum_{k=1}^K \sum_{i \in B_k} a_{k,i,j} x_{k,i} \leq b_j, \quad j = 1, \dots, M \quad (\mu_j)
\end{aligned}$$

수식 (3)은 수식 (2)의 두 가지 캘리브레이션 제약식과 두 가지 승수 λ_k 와 $\lambda_{k,i}$ 대신 두 항을 더 가져서 세 개의 항으로 구성된 2차함수 형태의 비용함수를 목적함수에 포함하고 있다. 비용함수의 파라미터 중 $\alpha_{k,i}$ 와 $\delta_{k,i}$ 는 각 개별 생산활동별로 모두 다른 값을 가지지만, 파라미터 β_k 는 품목군별로만 다른 값을 가지고 동일 품목군 내에서는 같은 값을 가진다. 수식 (4)의 최적화 조건은 다음과 같다.

² 이 두 값은 수식 (2)의 모형 내 세 가지 서로 다른 선형제약 간의 종속성을 방지하기 위해 도입되며, 그 선택이 분석결과에 영향을 미치지 않는다. 또한 두 가지 캘리브레이션 제약이 모두 역할을 하게 하기 위해 개별 활동 수준에 대한 캘리브레이션 제약을 좀 더 느슨하게 두도록 하여, $\tau_1 < \tau_2$ 의 조건이 유지되도록 한다.

$$(5) \quad \frac{\partial f(x)}{\partial x_{k,i}} - \alpha_{k,i} - \sum_j^M \mu_j a_{k,i,j} - \delta_{k,i} - \beta_k x_{k,i} = 0$$

따라서 수식 (3)의 최적화 조건과 수식 (5)의 최적화 조건이 기준 연도에서의 실제 생산활동 $x_{0k,i}$ 에서 일치한다면, 생산행위를 제약하는 수식 (2)의 모형 대신 생산량 제약없이 2차 비용함수를 가지는 수식 (5)를 사용할 수 있다. 이 경우 캘리브레이션 제약이 없이도 최적화 모형의 해가 자료가 일치할 뿐 아니라, 비용함수가 선형이 아닌 2차 함수이기 때문에 기후변화에 대한 반응 역시 어느 한 품목에 집중되지 않고 보다 부드럽게(smooth) 나타난다는 장점도 가진다.

수식 (3) 및 (5)가 $x_{0k,i}$ 에서 공히 성립하도록 하는 데에는 여러 가지 방법이 있을 수 있는데,³ 본고는 다음의 조건을 충족하는 $\hat{\alpha}_{k,i}$, $\hat{\beta}_k$, $\hat{\delta}_{k,i}$ 를 도출한다.

$$(6) \quad \hat{\alpha}_{k,i} = c_{k,i}, \quad \hat{\beta}_k = \frac{\lambda_k}{x_{0k}}, \quad \hat{\delta}_{k,i} = \lambda_{k,i} + \lambda_k \left(1 - \frac{x_{0k,i}}{x_{0k}} \right), \quad \bar{x}_{0k} = \max_{i \in B_k} \{x_{0k,i}\}$$

$\bar{x}_{0k}$ 는 k 번째 품목군에 속하는 품목 중 식부면적이 가장 큰 품목, 즉 생산자입장에서 가장 효율적인 품목을 나타낸다. λ_k 와 $\lambda_{k,i}$ 의 값은 먼저 수식 (2)를 풀어 그로부터 구한다. 이상의 한계생산비에서 $\hat{\alpha}_{k,i}$ 는 품목고유의 단위당 생산비를 반영한다. 그리고 총비용함수의 2차항을 구성하는 $\hat{\beta}_k$ 는 각 품목군별 고유한 단위당 생산비를 반영한다. 마지막으로 $\hat{\delta}_{k,i}$ 는 품목 i 가 스스로 속한 품목군 B_k 내에서 상대적으로 어느 정도의 효율성을 가지는지를 나타낸다. 만약 i 가 해당 품목군에서 가장 효율적인 품목이라면, 즉 $x_{0k,i} = \bar{x}_{0k}$ 라면 $\hat{\delta}_{k,i} = \lambda_{k,i}$ 가 되고, 따라서 이 품목은 다른 조건이 같다면 B_k 에 속하는 다른 어떤 품목에 비해서도 낮은 한계생산비를 가지게 된다. 반면 이 품목이 BAU에서 선택되지 않았다면, 즉 $x_{0k,i} = 0$ 이라면, $\hat{\delta}_{k,i} = \lambda_{k,i} + \lambda_k$ 가 되고, 이 품목은 B_k 내의 다른 어떤 품목보다도 더 높은 한계생산비를 가져야 한다. 그리고 $\hat{\beta}_k$ 는 $\bar{x}_{0k}$ 가 어떤 경우에도 0보다 큰 값을 가지기 때문에 그 개별 구성요소 중 아직은 생산이 되지 않아 $x_{0k,i} = 0$ 인 경우가 있어도 잘 정의된다. Howitt(1995), 박경원 외(2015) 등의 통상적인 PMP분석 연구에서는 본고와 달리 품목군별로 적용되는 캘리브레이션 제약은 포함하지 않았고, 따라서 현재 생산이 되지 않는 품목은 여건변화에도 여전히 생산되지 않아야 한다는 제약을 갖게 되는데, 본고의 PMP 적용절차는 이러한 문제를 가지지 않는다.

³ PMP 모형의 파라미터를 식별하는 여러 방법에 관한 포괄적인 논의에 대해서는 Paris and Arfini (2000), Paris(2011), Paris and Howitt(1998), Blanco et al.(2008), Cortignani and Severini (2011) 등을 참고할 수 있다.

수식 (6)과 같이 식별된 파라미터를 수식 (4)에 대입하여 풀면, 기준 연도에 있어 생산량이 관측치와 일치토록 하는 제약을 인위적으로 가하지 않아도 양자는 일치하며, 예를 들어 기후변화로 인해 관측되는 단위 생산비 $c_{k,i}$ 가 바뀔 경우 이로 인해 $\hat{\alpha}_{k,i} = c_{k,i}$ 가 바뀌게 되고, 이를 반영하는 수식 (4)를 다시 풀어 기후변화로 인한 작목 선택과 소득의 변화 등을 도출할 수 있다.

이제 마지막으로 생산자의 수입에 해당되는 $f(x)$ 를 설정하여야 한다. Howitt(1995)과 같은 농가단위 생산모형은 개별 생산자가 시장 전체 공급에서 차지하는 비중이 작기 때문에 공급량에 따른 가격변화는 없다고 보고 $p_{k,i}$ 를 시장가격이라 할 때 $f(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{i \in B_k} p_{k,i} x_{k,i}$ 를 가정한다. 그러나 제주도와 같은 지역단위의 생산량은 전국 시장에서 차지하는 비중이 작지 않고, 아열대 작물의 경우 특히 그러하기 때문에 이는 현실적인 가정이라 보기는 어렵다. 대안은 하나의 생산자로서 제주도는 우하향하는 수요곡선을 가진다고 보는 것이다. 이 경우 제주도가 생산하는 농산물의 가격은 생산량에 따라 달라지는 내생변수가 된다.

우하향하는 수요곡선은 $p_{k,i} = \gamma_{0,k,i} - \gamma_{k,i} x_{k,i}$ 와 같은 선형으로 설정할 수 있다. 선형함수 설정의 장점은 수요의 가격탄력성이 알려져 있을 경우 파라미터 $\gamma_{0,k,i}$ 와 $\gamma_{k,i}$ 를 식별할 수 있다는 것이다. 만약 현재의 가격과 수량이 각각 $\bar{p}_{k,i}(=p_{0k,i})$ 와 $\bar{x}_{k,i}(=x_{0k,i})$ 이고 알려져 있는 수요의 가격탄력성(의 음의 값)이 $\epsilon_{k,i}$ 라면, $p_{k,i}(x_{k,i}) = \bar{p}_{k,i} + \gamma_{k,i}(\bar{x}_{k,i} - x_{k,i})$ 이고 $\gamma_{k,i} = \frac{\bar{p}_{k,i}}{\epsilon_{k,i} \bar{x}_{k,i}}$ 의 관계가 있다. Hazell and Norton(1986)은 이러한 선형의 수요곡선을 가정할 때에는 적절한 $f(x)$ 로서 각 상품의 소비편익인 수요곡선 이하의 면적을 모든 상품에 대해 합한 것을 사용할 것을 제안하였다.⁴

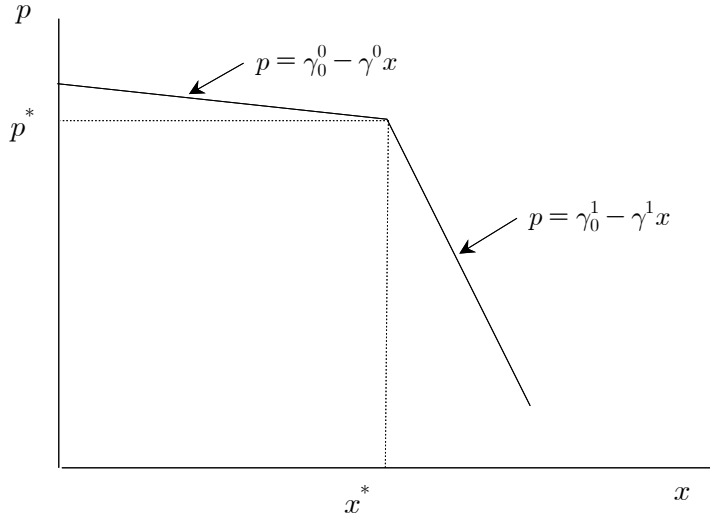
우리의 경우 그 면적은 $\int_0^{x_{k,i}} p_{k,i}(z) dz = \bar{p}_{k,i} x_{k,i} \left(1 - \frac{x_{k,i} - 2\bar{x}_{k,i}}{2\epsilon_{k,i} \bar{x}_{k,i}} \right)$ 이고, 그 합은 $f(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{i \in B_k} \left[\bar{p}_{k,i} x_{k,i} \left(1 - \frac{x_{k,i} - 2\bar{x}_{k,i}}{2\epsilon_{k,i} \bar{x}_{k,i}} \right) \right]$ 이기 때문에 다음의 최적화 문제를 풀어야 한다.

⁴ 이 경우 최적 생산량은 한계판매수입(marginal revenue)과 한계생산비가 일치하도록 조정된다. 특정 상품의 가격은 다른 상품 공급량에 의해서도 영향을 받도록 모형화할 수 있지만, 이 경우 수요함수를 적분해서 최적화 문제의 목적함수를 도출하기 어려운, 소위 적분가능성(integrability) 문제가 발생하기 때문에 교차가격효과는 없는 것으로 가정한다(Hazell and Norton 1986: 168-169).

$$\begin{aligned}
 (7) \quad & \max \sum_{k=1}^K \sum_{i \in B_k} \left[\bar{p}_{k,i} x_{k,i} \left(1 - \frac{x_{k,i} - 2\bar{x}_{k,i}}{2\epsilon_{k,i} \bar{x}_{k,i}} \right) \right] - \sum_{k=1}^K \sum_{i \in B_k} \left[\hat{\alpha}_{k,i} x_{k,i} + \hat{\delta}_{k,i} x_{k,i} + \frac{1}{2} \hat{\beta}_k x_{k,i}^2 \right] \\
 \text{s.t.}, \quad & \sum_{k=1}^K \sum_{i \in B_k} a_{k,i,j} x_{k,i} \leq b_j, \quad j = 1, \dots, M
 \end{aligned}$$

수식 (7)을 실제 관측된 가격과 단위당 생산비에 대해 풀면 BAU에서의 생산량 $x_{0k,i}$ 가 선택이 되고, 정책이나 환경변화에 의해 가격 $\bar{p}_{k,i}$, 단위당 가변비용 $c_{k,i}$, 부존자원량 b_j , 기술계수 $a_{k,i,j}$ 등이 달라질 때는 최적의 생산자 반응과 그때의 균형가격이 도출된다.

그림 1. 신규보급 품목과 시장환경 변화



한편, 수식 (7)의 모형은 망고 등 신규로 도입되는 아열대 과수에 그대로 적용하기에는 문제가 따를 수 있다. 이들 품목은 아직 본격적으로 국내 시장에 공급되지 않았고, 열대성 과일의 수입 대체라는 희소성이 있으면서도 새로운 품목에 대한 소비자들의 선호 발달 등으로 인해 상당한 양이 별다른 가격하락 없이도 국내 시장에 도입될 여지가 있다. 이들 신규품목에 대해서도 현 수준에서의 공급증가는 바로 가격하락으로 연결된다고 가정하는 것은 비현실적일 수 있다. 따라서 <그림 1>이 보여주는 바와 같이 어느 정도의 생산량, 즉 x^* 까지는 국내 생산량이 늘어나도 가격이 매우 완만하게 하락하다가 그 이상으로 충분히 생산량이 늘어나면 그때부터는 추가 생산이 보다 큰 폭의 가격

하락을 가져다주는 것으로 모형화를 할 수 있다. 이를 위해서는 수요함수 자체가 (p^*, x^*) 를 경계로 굴절되는 형태가 되어야 한다.⁵ 이를 반영하면 수식 (7)은 다음처럼 변형할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 (8) \quad & \max \sum_{k=1}^K \sum_{i \in B_k} \left[(1 - y_{k,i}) \int_0^{x_{k,i}} (\gamma_{0,k,i}^0 - \gamma_{k,i}^0) dz \right. \\
 & \quad \left. + y_{k,i} \left\{ \int_0^{x_{k,i}} (\gamma_{0,k,i}^0 - \gamma_{k,i}^0) dz + \int_{x_{k,i}^*}^{x_{k,i}} (\gamma_{0,k,i}^1 - \gamma_{k,i}^1) dz \right\} \right. \\
 & \quad \left. - \left\{ \hat{\alpha}_{k,i} x_{k,i} + \hat{\delta}_{k,i} x_{k,i} + \frac{1}{2} \hat{\beta}_k x_{k,i}^2 \right\} \right] \\
 \text{s.t.,} \quad & \sum_{k=1}^K \sum_{i \in B_k} a_{k,i,j} x_{k,i} \leq b_j, \quad j = 1, \dots, M \\
 & \gamma_{k,i}^0 = \frac{\bar{p}_{k,i}}{\epsilon_{k,i}^0 x_{k,i}}, \quad \gamma_{0,k,i}^0 = \frac{\epsilon_{k,i}^0 + 1}{\epsilon_{k,i}^0} \bar{p}_{k,i}, \quad \gamma_{k,i}^1 = \frac{p_{k,i}^*}{\epsilon_{k,i}^1 x_{k,i}^*}, \quad \gamma_{0,k,i}^1 = \frac{\epsilon_{k,i}^1 + 1}{\epsilon_{k,i}^1} p_{k,i}^* \\
 & p_{k,i}^* = \gamma_{0,k,i}^0 - \gamma_{k,i}^0 x_{k,i}^* \\
 & y_{k,i} (x_{k,i} - x_{k,i}^*) \geq 0, \quad (1 - y_{k,i}) (x_{k,i} - x_{k,i}^*) \leq 0, \quad y_{k,i} \in \{0, 1\}.
 \end{aligned}$$

수식 (8)에서 $y_{k,i}$ 는 내생변수인 이항(binary) 선택변수로서 생산이 비탄력적인 가격반응(혹은 탄력적인 수요의 가격탄력성) 구간에 위치할 경우 0, 그보다 많은 구간에 위치할 경우에는 1의 값을 가진다. 즉, 생산자는 굴절수요곡선의 어느 구간에 속할지를 스스로 선택할 수 있다. $\epsilon_{k,i}^0$ 과 $\epsilon_{k,i}^1$ 은 각각 두 구간에서의 수요의 가격탄력성이다($\epsilon_{k,i}^0 > \epsilon_{k,i}^1$). 목적함수의 편미부분은 <그림 1>처럼 어느 구간에 속하느냐에 따라 계산되는 방식이 달라지기 때문에 이항변수 $y_{k,i}$ 를 활용해 이를 반영한 것이다. 수요함수의 절편과 기울기 $\gamma_{0,k,i}$ 와 $\gamma_{k,i}$ 역시 두 구간의 탄력성 차이를 반영하여 계산하며, 조건 $p_{k,i}^* = \gamma_{0,k,i}^0 - \gamma_{k,i}^0 x_{k,i}^*$ 에 의해 임계치 $x_{k,i}^*$ 에서는 어느 수요곡선을 따르든 그 가격 $p_{k,i}^*$ 가 동일하도록 제약된다. 마지막 두 가지 제약식 $y_{k,i} (x_{k,i} - x_{k,i}^*) \geq 0$ 와 $(1 - y_{k,i}) (x_{k,i} - x_{k,i}^*) \leq 0$ 은 $y_{k,i} = 0$ 일 때는 선택 생산량 $x_{k,i}$ 가 임계치 생산량 $x_{k,i}^*$ 보다 클 수 없도록 하고, $y_{k,i} = 1$ 일 때는 그 반대가 되도록 제약한다. 수식 (8)의 모형은 변수 $y_{k,i}$ 는 이항변수이고 변수 $x_{k,i}$ 는 연속변수이면서, 모형 자체가 비선형이기 때문에 혼합정수 비선형계획모형(MINLP)을 이룬다.⁶ 본고는 쌀 등 이미 시장에 정착된 품목의 경우 $\gamma_{0,k,i}^0 = \gamma_{0,k,i}^1$, $\gamma_{k,i}^0 = \gamma_{k,i}^1$ 가 되어 전

⁵ 필요하다면 수요곡선이 몇 차례에 걸쳐 굴절되도록 할 수 있다.

구간에서 동일한 수요함수가 존재한다고 가정하며, 망고 등 아직 도입단계에 있는 품목의 경우 몇 가지 임계치 $x_{k,i}^*$ 를 반영하는 시물레이션을 통해 <그림 1>처럼 수요곡선의 굴절이 있도록 하여 분석을 행한다.

수식 (8)의 MINLP 모형에 적용되는 PMP 절차는 두 단계로 구성된다. 먼저 수식 (8)의 2차 형태 비용함수 대신 선형인 비용함수 $c_{k,i}x_{k,i}$ 를 반영하되 수식 (2)의 두 가지 캘리브레이션 조건을 포함하는 1단계 MINLP 모형을 푼다. 이어서 도출된 승수들을 수식 (6)처럼 활용하여 2차 형태 비용함수를 식별하고, 이를 포함하는 수식 (8)을 최적화한다. 그 해는 캘리브레이션 제약 없이도 BAU에서의 관측치와 완전 일치한다. 이어서 마지막으로 기후변화의 영향을 반영하여 비용계수를 조절한 후 시물레이션을 실행한다.

3. 분석에 사용된 자료

본고에서 구축된 PMP 모형은 남방형 농업여건을 갖춘 제주도에서 실제로 선택된 생산행위에 적용된다. 「2012 농림수산물통계연보」에는 농작물별 식부면적($=x_{0k,i}$)이 도별로 조사되어 있다. 또한 「2012 지역별 농산물 소득자료」에는 각 도별 주요 생산물의 10a당 판매수입($=p_{k,i}$), 임차료, 위탁영농비와 고용노력비를 포함하는 경영비($=c_{k,i}$), 자가노동 투입량($=a_{k,i,L}$) 등이 조사되어 있다. 이 두 가지 통계자료는 그러나 품목 구분 등에 있어 완전 일치하지는 않는데, 특히 소득자료에서는 각 도별로 생산이 적게 이루어지는 작목에 대해 판매수입, 경영비, 노동투입량 등에 대한 조사가 이루어지지 않아 두 통계자료의 품목 수가 완전 일치하지 않으면서 소득 및 비용자료가 일부 품목에서 누락되는 문제가 있다. 본 연구는 제주도에서의 소득 및 비용자료가 미비한 품목의 경우 가장 인접한 도의 자료를 활용하였다. 자원부존량 제약은 현재 생산이 이루어진 총 식부면적과 총 자가노동 투입량이 각각 토지와 노동의 부존량으로 반영되었다($j = A, L$). 자가노동을 제약에 별도로 반영하는 것은 농촌의 여건상 자가노동을 완전히 고용노동으로 대체하기는 어렵다는 점을 반영한 것이다.

본 연구가 기후변화 적응조치를 위해 도입·확대할 새로운 품목으로 검토하는 과일은 참다래, 망고, 구아바, 용과의 네 가지인데, 제주도의 경우 이미 재배가 시작되었다. 「2012

⁶ 본고는 GAMS 24.7.1에 탑재된 BONMIN solver를 이용해 MINLP모형의 해를 구한다.

농림수산물통계연보」의 품목구분에 의하면, 참다래나 망고 등의 비교적 새로운 과수들은 모두 기타과일로 분류가 된다. 이렇게 분류를 하면 작물의 가짓수는 총 67개가 되고, 이 중에 어떤 것은 제주에서 재배가 안 되기도 한다. 제주도의 경우 기타과일로 분류되는 품목의 다수가 참다래, 망고, 구아바 등 기후변화에 의해 생산여건이 향상될 과일들로 구성되어 있다. 따라서 제주도의 기타과일 재배면적에 관한 추가 정보를 제주도청으로부터 얻어 참다래, 망고, 구아바, 용과의 재배면적을 파악하였는데, 이렇게 하면 이들 네 가지 품목은 여타 기타과일 품목으로부터 분리되기 때문에 총 71개의 품목이 선택 대상이 된다.

71개의 품목은 다시 <표 1>처럼 9가지의 품목군으로 나눌 수 있다. 이들 9가지 품목군이 수식 (8) 등에서 사용된 품목군 지표 $k(k=1,...,9)$ 를 이룬다.

표 1. 품목분류

품목군	세부 품목
미곡	논벼, 밭벼
맥류	길보리, 쌀보리, 맥주보리, 밀, 호밀
서류	봄감자, 가을감자, 시설감자, 고구마
잡곡/두류	조, 수수, 옥수수, 메밀, 기타잡곡, 콩, 팥, 녹두, 기타콩
노지채소	오이, 호박, 참외, 수박, 토마토, 딸기, 봄배추, 가을배추, 시금치, 상추, 양배추, 봄무, 가을무, 당근, 고추, 마늘, 파, 양파, 생강, 기타채소
시설과채류	시설오이, 시설호박, 시설참외, 시설수박, 시설토마토, 시설딸기, 시설배추, 시설시금치, 시설상추, 시설무, 시설고추, 기타시설채소, 참다래, 망고, 구아바, 용과
과수	사과, 배, 복숭아, 포도, 감귤, 감, 자두, 기타과일
특용작물	참깨, 들깨, 땅콩, 약용작물, 기타특용작물
화훼/수원지	시설화훼, 기타수원지

<표 1>의 71개 품목에 대한 재배면적 및 판매수입, 경영비, 자가노동 투입량 자료를 얻어야 한다. 이들 자료는 『2012 농림수산물통계연보』와 『2012 지역별 농산물 소득자료』에서 얻을 수 있지만, 열대성 품목의 경영자료는 추가 자료원으로부터 얻어야 한다. 이들 품목의 경영 관련 자료는 제주도농업기술원으로부터 구하였으며, <표 2>에서 정리하였다. 아열대 작물이라 보기는 어렵지만 이미 국내 생산과 소비가 정착이 된 참다래에 비할 때 망고, 구아바, 용과는 조수입이 매우 높은 반면 경영비도 높다는 것을 알 수 있다. 아울러 자가노동시간 필요량도 더 크다.

표 2. 신규 관심품목의 조수입, 경영비, 자가노동시간 (10a당)

품목	지역	조수입(원)	단수(kg)	경영비(원)	자가노동시간
망고	제주	25,141,900	1,767	14,133,000	남 223.2시간, 여 136.8시간
참다래	제주	5,049,044	2,002	2,196,552	남 54시간, 여 43.5시간
구아바	제주	11,900,000	3,500	8,230,000	남 163.8시간, 여 88.2시간
용과	제주	19,383,000	2,769	11,283,000	남 290.0시간, 여 124.0시간

자료협조: 제주도농업기술원.

<표 2>의 자료는 수식 (7) 혹은 (8)의 모형에서 가격 $\bar{p}_{k,i}$ 와 $c_{k,i}(=\hat{\alpha}_{k,i})$, 그리고 $a_{k,i,j}$ 를 제공한다. 서론에서 밝힌 바와 같이 기온상승에 초점을 둔 기후변화의 경제적 효과를 파악하려면, 먼저 기온상승 정도를 예상하고, 이어서 기온상승에 따른 작물들의 생산성이나 경영비 변화를 예상하고, 생산량 변화에 따른 가격변화까지도 반영하여야 한다. 역시 서론에서 밝힌 바와 같이 처음 두 가지는 과학적 예측치나 조사자료를 통해 어느 정도 파악이 가능하지만, 마지막 가격반응에 대한 신뢰할만한 정보가 없어 이에 대해서는 몇 가지 가정하의 수치를 반영하는 시뮬레이션을 실시하기로 한다.

본고는 기후변화의 다양한 효과 중에서도 경영비에 직접 영향을 미칠 수 있는 기온상승에 초점을 맞추며, 2040년 전후를 시간적 분석 대상으로 한다. 기상청의 예측에 따르면 서귀포에서는 2010년 대비 2040년 연평균 기온이 기후변화 시나리오에 따라 <표 3>과 같이 변할 것이다.

표 3. 2040년 서귀포 예상 기온(2010년 대비 변화)

시나리오	기온변화(℃)
RPC 2.6	1.85
RPC 4.5	2.11
RPC 6.0	1.04
RPC 8.5	2.59

자료: 기상청 남한 상세 RCP 시나리오 400년 제어적분(<http://www.climate.go.kr/>).

IPCC의 네 가지 기후변화 시나리오하에서 얻어진 서귀포 지역 예상 기온변화 수치 중에서, 본고는 RPC 4.5와 RPC 8.5 예측치의 가운데 수치인 2.35를 예상 기온상승 수치로 선택하기로 한다. RPC 2.6은 전체적으로 약한 기후변화만을 가정하는 시나리오이고, RPC 6.0은 2040년 정도까지는 대단히 완만한 기온상승이 있다가 이후 급격한 기온상승이 나타난다고 예상하는 시나리오이기 때문에 불안정하고 상대적으로 현실성이 약한 면이 있다.

이러한 기온상승 때문에 발생할 각 작물의 예상 생산성이나 경영비 변화를 예측하여야 하는데, 현재로서는 작물학 분야 연구 등에서 쌀을 비롯한 극소수 품목의 생산성 변화효과만 예측이 되어있다. 구체적으로 쌀, 보리, 콩의 경우 한국 자료를 이용한 연구를 통해 기후변화에 따른 생산성 변화가 예측되어 있는데, 박경원 외(2015)는 농촌진흥청의 연구결과를 이용해 1979~2000년 평균 단수 대비 2010~2040의 평균단수가 쌀의 경우 8.41% 감소(제주), 보리의 경우 평균 3~7% 증가(전국), 콩의 경우 평균 9.07% 증가(전국) 등을 예측하였다. 이 세 품목에 대해서는 이 시나리오를 따르기로 하며, 생산성 변화율의 반대 수치가 경영비 변화율이라 가정한다.

나머지 품목의 경우 현재로서는 기온상승에 따른 효과가 알려져 있지 않아 현재와 경영비 차이가 없다고 가정한다. 그러나 기존 품목을 대체하여 그 비중이 늘 것으로 기대되는 망고, 용과, 구아바와 역시 아열대성에 가까운 품종인 참다래, 그리고 제주도의 경우 기타과일로 분류되는 품목은 <표 4>가 보여주는 바와 같이 이미 아열대성인 경우가 많아, 기온상승에 따라 영농광열비의 절감으로 인한 경영비 감소가 나타날 것임을 고려한다. 아울러 현재 재배면적이 많이 늘어나고 있는 시설감귤도 영농광열비의 경영비 비중이 높기 때문에 기후변화에 따라 직접적인 경영비 영향을 받는 품목으로 분류한다.⁷ 기타과일로 분류되는 품목 중 참다래, 망고, 구아바, 용과의 재배면적이 이들 품목의 BAU에서의 재배면적이 된다. 기타과일 중 이들 네 가지 품목을 제외한 나머지 품목의 재배면적을 본 연구에서는 기타과일 재배면적으로 간주한다.⁸

7 그 외 시설채소류도 기온상승 시 경영비 절감이 발생할 수 있지만, 전체 경영비에서의 영농광열비 비중이 크지 않고, 무엇보다도 제주도에서의 재배면적이 대부분 5ha 미만일 정도로 비중이 작아 기후변화의 직접적인 영향을 받는 품목군에 포함하지 않기로 한다.

8 기타과일의 총 재배면적에 있어 제주도청 자료와 「농림수산물통계연보」 자료는 서로 일치하지 않는다. 본 연구는 참다래, 망고, 구아바, 용과 네 가지 열대과일의 재배면적 정보는 제주도청자료에서 취하고, 기타과일 전체 면적자료는 「농림수산물통계연보」에서 취한다.

표 4. 2012년 제주도 기타과일 재배 현황

품목	면적(ha)	농가수	생산량(톤)
참다래	276.3	504	7,240
단감	78.8	114	478
포도	2.9	14	52
복숭아	1.7	5	38
배	0.6	3	7
매실	34.9	32	388
석류	1	3	0.1
복분자	0.7	1	2.2
무화과	0.3	1	0.2
비과	0.3	1	2.8
파인애플	0.3	1	4.6
바나나	1.3	2	31
블루베리	16.9	43	69
용과	4.6	16	70
구아바	3.6	16	5.3
망고	25.6	52	241.4
아페모아	0.1	1	2
패션프루트	0.3	1	0.5
아보카도	3.8	6	10.4
체리	0.4	2	1.6

자료협조: 제주도청 감귤특작과.

기온 차이가 동일 품목의 영농광열비에 미치는 영향을 파악하기 위해 전라남도(광주시)와 제주도(제주시)의 2009~2013년 사이의 연평균 기온 차이와 영농광열비 차이를 검토하되, 양 지역에서 모두 비교적 활발히 재배되고 있는 신규 품목인 참다래의 영농광열비를 비교하였다. 기온의 경우 평균 1.8도의 차이가 났고, 표준소득자료상의 영농광열비의 경우 제주도의 평균 영농광열비가 전라남도의 70% 수준이었다. 이를 비례적으로 반영하면, 2040년까지 평균 2.35도의 기온상승이 제주도에서 발생한다고 할 때, 아열대 작물의 영농광열비는 현재의 59.7%로 감소할 것으로 예상된다. 물론 기온변화에 대해 영농광열비 차이가 반드시 비례적으로 반응하지는 않을 것이고, 품목별로 영향의 정도도 다를 것이다. 하지만 현재로서는 이 자료가 농민들이 활발히 생산하는 고온성 시설작물의 영농광열비와 지역 간 기온차이의 관계를 나타내는 현실적으로 이용 가능한 자료라 할 수 있다. 이러한 영농광열비 감소율에 각 품목당 경영비에서 영농광열비가 차지하는 비중을 반영하면 제주도에서 2040년 발생할 품목당 경영비 변화가 예

측된다. 그 결과 2040년 단위면적당 경영비가 2012년에 비해 참다래 99%, 시설감귤 74%, 망고 79%, 용과 89%, 구아바 94%, 기타과일 94%가 되는 것으로 예측되었다.

이제 마지막으로 각 품목 수요의 가격탄력성 $\epsilon_{k,i}$ 를 구하여야 한다. 주요 농산물의 수요의 가격탄력성에 관한 연구는 권오상(2015), 임청룡 외(2014), 김성용 외(2015) 등 다수가 있으나, 대부분 국가 전체 혹은 시장 전체의 수요의 가격탄력성을 추정한 연구들이다. 제주도와 같은 특정 지역에서 생산되는 특정 품목은 전국 시장에서 제한된 비중만을 차지하기 때문에 다른 지역에서 생산되는 품목과는 일종의 경쟁관계를 형성할 수밖에 없다. 따라서 각 지역에서 생산되는 세부 품목별 수요의 가격탄력성은 시장 전체를 대상으로 추정된 가격탄력성보다도 더 높고, 수요곡선 자체가 보다 완만한 기울기를 가져야 한다. 개별 생산자나 세부 품목별 수요의 가격탄력성이 시장 전체 수요의 가격탄력성보다 훨씬 더 높다는 것은 미국의 시리얼 제품 수요를 분석한 Nevo(2001), 자동차의 모델별 수요를 분석한 Berry(1994), 그리고 한국 돈육의 세부 부위별 수요를 분석한 권오상·강혜정(2014)의 연구 등 많은 선행연구가 보여주고 있다.

그러나 모든 세부 농산물 품목의 지역별 수요탄력성은 아직까지 추정되지 않았고, 추정작업에도 많은 난점이 따를 수 있어 선행연구로부터 $\epsilon_{k,i}$ 의 값을 직접 얻기는 어렵다. 한 가지 대안으로 Berry(1994)나 Nevo(2001)의 추정모형의 이론적 근거가 되기도 하는 것이지만, 우하향하는 자신의 생산품에 대한 수요곡선에 직면하여 생산자가 최적 행위를 했을 때 형성되는 다음과 같은 관계를 이용할 수 있다.

$$(9) \quad \frac{\bar{p}_{k,i} - c_{k,i}}{\bar{p}_{k,i}} = \frac{1}{\epsilon_{k,i}}$$

즉, 불완전경쟁시장에서 공급하는 생산자는 마크업(mark-up)이 자기 생산품만의 수요의 가격탄력성의 역수가 되도록 의사결정을 한다. 전체 공급량에서 차지하는 비중이 매우 작은 개별 농가의 경우 수요곡선이 수평이고, $\epsilon_{k,i}$ 가 무한대이어서 마크업이 0이 되지만, 제주도와 같은 지역 전체는 전체 시장에서 무시하기 어려운 비중을 차지하기 때문에 $\epsilon_{k,i}$ 가 유한한 값을 가지되, 시장 전체의 수요의 가격탄력성보다는 큰 값을 가질 것이다. 각 지역별 품목의 단위면적당 판매수입 $\bar{p}_{k,i}$ 와 한계생산비 $c_{k,i}$ 가 알려져 있기 때문에⁹ 이 정보로부터 역으로 수요의 가격탄력성 추정치 $\epsilon_{k,i}$ 를 얻을 수 있다.

⁹ 마크업은 이윤을 기준으로 측정되기 때문에 이때의 한계생산비는 경영비에 자가 노동비용까지 합하여 도출하였다.

제주도에서 재배되는 품목은 물론, 다른 지역에서 재배되는 품목까지 포함하여 수식 (9)에 따른 마크업을 조사해보면, 0.1 전후에서 0.5 가까이 이르는 범위를 보여준다(탄력성은 2~10의 범위). 제주도에서 많이 생산되기 때문에 생산비가 직접 집계되는 품목의 경우 0.2~0.48 등의 분포를 보여주는데, 감귤의 경우 0.41로 비교적 높지만, 감, 배 등의 여타 과일은 0.3 미만의 마크업을 가진다.

본고는 이상과 같이 계산된 마크업을 제주도의 기존 품목에 대해 적용하였으나,¹⁰ 망고, 용과, 구아바와 같은 신규 관심품목의 경우 생산비 조사자료가 있긴 하지만 이런 방식으로 조사된 마크업을 기준으로 수요의 탄력성을 도출하는 것은 적절치 않을 수가 있다. 이들 품목의 경우 수입산과 가격 차이가 많이 남에도 현재 백화점 등에서 국내산 프리미엄 하에 높은 가격에 팔리고 있는 실정이다. 아울러 아직은 많은 소비자들에게 국내산 망고 등이 잘 알려져 있지 않아 향후 소비자들의 친숙함 등이 더해질 경우 수요곡선 자체가 상향 이동할 수도 있다. 이런 점을 감안하여 이들 세 가지 품목의 경우 <그림 1>처럼 $x_{k,i}^*$ 수준 이전까지의 공급량에 대해서는 거의 수평에 가까운 수요곡선을 가지고, $x_{k,i}^*$ 보다 생산량이 늘어나면 추가 공급에 따른 가격하락이 본격적으로 이루어진다고 가정한다. 따라서 본고는 이 세 품목의 경우 $\epsilon_{k,i}^0$ 은 거의 무한대에 가까운 3,000을 적용하고, $\epsilon_{k,i}^1$ 의 경우 제주도산 여타 과일 수요의 가격탄력성 추정치의 평균이라 할 수 있는 3을 적용한다.

본고가 취하는 이러한 접근법에 있어 가장 문제가 되는 점은 가격반응의 변화가 나타나는 임계치 $x_{k,i}^*$ 를 정하는 것이고, 사실 이 선택이 분석결과에 민감한 영향을 미친다는 것이 확인된다. 신규 아열대 품목 관련 수치들을 구할 수 있는 직접적인 근거는 없지만, 제주도는 이미 수차례 고온성 신규작물을 도입한 바가 있어 과거의 경험이 유용한 정보를 제공할 수 있다. 지성태·이수환(2016)이 「제주통계연보」 등의 자료를 이용해 정리한 바에 의하면, 1980년대에 본격적으로 도입된 파인애플과 바나나의 제주도 내 생산은 1990년에 각각 226ha와 440ha에 달했으나, 이후 두 품목의 수입자유화 조치로 인해 생산이 거의 소멸되었다. 파인애플과 바나나 사례는 국내 생산증가에 따른 가격반응을 보여주기도하는, 정책변화에 따른 급격한 수입증대로 인한 국내 생산 감소 사례이기 때문에 본 연구와의 직접적인 관련성을 찾기는 어렵다. 그러나 급격한 수입량 증가와 같은 외부적 요인이 없다면 아열대 작물 생산이 이 정도의 면적에 이를 수 있다는 점은 상당한 시사점을 제공한다.

¹⁰ 탄력성은 각 품목군별로 유사한 값을 보이는 경향이 있어 동일 품목군 내의 품목은 그 평균치를 취하여 동일한 값을 가지도록 하였다. 그 수치는 미곡(4.202), 맥류(2.304), 서류(5.000), 잡곡/두류(5.000), 노지채소(2.857), 시설과채(2.500), 과수(2.817), 특용작물(1.818), 화훼/수원지(2.000)이다.

표 5. 신규 관심품목의 식부면적과 가격 동향

	용과		구아바		망고			참다래		
	면적 (ha)	가격 (원/kg)	면적 (ha)	가격 (원/kg)	면적 (ha)	가격 (원/kg)	수입 (톤)	면적 (ha)	가격 (원/kg)	수입 (톤)
2008	10	-	6	-	19	17386	1570	241	2011	29085
2009	6	7651	6	71555	19	17584	904	238	2573	27376
2010	13	10549	4	69167	20	17993	1351	261	3459	28514
2011	5	11014	4	47146	23	20932	1891	258	3650	29757
2012	5	8350	4	37117	26	22058	2839	276	3539	28945
2013	4	9067	3	82998	25	21082	6153	281	3148	20064
2014	4	9364	3	89594	24	23837	10598	312	3717	19590
2015	4	-	4	-	28	-	13469	-	-	23822

자료원: 제주도청 감귤특작과. 가격은 2010년 기준 소비자물가지수를 이용한 실질가격.

<표 5>는 보다 최근 연도의 아열대 과일과 참다래의 식부면적 및 가격 동향을 보여 준다. 용과와 구아바는 식부면적이 망고에 비해 더 적으면서도 정체되거나 줄어드는 모습을 보여준다. 반면 망고는 재배면적이 늘어나고 있는 추세이다. 이미 국내 생산이 정착된 참다래 역시 재배면적이 조금씩 늘고 있다. 망고와 참다래는 수입량 자료까지 보여주는데, 망고는 수입이 크게 늘어나고 있고, 참다래는 국내 재배면적이 늘어나면서 수입량이 줄어드는 모습을 보여준다. 시사적인 것은 참다래가 국내 재배면적이 늘어남에도 불구하고 실질가격 기준의 국내 가격이 눈에 띄게 하락하지는 않는다는 점이다. 이는 망고 역시 마찬가지이다.

이상의 과거 자료, 특히 참다래의 경우를 감안할 때 망고와 같이 국내 시장에서 환영 받는 신규품목의 경우 수입산과 경쟁을 하더라도 약 400ha 정도의 제주도 내 생산은 국내 가격의 큰 하락 없이 이루어질 수 있을 것이라는 추측을 해볼 수 있다. 본고는 이를 참조하여 $x_{k,i}^*$ 의 설정과 관련되어 네 가지 경우를 분석해 보는데, 아열대 과일의 비중 확대라는 측면에서 가장 비관적인 시나리오 1은 그 값이 망고의 경우 200(ha), 용과와 구아바는 100(ha), 참다래의 예를 반영하는 시나리오 2는 각각 400 및 200, 그리고 좀 더 낙관적인 시나리오 3은 1,000 및 500을 가정한다. 마지막으로 국내 시장에서의 선호도가 상대적으로 높은 망고의 경우 가장 유리한 가격반응 조건을 부여할 때 어느 정도까지 생산이 늘어날 수 있는지를 확인하기 위해 시나리오 4는 망고는 3,000, 그리고 나머지 두 품목은 500의 수치를 $x_{k,i}^*$ 에 부여한다.

4. 분석 결과

이상과 같이 구축된 자료를 이용하여 2040년에 제주도가 현재와 동일한 총 식부면적과 가족노동 가용시간을 가진 상태에서 선택할 품목을 분석한다. 우선 아열대 작물 중 우리가 관심을 가지고 있는 망고, 용과, 구아바와 농민들의 선호로 인해 재배면적이 늘어나고 있는 시설감귤, 참다래 그리고 여타 아열대 작물을 다수 포함하고 있는 기타 과일의 재배면적 변화, 가격 변화, 그리고 제주도의 농업 조(粗) 이윤(gross profit=판매 수입-경영비)의 변화를 보면 <표 6>과 같다. <표 6>에서 시나리오 1, 2, 3, 4는 앞 장에서 설명한 바와 같이 망고, 용과, 구아바의 굴절수요의 임계치 수준에 대한 가정을 달리하는 시나리오들이다.

표 6. 기후변화로 인한 주요 아열대 작물의 식부면적 및 가격변화

변수	2012년	시뮬레이션 결과			
		시나리오 1	시나리오 2	시나리오 3	시나리오 4
망고					
면적(ha)	25.6	241.1***	471.6***	1,115.7***	2,287.5
가격(백만 원/ha)	359.2	333.8	336.1	340.9	348.6
용과					
면적(ha)	4.6	106.6***	200	181.2	45.9
가격(백만 원/ha)	276.9	268.9	273.0	273.4	276.1
구아바					
면적(ha)	3.6	101.2***	91.7	19.0	0
가격(백만 원/ha)	170.0	167.8	168.6	169.8	170.1
시설감귤					
면적(ha)	3,557	4,766.4	4,754.2	4,733.4	4,698.4
가격(백만 원/ha)	300.6	266.6	266.9	267.5	268.5
참다래					
면적(ha)	276.3	268.3	265.2	259.8	247.8
가격(백만 원/ha)	50.0	51.0	51.2	51.5	52.2
기타과일					
면적(ha)	237.9	247.4	245.0	240.9	234.5
가격(백만 원/ha)	134.1	132.2	132.7	133.5	134.8
조(粗) 이윤(십억 원)	1,790	2,046	2,103	2,222	2,439

주: ***은 굴절수요곡선에서 임계치 $x_{k,i}^*$ 를 넘어서는($y_{k,i}=1$) 생산이 이루어짐을 의미함.

<표 6>의 분석결과를 보면, 먼저 시나리오 1~4에 있어 품목별 최종 가격 수준은 시나리오 차이에도 불구하고 상당히 유사하다는 것을 알 수 있다. 이는 각 시나리오별로 동일한 기후변화의 경영비 변화효과를 가정하고 있는 상황에서 품목별 생산증대의 한계 편익과 한계 비용이 일치하는 최적화 조건의 특성이 반영되어 나타나는 현상으로 이해된다.

시나리오 1의 경우, 즉 임계치의 값이 망고가 200ha, 구아바와 용과가 100ha인 경우 세 품목 모두 생산이 임계치 $x_{k,i}^*$ 를 넘어선다. 기후변화로 인한 경영비 하락 정도는 큰 반면 가격상승의 부담이 없는 수준에서 생산을 늘릴 수 있는 여지는 작아 가격 하락이 발생하더라도 임계치 이상의 생산이 이루어진다. 현재에도 생산자와 소비자의 수용성이 상대적으로 높은 망고의 경우 임계치를 20% 이상 넘어선 241.1ha의 생산이 이루어진다. 망고에 비해 수용성이 낮은 용과와 구아바는 임계치 100ha를 조금 넘어서는 재배면적 선택이 이루어진다.

$x_{k,i}^*$ 의 값이 망고의 경우 400ha, 구아바와 용과의 경우 200ha인 시나리오 2에서는 망고는 여전히 굴절수요곡선의 2단계까지 생산이 이루어져 가격하락을 감내하고도 생산이 471.6ha까지 늘어난다. 용과는 정확히 임계치인 200ha의 생산이 선택되며, 경영비에서 영농광열비의 비중이 낮아 기후변화와 기온상승의 이득을 상대적으로 적게 보는 구아바는 임계치 이하인 91.7ha의 재배만 이루어진다. 구아바의 경우 별다른 가격상승 없이 생산을 늘릴 수 있는 여지가 시나리오 2에서는 시나리오 1에 비해 더 커지지만, 망고와 용과의 재배면적이 크게 늘어나기 때문에 부존자원 제약에 따라 구아바 재배면적은 오히려 시나리오 1에 비해 더 적다.

시나리오 3에서는 임계치 $x_{k,i}^*$ 의 값이 망고는 1,000ha, 용과와 구아바는 500ha이다. 이 경우에도 망고만 임계치 이상인 1,115.7ha의 생산이 이루어진다. 용과는 시나리오 2의 경우와 가까운 181.2ha의 재배가 이루어지지만, 망고에 재배면적이 더 할당되면서 구아바의 면적은 19.0ha에 그치게 된다.

마지막 시나리오 4에서는 시나리오 3에서의 망고의 임계치만을 세 배로 늘린 3,000ha가 적용된다. 이제는 망고도 임계치 이하인 2,287.5ha만 생산한다. 즉 망고가 별다른 가격상승 없이 계속 공급될 수 있다고 가정해도 최대 2,287.5ha까지만 재배가 될 수 있는 것으로 분석된다. 이 마지막 시나리오에서는 망고 쪽으로 대규모의 재배면적이 할당되기 때문에 기존품목은 물론이고 아열대 작물의 재배면적도 다른 시나리오에 비해 줄어들어 용과는 45.9ha만 재배되고 구아바는 재배가 되지 않게 된다.

망고, 용과, 구아바 외 관심 품목의 재배면적 변화를 보면, 참다래의 경우 앞의 세 가지 작물에 비해 영농광열비의 비중이 높지 않아 이들 품목에 면적을 내어주며 재배

면적이 소폭 감소할 것으로 예상된다. 반면 모든 기타 아열대성 작물들이 포함된 기타 과일의 경우 재배면적이 소폭 증가할 것이다.

특기할만한 변화는 시설감귤의 재배면적 변화이다. 시설감귤은 만감류(천혜향, 한라봉 등)로서 수확기 소비경합 품목의 수가 적고 맛이 좋아 현재에도 재배면적이 늘어나고 있다. 아울러 경영비에서 영농광열비 비중도 높아, 생산량 증가 시 가격하락이 바로 나타난다고 가정할 경우에도 향후 기온상승 시 비용절감에 따른 재배면적 증가가 상당 정도 이루어질 것으로 예상된다. 현재 이미 3,557ha가 재배되고 있어 재배면적 비율이 소폭으로 증가해도 재배면적 자체의 크기변화는 상당한 수준이 된다.

<표 6>의 마지막 행은 제주도에서의 조 이윤(gross profit)의 변화를 보여준다. 조 이윤은 생산량에 따라 결정되는 가격과 기후변화로 인해 발생할 경영비의 변화를 반영하여 계산되는데, 단위면적당 판매수입에서 (자가노임을 제외한) 경영비를 빼준 것에 71개 전체 품목의 작목별 재배면적을 곱하여 합한 것이다. 제주도의 농업부문 전체 조 이윤은 어떤 시나리오하에서도 현재의 1조 7,900억 원 수준에서 2조 원을 넘어서는 수준으로 증가할 것으로 예상된다. 시나리오별 증가율은 순서대로 14.3%, 17.5%, 24.1%, 36.3%로서, 신규 품목에 대한 가격반응이 느슨하다고 가정할수록 이윤 증가율이 높다.

<표 7>은 기후변화의 경영비 영향에 대한 가정을 달리할 경우 발생하는 관심품목인 망고, 용과, 구아바의 재배면적 변화를 보여주는 민감도 분석결과이다. 각 시나리오하에서 예상되는 단위당 비용변화의 절반(=약화)만 나타날 때와 두 배(=강화)가 나타날 때의 결과를 추가하여 보여준다. 비용변화가 클 것으로 가정할수록 재배면적 증가가 크게 나타나지만 구아바의 경우는 망고와 용과의 재배면적이 크게 선택될 경우 재배가 되지 않는 것으로 분석이 된다. 망고의 경우를 보면 큰 가격 상승 없이 생산이 늘어날 수 있는 임계치를 넘어서는 선택이 이루어지는 시나리오 1, 2, 3에서는 경영비 변화폭의 가정을 바꾸어도 재배면적 변화는 비교적 작게 나타나지만, 임계치 내의 선택이 이루어지는 시나리오 4에서는 경영비 변화 가정에 따라 재배면적 선택이 크게 바뀌게 된다. 이러한 민감도 분석결과 역시 생산 증가에 따른 가격반응, 즉 수요 측 요인에 대한 가정이 경영비 변화와 같은 비용 측면의 가정보다도 사실은 더 민감하게 재배면적 결정에 영향을 미침을 확인해준다.

표 7. 주요 아열대 작물의 식부면적 변화: 민감도 분석

품목	시뮬레이션 결과: 면적 (ha)											
	시나리오 1			시나리오 2			시나리오 3			시나리오 4		
	약화	기본	강화	약화	기본	강화	약화	기본	강화	약화	기본	강화
망고	217.2	241.1	282.6	425.4	471.6	553.5	1,000	1,115.7	1310.2	1,049.4	2,287.5	3,361.3
용과	102.0	106.6	115.3	131.7	200	221.4	43.4	181.2	455.8	35.6	45.9	216.0
구아바	51.2	101.2	101.8	22.0	91.7	101.1	0	19.0	0	0	0	0

마지막으로 <표 7>은 71개 전체 품목에 있어 기후변화 후 발생할 재배면적의 변화를 보여준다. 시나리오별로 정도의 차이는 있지만 그 변화 모습은 유사하기 때문에 시나리오 2의 경우에 대해서만 보여주고 있다. 아열대 작물 외의 작물들도 기후변화로 인한 생산성이나 경영비 변화폭, 가격과 경영비의 차이, 즉 순가격 혹은 단위면적당 수익성, 어느 품목군에 속하는지의 여부와 품목군 내에서의 상대적 효율성, 수요의 가격탄력성 등 여러 요소들이 재배면적 변화에 영향을 미친다.

먼저 식량작물의 경우, 작물학 분야 연구와 계량경제분석에서 기후변화로 인해 생산비가 하락하고 경영비가 상승할 것으로 예측된 쌀은 재배면적이 소폭 감소한다. 작물학 연구에서 생산성이 높아질 것으로 예측한 보리류는 반대로 재배면적이 비교적 크게 증가할 것으로 예측된다. 콩의 경우 작물학 연구는 생산성 증대를 예측했고 이를 반영하여 경영비를 조정해주었지만, 재배면적은 넓은 반면 순가격, 즉 가격과 경영비의 차이가 상대적으로 높지 않아 재배면적이 늘어나는 여타 품목에 자원을 내어주며 면적이 오히려 소폭 감소한다. 서류 중 감자류는 소폭 증가하지만 재배면적이 상대적으로 적은 고구마는 감소한다.

노지채소의 경우 봄무나 양배추처럼 재배면적이 소폭 늘어나는 경우도 있지만 대체로 모든 품목의 재배면적이 감소한다. 시설과채류의 경우에도 영농광열비 비중이 매우 높아 기온상승에 따른 비용절감 효과를 많이 받을 시설감귤을 제외하고는 고르게 재배면적이 감소한다. 그러나 제주도에서는 시설채소류의 재배면적이 모두 다 매우 적은 수준이다. 노지과수의 경우 역시 제주도의 노지감귤을 제외하고는 매우 적은 재배면적을 가지는데, 노지감귤은 비율로는 소폭의 면적감소가 있지만 제주도 내 최대면적을 차지하는 작목이라 면적의 절대적 감소폭은 상당히 크다. 마지막으로 제주도 재배면적의 상당한 비중을 차지하는 특용작물, 화훼/수원지의 경우도 골고루 재배면적이 감소한다.

한편, 본고가 사용하는 PMP 모형은 조, 수수, 상추처럼 현재 아예 재배되지 않는 품목도 여건변화 시 재배될 수 있도록 허용하지만, 기온상승의 효과만으로는 그러한 변화가 나타나지 않았다.

표 8. 전체 품목 재배면적 변화: 시나리오 2

품목군	품목	BAU	적응 후	변화율 (%)	품목군	품목	BAU	적응 후	변화율 (%)
미곡	논벼	17	16	-3.0	노지 채소	양파	1252	1225	-2.2
	밭벼	413	408	-1.2		생강	15	15	-2.7
맥류	겉보리	0	0	0		기타채소	3176	2716	-14.5
	쌀보리	536	696	21.6	시설 과채	시설오이	4	4	-12.7
	맥주보리	779	1019	29.8		시설호박	4	3	-14.3
	밀	75	91	30.8		시설참외	0	0	0
	호밀	0	0	0		시설수박	8	8	-6.1
서류	봄감자	1237	1268	2.5		시설토마토	15	14	-8.1
	가을감자	1548	1589	2.6		시설딸기	31	28	-10.9
	시설감자	0	0	0		시설감귤	3557	4754	33.7
	고구마	86	74	-13.5		시설배추	2	2	-4.6
잡곡/두류	조	0	0	0		시설시금치	7	7	-1.0
	수수	0	0	0		시설상추	4	4	-7.1
	옥수수	25	22	-10.2		시설무	2	2	-1.7
	메밀	886	864	-2.5		시설고추	1	1	-5.8
	기타잡곡	2623	2573	-1.9		기타 시설채소	98	91	-7.0
	콩	5732	5266	-8.1	과수	사과	0	0	0
	팥	26	20	-23.8		배	7	7	-6.8
	녹두	213	163	-23.3		복숭아	1	1	-14.1
	기타콩	56	43	-23.7		포도	0	0	0
노지 채소	오이	9	6	-35.0		노지감귤	17767	17187	-3.3
	호박	248	250	0.8		감	92	86	-6.5
	참외	35	34	-2.1		자두	0	0	0
	수박	265	261	-1.3		기타과일	238	245	3.0
	토마토	0	0	0	특용 작물	참깨	644	625	-3.0
	딸기	55	48	-11.9		들깨	4	4	-4.7
	봄배추	273	256	-6.1		땅콩	118	110	-6.6
	가을배추	96	90	-6.1		약용작물	218	209	-4.3
	시금치	122	97	-20.1		기타 특용작물	866	856	-1.2
	상추	0	0	0	화훼/수원지	시설화훼	203	195	-3.8
	양배추	2177	2194	0.8		기타수원지	1299	1172	-9.8
	봄무	1461	1497	2.5	관심 작물	참다래	276.3	265	-4.0
	가을무	90	89	-1.4		망고	25.6	472	1742
	당근	1706	1701	-0.3		구아바	3.6	92	2446
	고추	37	36	-2.6		용과	4.6	200	4248
	마늘	2806	2419	-13.8					
	파	941	828	-12.0	조 이윤(10억원)		1786	2103	17.5

5. 요약 및 결론

재배품목을 바꾸는 것은 생산자가 기후변화에 대응하는 가장 효과적인 방법 중 하나일 것이다. 특히 제주도의 경우 다른 지역과 달리 현재에도 다양한 종류의 아열대성 작물을 생산하고 있고 향후 기온상승이 발생할 경우 그러한 작물들의 비중이 상당히 커질 가능성이 있다. 본고는 따라서 향후 예상되는 기온상승 예측치를 반영하여 제주도의 전체 작목변화를 최적화 모형을 이용해 분석하였다. 분석모형으로는 BAU에서 관측되는 자료와 모형의 해가 일치토록 하는 PMP 기법을 사용하되, 신규로 보급이 확장되는 아열대작물의 경우 도입 초기와 후기의 가격반응이 차등화 되도록 가격을 내생화하는 방안을 모색하고, 굴절수요곡선의 어느 영역에 속할지를 생산자가 스스로 선택토록 하기 위해 혼합정수 비선형계획모형(MINLP)을 PMP 기법과 결합하여 구축하는 방법론상의 새로운 시도를 하였다. 아울러 BAU에서 생산이 되지 않는 품목도 모형에 반영할 수 있도록 생산구조를 다층화하는 방법도 사용하였다.

본고의 시간적 분석 대상인 2040년 실제로 발생할 작목변화는 기온상승률, 기온상승에 따른 경영비 변화, 생산량 변화에 대한 가격반응 등 매우 다양한 요인에 의해 영향을 받아 결정될 것이고, 따라서 본고가 제시하는 분석결과의 불확실성은 높은 편이다. 이러한 한계하에서, 현재 이용가능한 정보를 최대한 활용하여 분석을 행했을 때 다음과 같은 시사점을 얻을 수가 있다.

첫째, 본고의 시뮬레이션에 따르면 망고, 구아바, 용과와 같이 새로 도입·보급되는 아열대과일의 경우 기온상승의 정도나 경영비 변화의 정도와 같은 생산·비용 측면의 요인이 재배면적 변화에 큰 영향을 미치지만, 수요의 가격탄력성과 같은 수요 측 요인이 재배면적 결정에 더 민감한 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 수요나 무역관련 정책의 영향도 향후 재배면적 결정에 중요한 영향을 미칠 것이며, 소비자들의 선호도에 대한 모니터링 역시 필요할 것이다.

둘째, 참다래 등 이미 보급이 이루어진 품목의 과거 사례 등을 감안할 때 망고 등의 품목의 재배면적 확대 여지는 상당히 있는 것으로 보이며, 이 경우 상당한 정도의 농업 부문 수익 증대효과를 거둘 것으로 예상된다.

셋째, 이들 신규 도입 품목들은 기존 품목을 대체할 수가 있지만, 신규 품목 간의 대체관계가 더 클 수도 있어, 모든 신규 품목의 도입과 재배면적 확대가 가능하지는 않을 것으로 보인다. 이들 품목 중에는 특히 망고의 신기후에 대한 적응력과 소비자들의 수용성이 높을 것으로 분석된다.

넷째, 이미 제주도에서 생산이 되고 있는 품목 중 시설감귤의 경우, 소비자의 수용성이 높으면서도 경영비의 영농광열비 비중이 높아 기온상승에 따른 비용절감 효과가 크다. 따라서 향후 상당한 정도의 재배면적 증가가 예상되며, 제주도 전체의 농업부문 수익성 증대에 많은 기여를 할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- 권오상. 2015. “가계동향조사 자료를 이용한 농식품 수요 및 생계비지수 분석.” 「농업경제연구」 제56권 제5호. pp. 1-30.
- 권오상, 강혜정. 2014. “다중 이산-연속선택모형(MDCEV)을 이용한 소비자의 돈육 부위별 수요 함수 분석.” 「농촌경제」 제37권 제4호. pp. 29-50.
- 권오상, 김창길. 2008. “기후변화가 쌀 단수변화에 미치는 영향: 비모수적 및 준모수적 분석.” 「농업경제연구」 제49권 제4호. pp. 45-64.
- 김성용, 김준업, 이용선. 2015. “과일수요의 계절성과 경합성.” 「농촌경제」 제38호 제4호. pp. 1-24.
- 김창길, 정학균, 박지연, 문동현. 2015. 「농업부문 기후변화 적응 수단의 경제적 효과 분석」. 한국 농촌경제연구원.
- 박경원, 권오상. 2011. “동태 실증수리계획법(PMP)을 이용한 기후변화의 경제적 효과 분석: 쌀 생산성 변화를 중심으로.” 「농업경제연구」 제52권 제2호. pp. 51-76.
- 박경원, 권오상, 김광수. 2015. “농업부문모형을 이용한 기후변화의 지역별·품목별 경제적 효과 분석.” 「경제학연구」 제63권 제1호. pp. 61-92.
- 임청룡, 조용빈, 조재환. 2014. “패널자료를 이용한 사과, 배, 감귤, 오렌지 수요체계 분석.” 「식품유통연구」 제31권 제3호. pp. 68-84.
- 조현경, 권오상. 2014. “재배 시기별 기후변수가 논벼의 단위면적당 생산성과 변동성에 미치는 영향 분석.” 「농업경제연구」 제55권 제3호. pp. 115-140.
- 조현경, 조은빛, 권오상, 노재선. 2013. “기후변수와 쌀 생산성: 패널 지역자료를 이용한 준모수적 분석.” 「농업경제연구」 제54권 제3호. pp. 73-96.
- 지성태, 이수환. 2016. “최근 열대과일 수급동향 및 시사점.” 「KREI 현안분석」 제9호.
- 환경부. 2011. 「우리나라 기후변화의 경제학적 분석(II)」.
- Adams, R. M., B. H. Hurd, S. Lenhart and N. Leary. 1998. “Effects of Global Climate Change on Agriculture : An Interpretive Review.” *Climate Research*. vol. 11, pp. 19-30.
- Berry, S. 1994. “Estimating Discrete-Choice Models of Product Differentiation.” *The Rand Journal of Economics*. vol. 25, no. 2, pp. 242-262.
- Blanco, M., R. Cortignani, and S. Severini. 2008. “Evaluating Changes in Cropping Patterns due to the 2003 CAP Reform: An Ex-post Analysis of Different PMP Approaches Considering New Activities.” A paper prepared for the 107th EAAE Seminar, Modeling of Agricultural and Rural Development Policies, Sevilla, Spain.
- Chang, C.-C. 2002. “The Potential Impact of Climate Change on Taiwan’s Agriculture.” *Agricultural Economics*. vol. 27, pp. 51-64.
- Cortignani, R. and S. Severini. 2011. “An Extended PMP Model to Analyze Farmers’ Adoption of Deficit Irrigation under Environmental Payments.” *Spanish Journal of Agricultural Research*. vol. 9, no. 4, pp. 1035-1046.

- Hazell, P. B. R., and Norton, R.D. 1986. *Mathematical Programming for Economic Analysis in Agriculture*, MacMillan Publishing Company.
- Howitt, R. 1995. "Positive Mathematical Programming." *American Journal of Agricultural Economics*. vol. 77, pp. 329-342.
- Nevo, A. 2001. "Measuring Market Power in the RTE Cereal Industry." *Econometrica*. vol. 69, no. 2, pp. 307-342.
- Paris, Q. 2011. *Economic Foundations of Symmetric Programming*, Cambridge University Press.
- Pari, Q. and F. Arfini. 2000. "Frontier Cost Functions, Self-Selection, Price Risk, PMP and Agenda 2000." *Euro tools Working Papers Series*. no. 20.
- Paris, Q. and R. E. Howitt. 1998. "An Analysis of Ill-Posed Production Problems Using Maximum Entropy." *American Journal of Agricultural Economics*. vol. 80, pp. 124-138.
- Reilly, J., F. N. Tubiello, B. McCarl and J. Melillo. 2001. "Impacts of Climate Change and Variability on Agriculture." in *US National Assessment of the Potential Consequences of Climate Variability and Change*, Washington D.C., US Global Change Research Program.
- Röhm, O. and S. Dabbert. 2003. "Integrating Agri-environmental Programs into Regional Production Models: An Extension of Positive Mathematical Programming." *American Journal of Agricultural Economics*. vol. 85, pp. 254-265.

원고 접수일: 2015년 3월 30일

원고 심사일: 2015년 4월 11일

심사 완료일: 2016년 6월 1일
