

# 농업부문모형을 이용한 기후변화의 지역별 · 품목별 경제적 효과 분석\*

박 경 원\*\* · 권 오 상\*\*\* · 김 광 수\*\*\*\*

## 논 문 초 록

본고는 학제적 연구로서, 기후변화로 인한 농업생산성 변화와 생산가변성 변화가 지역별로 어떤 경제적 효과를 유발하는지를 한국형 농업부문모형을 구축해 분석한다. 기존 수리계획모형의 한계를 극복하고자 기준 연도에 있어서는 경제자료와 최적화 모형의 해가 일치하도록 하는 Howitt(1995)의 실증적 수리계획법(PMP)을 적용하되, 시장균형조건을 도입하여 가격변수들을 내생화하며, Dixit(1989)이 제안한 국내산과 수입산 소비재의 불완전대체관계도 모형에 반영한다. 분석결과 2℃의 기온상승에 따른 국내 농업 총생산량 감소는 지역간 그리고 품목간 대체노력으로 인해 물리적 영향 평가 예측치보다는 적을 것으로 보이지만, 세부 품목별 및 지역별로는 상당히 다른 생산효과가 발생할 것으로 예측되어, 향후 품목 및 지역별로 특화된 적응노력이 필요함도 확인된다.

핵심 주제어: 기후변화, 실증적 수리계획법, 농업생산성

경제학문헌목록 주제분류: Q0, Q1, C6

투고 일자: 2014. 2. 18. 심사 및 수정 일자: 2014. 8. 18. 게재 확정 일자: 2014. 9. 2.

\* 본 연구는 농촌진흥청 아젠다 사업(과제번호: PJ009860)의 지원에 의해 수행되었다.

\*\* 제1저자, 서울대학교 농경제사회학부 농업·자원경제학전공 박사과정, e-mail: erfolg28@snu.ac.kr

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

\*\*\*\* 서울대학교 식물생산과학부 작물생명과학전공 조교수 e-mail: luxkwang@snu.ac.kr

## I. 서 론

기후변화가 유발할 사회경제적 효과는 식량생산 손실, 연안부문의 피해, 수자원 감소, 질병이나 사망률 증가, 생태계 교란 등 다양할 것이며, 국가 혹은 지역별로도 그 성격이나 정도 면에서 차이가 있을 것으로 예상된다. 그러한 효과들은 Stern (2007), IPCC (2007), Nordhaus (2008), OECD (2009) 등의 국제기구 혹은 개별 연구자들에 의해 분석되고, 경제적 가치로까지 환산된 바가 있다. 국내에서도 환경부(2011)에 의해 종합적인 피해액 추정작업이 진행된 바가 있다.

식량생산은 그 자체가 기후조건이나 자연환경에 의존하기 때문에 그 어떤 산업분야보다도 기후변화에 의해 영향을 받을 가능성이 크다. 즉 식량부문은 여타부문에 비해서 보다 직접적으로 기후변화의 영향을 받기 때문에 농업생산자와 소비자, 정부, 그리고 해외부문까지 폭넓은 계층이 식량과 관련된 영향을 받게 된다. 따라서 기후변화로 인해 농업부문이 어떤 영향을 어느 정도 받는지를 분석할 수 있는 신뢰도 높은 모형의 개발과 적용은 중요하겠지만, 국내의 경우 현재까지의 분석은 기후변화가 소수 품목의 생산성에 미치는 영향에 관한 자연과학적 분석에 주로 머물고 있고, 종합적인 경제적 효과분석은 불충분한 점이 있다.

식량생산에는 기온, CO<sub>2</sub> 농도, 강수량, 일조시간 등의 변수들이 영향을 미치는 데, 온실가스 농도 증가는 이들 기후변수 모두에 영향을 준다. 기후변화의 농업부문 영향에 관한 연구들은 1차적으로 향후 예상되는 온실가스 농도 증가로 인해 이들 기후변수들이 어떻게 달라질 것이며, 그 결과 주요 품목의 생산성은 어떻게 변할지를 예측한다. 이는 순수하게 자연과학적 연구로서, 예를 들면 쌀의 경우 ORYZA, CERES-Rice 등의 작물 시뮬레이션 모형들이 주로 이용된다. 한국의 경우에도 주로 쌀이나 보리 등을 대상으로 이들 모형이 적용되었고, 그 결과는 예를 들어 환경부(2011)에 정리되어 있다.

기후변화 시나리오에 따른 생산성 변화는 생산자들로 하여금 품목선택이나 생산기술 선택을 바꾸게 할 것이기 때문에 그 자체가 기후변화의 경제적 효과라 보기는 어렵다. 즉 작물 시뮬레이션 결과에 따른 품목별 생산성 변화가 예측 되어도, 그로 인한 경제적 의사결정이 어떻게 달라지는지도 함께 분석될 필요가 있다. 그러한 경제적 반응분석은 크게 연산일반균형(CGE) 모형을 이용하거나, 농업부문모형(agricultural sector model, ASM)을 이용하여 이루어진다.

CGE분석은 예상되는 생산성 변화를 농업생산함수에 반영하여 생산성 변화 때문에 발생하는 경제전체, 혹은 세계전체의 일반균형효과를 분석하며, 투입재와 산출재의 각종 수량은 물론 가격과 소득까지도 모형 내에서 내생적으로 결정되게 한다는 점에 있어 대단히 유용하다. 기후변화 때문에 발생하는 농업생산성 변화를 반영하여 일반균형효과를 분석한 연구로는 해외의 경우 Tsigas et al. (1997), Bosello and Zhang (2005), Calzadilla et al. (2010, 2011), Palatnik et al. (2011), Palatnik and Roson (2008), Willenbockel (2011), Hertel et al. (2010) 등을 들 수 있으며, 한국의 경우에도 권오상·이한빈 (2012, 2013) 등의 연구가 있다. 그러나 국가경제 전체 혹은 세계경제 전체를 다루는 CGE모형에서는 농업부문이 차지하는 비중이 규모면에서 크지 않으며, 무엇보다도 농업품목이나 생산지역의 세분화에 있어 한계가 있는 것이 사실이다. 또한 이상기후에 따른 생산 불안정성과 같은 요인을 반영하는 것이 어렵고, 각 부문별로 사용되는 파라미터 수치의 엄밀성을 확보하는 데에도 어려움이 따르며, 세부 품목별 영향을 동시에 지역별로 파악하는 데도 한계가 있다. 특히 마지막 문제와 관련해서는 지역별로 세분화된 CGE모형의 구축을 위한 지역산업연관표가 활용되어야 하는데, 농업부문 세부 품목별 다지역산업연관표는 이용불가능하고 또한, 농림수산물 전체가 하나의 부문으로 집계되는 등의 자료상 한계가 있다.

농업부문모형 (ASM)은 부분균형모형으로서, 소득이나 비농산물 가격 등과 같은 농업부문 밖에서 형성되는 경제변수에 대해서는 외생적으로 수치를 가정해야만 하는 단점이 있다. 그러나 CGE모형과는 달리 국가전체는 물론 지역별 농업생산조건과 자원부존현황, 다양한 품목특성, 생산조건의 가변성과 같은 영향을 보다 구체적으로 반영할 수 있다는 큰 장점을 가진다. 이 방법은 농업부문의 생산행위를 일종의 수리계획모형으로 설정하고, 모형의 목적함수 값을 극대화하되, 기후변화로 인해 생산성이나 자원부존량이 달라지면 품목 등의 선택과 농업 순이윤과 같은 목적함수 값이 어떻게 달라지는지를 분석한다. 본 연구는 농업부문모형이 가진 이상과 같은 장점을 최대한 살려 CGE분석에서는 행할 수 없는 기후변화의 지역별·품목별 세부 영향을 파악하되, 기존의 농업부문모형이 CGE모형에 비해 가지고 있는 몇 가지 단점은 최대한 완화하는 시도를 한다.

기후변화의 영향 분석에 ASM이 사용된 사례로 해외의 경우 Adams et al. (1998), Reilly et al. (2001), Chang (2002), IPCC (2007), McCarl et al. (2013),

그리고 국내의 경우 박경원·권오상(2011)의 연구가 있다. 이러한 ASM분석은 생산특성을 보다 세밀하게 반영할 수 있다는 장점을 가지긴 하지만, 부분균형모형이라는 한계와 더불어, 해를 찾는 과정이 최적화 과정이기에 최적화 해가 기준연도에 있어서 실제 균형과 일치하지 않는다는 문제가 있다. 이는 최적화 모형의 특성상 구석 해가 자주 선택되고, 따라서 일부 품목만 생산되도록 해가 구해지는 소위 과잉특화 현상 때문에 주로 발생하는데, 이 때문에 기후변화의 영향을 반영한 결과, 생산행위가 달라지도록 해가 구해지면 그 차이가 순전히 기후변화의 효과 때문인지 아니면 모형 자체가 가지고 있는 과잉특화현상 때문에 발생한 것인지 판단하기 어려운 문제가 있다.

과잉특화문제는 Howitt(1995), Paris and Howitt(1998)이 개발한 실증적 수리계획모형(positive mathematical programming, PMP)이 사용되면서 상당부분 해소되었다. 이 방법은 CGE모형에서 사용되는 캘리브레이션 과정처럼 기준 연도에서 실제로 관측되는 경제변수의 값이 모형이 예측하는 값과 완전 일치하도록 하는 장치를 최적화 모형에 포함하는 방법인데, 한국에서는 최초로 박경원·권오상(2011)이 ASM에 반영하여 기후변화 효과분석을 한 바가 있다. 그러나 이들이 수립한 모형은 모든 가격이 외생변수로 결정되어 있는 등, 지나치게 단순하고 현실성이 결여된 한계를 가지고 있다. 따라서 본고는 기존의 ASM이 가지는 그러한 한계를 보완하는 시도를 다음과 같은 몇 가지 방법으로 행한다.

첫째, 본 연구에서는 생산여건변화에도 불구하고 농산물 가격이 불변이라는 비현실적 가정을 제거하기 위해 농산물의 시장균형조건을 도입하여 가격이 내생변수로 결정되도록 한다.

둘째, 한국 농산물 시장에서 큰 비중을 차지하는 수입농산물을 모형에 포함하되, CGE모형에서 아밍톤(Armington)가정에 의해 수입제품과 국산제품의 불완전대체를 허용하듯이 부문모형에서도 수입농산물과 국산농산물 사이의 불완전대체를 반영할 수 있도록 모형을 설정한다.

셋째, 기후변화는 장기적인 생산성 변화를 유발하면서도 기후조건의 불안정성을 증폭시켜 생산성의 가변성을 높이는 경향이 있는 바, 이러한 가변성 때문에 발생하는 추가적인 자원확보의 필요성까지도 모형에 반영하도록 한다.

이상에서 제기된 바와 같이 지역별 세분화된 모형의 캘리브레이션이 가능하도록 PMP기법을 적용하는 것, 최적화 모형이지만 시장균형조건을 반영하는 것, 수입품

과 국산품의 불완전 대체현상을 모형에 반영하는 것, 생산의 가변성 변화를 반영하는 것 등은 본고의 본문에서 인용된 선행연구들에 의해 각각 ASM분석에 활용되기는 했으나, 이들 조건들을 모두 결합하여 반영하는 분석은 아직 발견되지 않고 있으며,<sup>1)</sup> 기후변화의 경제적 효과를 분석하기 위해 적용된 사례 또한 찾을 수가 없다.

본고의 구성은 다음과 같다. 제Ⅱ장은 분석에 적용한 모형에 대하여 설명하고, 제Ⅲ장은 분석에 사용한 자료들을 정리하며, 기후변화가 농업생산성에 미치는 효과가 어느 정도인지를 파악한다. 제Ⅳ장에서는 제Ⅲ장의 논의내용을 반영하여 설정된 시나리오에 따른 농업부문의 영향을 분석한다. 마지막으로 제Ⅴ장은 분석결과를 요약하고 연구의 결론을 제시하도록 한다.

## Ⅱ. 분석모형

소비되는 농산물이  $J$ 가지가 있는데, 각각 국내에서 생산될 수도 있고 수입될 수도 있다고 하자. 이 중 예를 들어 쌀을  $j$ 번째 농산물이라 하면  $Q_{1j}$ 와  $Q_{2j}$ 는 각각 국내산 쌀과 수입산 쌀 소비량이 된다. 본고는 쌀과 사과처럼 품목이 다를 경우 서로의 가격이 소비량에 영향을 미치지 않지만<sup>2)</sup> 동일 품목의 경우 국내산과 수입산의 가격이 서로의 소비량에 영향을 미치되, 국내산과 수입산은 서로 차별되어 완전대체제는 아니라고 가정한다.<sup>3)</sup>

- 
- 1) 부문모형에 시장균형조건을 반영하는 것은 Hazell and Norton(1986) 등의 많은 부문모형들이 이미 행하고 있다. PMP기법은 Howitt(1995) 외에도 Eruygur(2006)와 같은 유럽에서의 적용 예를 찾을 수 있다. 국내산과 수입산의 차별화는 Lehtonen(2001)의 핀란드 모형에서 적용된 바 있다. 기후조건의 불안정성이 부문모형에 적용된 사례는 발견하기 어렵다. 본고는 Park and Kwon(2012)이 개발을 시도한 모형을 보완하였으며, 새로운 작물확분야 연구결과를 반영하여 분석결과를 도출하였다.
  - 2) 품목이 달라  $i \neq j$ 인 경우  $Q_j$ 의 가격이  $Q_i$ 의 소비량에 영향을 미친다고 가정하면 각 품목별 수요함수로부터 계획모형의 목적함수를 도출할 때 적분가능성이 충족되도록 제약을 가해야하는 문제가 발생하여 계획모형에서는 통상적으로 품목간 소비대체를 인정하지 않는다(Hazell and Norton, 1986, p. 168). 본고는 그러나 아래에서 준선형 효용함수를 사용하기 때문에 동일품목 내에서는 수입산과 국내산 사이에 제한적인 대체가 있을 수 있도록 모형을 설정한다.
  - 3) 장기간의 시간이 흐를 경우 국내산과 수입산의 시장차별현상이 해소될 수도 있으나, 한국 농산물시장의 경우 농산물 수입자유화조치가 취해진 후 약 30년이 지났지만 여전히 원산지별 농산물 차별화 현상이 존재하고 있는 상황을 토대로 본고는 시장차별화가 지속된다고 가정한다.

국내 시장에서 거래되는 국산쌀과 수입쌀의 가격을 각각  $p_{1j}$ ,  $p_{2j}$ 라 하고,  $m$ 을 소비자 소득이라 하자.  $Q_0$ 를 쌀을 제외한 여타 소비재에 대한 지출액 자체라 할 때, 소비자들의 효용함수로 Dixit (1989)이 제안한 일종의 준선형 (quasi-linear) 효용함수를 가정하면 아래의 식 (1)과 같은 효용극대화문제가 성립한다.

$$\begin{aligned} \max Q_0 + U(Q_{1j}, Q_{2j}) &= Q_0 + a_{1j}Q_{1j} + a_{2j}Q_{2j} \\ &\quad - \frac{1}{2}(b_{1j}Q_{1j}^2 + b_{2j}Q_{2j}^2 + 2k_jQ_{1j}Q_{2j}) \\ s.t., p_{1j}Q_{1j} + p_{2j}Q_{2j} + Q_0 &= m \end{aligned} \tag{1}$$

위의 효용극대화문제로부터 도출되는 국산쌀( $Q_{1j}$ )과 수입쌀( $Q_{2j}$ )의 역수요함수는 각각 아래의 식 (2)와 같다.<sup>4)</sup>

$$p_{1j} = a_{1j} - b_{1j}Q_{1j} - k_jQ_{2j} \tag{2a}$$

$$p_{2j} = a_{2j} - b_{2j}Q_{2j} - k_jQ_{1j} \tag{2b}$$

위의 역수요함수에서 두 가지 쌀 사이의 대체관계를 나타내는 파라미터  $k_j$ 의 값이 0이면 국산쌀과 수입쌀 간의 대체관계가 없으며,  $k_j = b_{1j} = b_{2j}$ 이면 두 가지 쌀은 완전대체재가 된다. 위와 같은 역수요함수를 모형에 반영하기 위해서는 자료로부터 각 파라미터의 값을 구해내어야 한다. Dixit (1989)은 관측되는 시장균형에서의 각 소비재의 소비량과 가격, 수요의 가격탄력성, 그리고 국내산과 수입산의 대체탄력성 자료만을 가지고 식 (2)의 5가지 파라미터를 모두 구해내는 과정을 보여주었다.<sup>5)</sup> 이렇게 파라미터의 값을 구하면 국산쌀과 수입쌀을 소비하여 얻는 편익  $U(Q_{1j}, Q_{2j})$ 를 구할 수가 있으며,  $c_j$ 를 국산쌀의 단위 생산비,  $p_{2j}$ 를 쌀 수입가격이라 하면, 쌀 소비만으로 인해 발생하는 사회전체의 순편익은  $U(Q_{1j}, Q_{2j}) - c_jQ_{1j}$

본고가 적용하는 시장차별화모형은 Dixit (1989)이 자동차의 생산지별 시장차별화문제를 분석하기 위해 개발한 바가 있다.

4) 식 (2)는 식 (1)의 최적화모형으로부터 도출된다. 준선형 효용함수를 가정함으로써 수요함수가 소득에 의존하지 않게 된다.

5) 수입이 되지 않는 품목의 경우에는 시장균형 생산량, 가격, 수요의 가격탄력성 추정치를 이용해  $a_{1j}$ 와  $b_{1j}$ 만을 도출해 분석에 사용한다.

$-p_{2j}Q_{2j}$ 가 된다.

이제 쌀을 제외한 여타 품목  $Q_0$ 도 세분화하여 총  $J$ 개의 품목으로 구분하고, 경제전체를  $I$ 개의 지역으로 나누며, 지역별 생산기술과 부존자원까지 반영하면 농업 부문의 계획모형은 아래와 같이 설정된다. 단 전국적으로 품목별로 하나의 농산물 시장이 있어 각 지역에서 생산된 농산물이 합해져 하나의 시장균형가격을 형성한다고 가정한다.

$$\begin{aligned}
 \max_{\{x_{ij}\}, \{Q_{2j}\}} \quad & Z = \sum_{j=1}^J [a_{1j}Q_{1j} + a_{2j}Q_{2j} - \frac{1}{2}(b_{1j}Q_{1j}^2 + b_{2j}Q_{2j}^2 + 2k_jQ_{1j}Q_{2j}) \\
 & - \sum_{i=1}^I c_{ij}x_{ij} - p_{2j}Q_{2j}] \\
 \text{s. t.,} \quad & \sum_{i=1}^I x_{ij} = Q_{1j} \text{ for all } j \\
 & \sum_{j=1}^J \theta_{ijk}x_{ij} \leq w_{ik} \text{ for all } i \text{ and } k \text{ (승수 } \mu_{ik}) \\
 & x_{ij} \geq 0 \text{ for all } i \text{ and } j \\
 & Q_{2j} \geq 0 \text{ for all } j.
 \end{aligned} \tag{3}$$

단,  $x_{ij}$  =  $i$  지역  $j$  번째 작물의 생산활동(예: 생산량 혹은 식부면적),

$i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J$

$Q_{2j}$  =  $j$  번째 작물의 수입량,  $j = 1, \dots, J$

$a_{1j}, a_{2j}$  =  $j$  번째 작물의 수요곡선 절편,  $j = 1, \dots, J$

$b_{1j}, b_{2j}$  =  $j$  번째 작물의 수요곡선 기울기,  $j = 1, \dots, J$

$k_j$  =  $j$  번째 작물의 국산-수입산의 대체관계,  $j = 1, \dots, J$

$c_{ij}$  =  $i$  지역의  $j$  번째 활동의 단위당 비용(국산),  $j = 1, \dots, J$

$p_{2j}$  =  $j$  번째 작물의 수입가격,  $j = 1, \dots, J$

$\theta_{ijk}$  =  $i$  번째 지역의  $j$  번째 활동 1단위에 필요한  $k$  자원량,  $i = 1, \dots, I,$

$j = 1, \dots, J, k = 1, \dots, K$

$w_{ik}$  =  $i$  지역의  $k$  번째 자원부존량,  $i = 1, \dots, I, k = 1, \dots, K$

식 (3)의 최적화모형은 경제 내에서 이용가능한 투입요소와 기술조건, 그리고 수

요함수의 특성과 시장균형조건까지 반영하는 모형이지만 그 해가 실제로 관측되는 각 작물의 산출량 및 수입량과 일치한다는 보장은 없다. 실제 산출량과 수입량은 모형에 직접 반영할 수 없는 많은 확률적 요인, 정책의 영향, 그리고 기타 파악이 불가능한 기술적 요인 등에 의해서도 영향을 받기 때문이다. 계획모형의 이러한 특성에도 불구하고 기준연도에서는 모형의 해와 실제 시장균형이 일치하도록 하는 방법이 Howitt(1995)과 Paris and Howitt(1998)이 개발한 PMP방법이다. 본고는 농산물이 국내 생산은 물론 수입도 되고, 국내산과 수입산이 불완전대체되는 경우로 PMP기법을 확대 적용한다.

본고의 PMP모형은 수식 (3)의 해가 실제 관측되는 국내 생산행위  $x_{ij}^0$  및 수입량  $Q_{2j}^0$ 와 반드시 일치하지는 않기 때문에 첫 번째 단계로서 다음의 두 가지 제약식을 모형 (3)에 추가하여 모형의 해가 실제 관측치  $x_{ij}^0$  및  $Q_{2j}^0$ 와 일치하게 한다.<sup>6)</sup>

$$x_{ij} \leq x_{ij}^0 \text{ for all } i \text{ and } j \quad (\text{승수 } \lambda_{1ij}, i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J) \quad (4a)$$

$$Q_{2j} \leq Q_{2j}^0 \text{ for all } j \quad (\text{승수 } \lambda_{2j}, j = 1, \dots, J) \quad (4b)$$

수식 (4)의 캘리브레이션 제약식을 모형 (3)에 추가로 반영할 때의 최적화조건은 다음과 같이 도출된다.

$$a_{1j} - b_{1j}Q_{1j} - kQ_{2j} - c_{ij} - \sum_{k=1}^K \mu_{ik}\theta_{ijk} - \lambda_{1ij} = 0, \quad \lambda_{1ij} \geq 0, \quad \mu_{ik} \geq 0 \quad (5a)$$

$$a_{2j} - b_{2j}Q_{2j} - kQ_{1j} - p_{2j} - \lambda_{2j} = 0, \quad \lambda_{2j} \geq 0 \quad (5b)$$

한편 제약식 (4)는 캘리브레이션 제약을 가하여 모형의 해가 실제 관측치와 일치하도록 하는데, 본 연구의 목적은 기후변화로 인해 기술조건  $\theta_{ijk}$ 나 자원부존량  $w_k$ 가 바뀔 경우 생산량이나 수입량이 얼마나 달라지는지를 분석하는 데에 있다. 모형의 조건이 바뀔 경우에는 생산행위와 수입량이 각각  $x_{ij}^0$  및  $Q_{2j}^0$ 에 머무를 수가 없기 때문에 캘리브레이션 제약을 포함하지 않으면서도 기준연도에 있어 생산행위와

6) PMP모형의 실제 적용에 있어서는 선형 제약식간의 종속관계를 방지하기 위해 실제 관측치보다 미세하게 큰 값을 제약식에 반영한다.



수입량이 각각  $x_{ij}^0$  및  $Q_{2j}^0$  과 일치하도록 하는 메커니즘을 포함하는 또 다른 계획모형이 필요하다. 그러한 대안 모형으로서, 캘리브레이션 제약을 가하지는 않지만 대신 생산비와 수입비용을 모두 수량의 2차함수형태로 설정하는 다음과 같은 목적함수를 사용하는 것을 검토할 수 있다.

$$\begin{aligned} \max_{\{x_{1j}\}, \{Q_{2j}\}} \quad Z = & \sum_{j=1}^J [a_{1j}Q_{1j} + a_{2j}Q_{2j} - \frac{1}{2}(b_{1j}Q_{1j}^2 + b_{2j}Q_{2j}^2 + 2k_jQ_{1j}Q_{2j})] \\ & - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{j'=1}^J d_{1ijj'} x_{ij} x_{ij'} - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^J \sum_{j'=1}^J d_{2jj'} Q_{2j} Q_{2j'} \quad (6) \end{aligned}$$

단,  $d_{1ijj'}$  와  $d_{2jj'}$  은 2차형식의 생산비와 수입비용함수를 만들기 위해 도입된 파라미터

식 (4)의 캘리브레이션 제약은 가하지 않지만 대신 식 (6)으로 식 (3)의 목적함수를 대체하는 계획모형의 최적화조건은 다음과 같다.

$$a_{1j} - b_{1j}Q_{1j} - kQ_{2j} - \sum_{j'=1}^J d_{1ijj'} x_{ij'} - \sum_{k=1}^K \mu_{ik} \theta_{ijk} = 0, \quad \mu_{ik} \geq 0 \quad (7a)$$

$$a_{2j} - b_{2j}Q_{2j} - kQ_{1j} - \sum_{j'}^J d_{2jj'} Q_{2j'} = 0 \quad (7b)$$

따라서 최적화조건 (5)와 (7)을 비교하면, 아래의 식 (8)의 조건이 충족될 때 두 최적화조건이 완전 일치하므로 식 (8)을 충족하게 하면 식 (6)을 목적함수로 하는 계획모형은 캘리브레이션 제약을 명시적으로 포함하지 않아도 실질적으로 그러한 제약을 가하는 모형이 된다는 것을 확인할 수 있다.

$$c_{ij} + \lambda_{1j} = \sum_{j'=1}^J d_{1ijj'} x_{ij'} \quad \text{for all } i \text{ and } j \quad (8a)$$

$$p_{2j} + \lambda_{2j} = \sum_{j'}^J d_{2jj'} Q_{2j'} \quad \text{for all } j \quad (8b)$$

식 (5a)는  $a_{1j} - b_{1j}Q_{1j} - kQ_{2j} = \sum_{k=1}^K \mu_{ik} \theta_{jk} + c_{ij} + \lambda_{1j}$ 을 의미하는데, 좌변은 1단

위 추가 소비로부터 얻는 한계소비편익이기 때문에 최적화 조건이 충족되려면 우변은 ( $i$  지역에서 생산할 때의) 한계생산비가 되어야 한다. 우변에서  $\mu_{ik}$ 는 부존자원의 잠재가격이고, 그 첫 번째 항  $\sum_{k=1}^K \mu_{ik} \theta_{ijk}$ 은  $i$  지역에서  $j$  품목을 하나 더 생산하기 위해 토지 등과 같이 양이 고정된 투입요소들을 사용함으로써 인해 발생하는 생산비이다. 나머지 두 항의 합, 즉  $c_{ij} + \lambda_{1ij}$ 은 생산량 자체에 따라 그 값이 달라지기도 하는 추가적인 (가변) 한계생산비를 나타낸다. 따라서 식 (8a)의 우변  $\sum_{j=1}^J d_{1ijj'} x_{ij'}$ 은  $i$  지역에 있어  $j$  품목 생산의 (가변) 한계생산비이다. 마찬가지로 추론을 적용하면 식 (8b)의 우변  $\sum_{j'}^J d_{2jj'} Q_{2j'}$ 은  $j$  품목을 한 단위 더 수입하기 위해 지불해야 하는 한계수입비용이다.

이제 관계식 (8)로부터 모형이 충족해야 할 총비용함수의 형태를 구체적으로 도출할 수가 있다.  $x_i$ 를  $i$  지역에서 생산되는 모든 작물의  $J$ 차원 벡터라 하고,  $c_i$ 와  $\lambda_{1i}$ 도  $J$ 차원의 벡터라 하자. 그리고 파라미터  $d_{1ijj'}$ 로 구성된  $J \times J$ 행렬을  $D_{1i}$ 라 하면, 관계식 (8a)가 의미하는 바는  $c_i + \lambda_{1i} = D_{1i} x_i^0$ 이다. 따라서 국내 생산에서의 추가변비용은 다음과 같은 다중적분을 통해 도출할 수가 있다.

$$\int_0^{x_i^0} (c_i + \lambda_{1i})' dx_i = \int_0^{x_i^0} x_i' D_{1i}' dx_i = \frac{1}{2} x_i^{0'} D_{1i} x_i^0 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^J \sum_{j'=1}^J d_{1ijj'} x_{ij}^0 x_{ij'}^0 \quad (9)$$

이를 전체 지역에 대해 모두 더하면  $\frac{1}{2} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{j'=1}^J d_{1ijj'} x_{ij} x_{ij'}$ 와 같은 식 (6)의 2차 비용함수가 만들어지며, 마찬가지로의 절차를 식 (8b)에 적용하면 수식 (6)에서의 2차 수입 비용함수  $\frac{1}{2} \sum_{j=1}^J \sum_{j'=1}^J d_{2jj'} Q_{2j} Q_{2j'}$ 도 만들어진다.

이제 수식 (6)은 수식 (4)와 같은 명시적인 제약 없이도 모형의 최적 해가 기준 연도에서의 실제 생산량 및 수입량과 일치되게 하므로, 수식 (6)에 자원의 부존량이나 생산성 혹은 그 가변성이 변할 경우를 적용하여 그로 인해 생산량 및 수입량이 어떻게 변하는지를 시뮬레이션 할 수 있다. 그러나 이 경우 수식 (6)의 목적함수에 포함되는 파라미터  $d_{1ijj'}$  및  $d_{2jj'}$ 로 구성된  $J \times J$ 행렬  $D_{1i}$ 과  $D_2$ 의 원소를 모두 구해야 한다는 문제가 발생한다.  $D_{1i}$  및  $D_2$ 의 원소들은 기준연도에 있어서는 관계식 (8)을 충족해야 하는데, 관계식 (8)은 각 지역별로  $2J$ 개의 방정식으로만 구성되기

때문에 모든  $d_{1ijj'}$  및  $d_{2jj'}$ 를 식별해내는 데 필요한 충분한 정보를 제공하지는 않는다. 따라서 대개의 경우  $D_{1i}$  및  $D_2$ 가 대각행렬임을 가정하여  $j \neq j'$ 일 때  $d_{1ijj'} = d_{2jj'} = 0$  ( $\forall i$ )임을 가정하거나, 아니면 Paris and Howitt (1998)이 제안한 바와 같이 GME (generalized maximum entropy)와 같은 방법을 적용하여 제한된 정보를 최대한 활용하여  $D_{1i}$  및  $D_2$ 의 모든 원소를 식별하려는 시도를 한다.<sup>7)</sup> 본 연구는 전자의 방법을 따르기로 하며, 이 경우 식 (4) 혹은 (5)를 분석하여 얻은 승수  $\lambda_{1ij}$ 와  $\lambda_{2j}$ 를 활용하여 식 (9)를 충족하는  $d_{1ijj'}$  및  $d_{2jj'}$ 들을 식별해낸다.

이상의 PMP모형 분석절차를 정리하면, 1) 수식 (3)에 수식 (4)의 캘리브레이션 제약을 추가한 최적화 모형을 분석하여 승수를 구하고, 2) 승수로부터 목적함수에 들어갈 비용의 2차함수 항을 구하며, 3) 수식 (6)처럼 비용의 2차함수항을 포함하도록 변형된 목적함수를 가지되 캘리브레이션 제약은 가지지 않는 모형을 분석하고, 4) 환경 변화나 정책여건 변화는 이 변형된 모형에 반영하여 그 효과를 도출한다.

마지막으로 위의 PMP모형에 기후변화에 따른 생산의 가변성 변화효과까지 반영하고자 한다. 생산의 가변성은 기술계수  $\theta_{ijk}$ 와 자원부존량  $w_k$ , 단위당 비용  $c_{ij}$  모두에 영향을 미칠 수 있지만, 작물학 분야 연구들이 평균생산성과 생산가변성 모두의 변화를 단위생산성  $\theta_{ijk}$ 의 변화를 통해 제시하기 때문에 본고는 생산 가변성영향은 단위 생산성  $\theta_{ijk}$ 의 변화를 증폭시키는 효과라 간주하며, 그 효과를 최적화 모형에 반영하기 위해 Charnes and Cooper (1959)가 개발한 고전적인 확률제약 (chance-constrained) 방법을 활용한다. 이 경우 수식 (3)에서의 생산성 제약식은 다음과 같이 변형된다.<sup>8)</sup>

$$\Pr\left(\sum_{j=1}^J \theta_{jk} Q_{1j} \leq w_k\right) \geq 1 - \alpha_k \quad (10)$$

위의 식에서  $\alpha_k$ 는 사전에 정해주는 확률로서 보통 10%이거나 그 이하이다. 즉

7) PMP모형의 2차항 식별방법에 관해서는 이 외에도 몇 가지 제안된 방법이 있고, 이에 대해서는 de Frahan et al. (2007)과 Paris (2011) 등이 종합적으로 고찰한 바 있지만, 본고가 사용하는 Howitt (1995)의 방법이 여전히 가장 흔히 사용된다.

8) 이하 도출과정은 Hazell and Norton (1986, pp. 106-108)을 따른 것이다. 도출과정을 단순화하기 위해 전국을 하나의 지역으로 가정하며 따라서  $Q_{1j}$ 가 곧  $x_j$ 가 된다. 이 가정은 식 (13)에서 완화된다.

식 (10) 은 생산활동에 필요한 자원의 양이 이용가능한 자원의 양  $w_k$ 를 넘지 않을 확률이  $1 - \alpha_k$  이상이어야 함을 의미한다. 수식 (10)의 제약을 통상적인 계획모형의 부등식 제약으로 전환하는 절차가 필요한데,  $S_k = \sum_{j=1}^J \theta_{jk} Q_{1j}$ 이라 정의하고,  $\theta_{jk}$ 가 평균이  $\bar{\theta}_{jk}$ 이며, 공분산이  $cov(\theta_{jk}, \theta_{hk})$ 인 정규분포를 따른다고 하자. 표준정규 분포로부터 다음을 만족하는 값  $\Psi$ 을 찾을 수 있다.

$$\Pr[(S_k - E(S_k))/\sigma_{sk} \leq \Psi] = 1 - \alpha_k \quad (11)$$

$$\text{단, } E(S_k) = \sum_{j=1}^J \bar{\theta}_{jk} Q_{1j}, \quad \sigma_{sk} = [\sum_j \sum_h Q_{1j} Q_{1h} cov(\theta_{jk}, \theta_{hk})]^{1/2}$$

식 (10)과 식 (11)을 비교하되,  $cov(\theta_{jk}, \theta_{hk})$ 을 식별하기 위한 정보에 한계가 있으므로 한 단위 생산활동에 필요한 자원의 확률분포는 작물별로 서로 독립이라고 가정하면 다음의 식 (12)가 식 (10)대신 사용되는 제약식으로 도출된다.

$$\sum_{j=1}^J \bar{\theta}_{jk} Q_{1j} + \Psi [\sum_{j=1}^J Q_{1j}^2 var(\theta_{jk})]^{1/2} \leq w_k \quad (12)$$

이상 도출된 모든 제약을 반영하되 다지역 생산시스템을 가정하면, PMP 기법을 이용하여 캘리브레이션 제약 없이도 기준연도의 실제 해를 복원하도록 설계된 최종적인 계획모형은 다음의 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned} \max_{\{x_{ij}\}, \{Q_{2j}\}} \quad Z = & \sum_{j=1}^J [a_{1j} Q_{1j} + a_{2j} Q_{2j} - \frac{1}{2} (b_{1j} Q_{1j}^2 + b_{2j} Q_{2j}^2 + 2k_j Q_{1j} Q_{2j})] \\ & - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{j'=1}^J d_{1ijj'} x_{ij} x_{ij'} - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^J \sum_{j'=1}^J d_{2jj'} Q_{2j} Q_{2j'} \quad (13) \end{aligned}$$

$$\text{s.t.}, \quad \sum_{i=1}^I x_{ij} = Q_{1j} \text{ for all } j$$

$$\sum_{j=1}^J \bar{\theta}_{ijk} x_{ij} + \Psi [\sum_{j=1}^J x_{ij}^2 var(\theta_{ijk})]^{1/2} \leq w_{ik} \text{ for all } i \text{ and } k$$

$$x_{ij} \geq 0 \text{ for all } i \text{ and } j$$

$$Q_{2j} \geq 0 \text{ for all } j.$$

Ⅲ. 분석자료 및 기후변화의 생산성 변화 효과

1. 분석자료

본 연구는 주어진 자원제약과 시장균형조건 아래에서 국내 농업부문의 순잉여를 극대화하는 지역별·품목별 생산량 및 품목별 수입량을 결정한다. 생산지역과 품목은 <Table 1>과 같이 분류하는데, 국내 9개 지역(경기·강원·충북·충남·전북·전남·경북·경남·제주)에서 생산되는 47개 품목을 대상으로 하여 국내에서 생산되는 축산물을 제외한 대부분의 농산물을 포함하도록 한다.

<Table 1> Crops in the Model

Level 1	Level 2	Crop
Food Crops	Rice	Rice
	Barley	Common Barley, Naked Barley, Beer Barley
	Potatoes	White Potatoes, Sweet Potatoes
	Miscellaneous	Corn
	Pulse	Soybeans
Vegetable	Fruit-bearing Vegetables	Water Melons (field/greenhouse), Melons (field/greenhouse), Strawberries (field/greenhouse), Cucumber (field/greenhouse), Pumpkins (field/greenhouse), Tomatoes (field/greenhouse)
	Leafy and Stem Vegetables	Spinach (field/greenhouse), Lettuce (field/greenhouse), Chinese Cabbage (Spring field/fall field/greenhouse), Cabbage
	Root Vegetables	White Radish (Spring field/Fall field/greenhouse), Carrots
	Spice & Culinary Vegetables	Red Peppers (field/greenhouse), Green Onions, Onions, Ginger, Garlic
Fruit	Apples, Asian Pears, Peaches, Grapes, Tangerines, Persimmons, Plums	
Oilseed Crop	Sesame, Peanuts	
Total	47 crops	

먼저 목적함수를 구축함에 있어 파라미터  $a_{1j}$ ,  $b_{1j}$ ,  $a_{2j}$ ,  $b_{2j}$ ,  $k_j$ 의 값을 각 품목에 대해 구해야 한다. 파라미터 추정결과는 [Appendix]에 정리되어 있다. 품목 중 수입이 되지 않거나 미미한 경우에는  $k_j = 0$ 이고, 이 경우에는 수입재의 수요함수

가 존재하지 않고 수입가격만 있을 수 있기 때문에  $b_{2j} = 0$ 가 성립해야 하며,  $a_{2j}$ 가 단위당 수입가격  $p_{2j}$ 가 된다. 또한 이 경우에는 국산 농산물이 국내시장 전체를 차지하기 때문에 국내시장의 수요는 곧 국산 농산물에 대한 수요,  $p_{1j} = a_{1j} - b_{1j}Q_{1j}$ 가 된다. 파라미터  $a_{1j}$ 와  $b_{1j}$ 는 시장균형 수량  $Q_{1j}$ 와 가격  $p_{1j}$ , 그리고 해당 품목의 수요의 가격탄력성 추정치로부터 계산될 수 있다. 이처럼  $k_j = 0$ 인 경우는 쌀보리, 배, 감귤, 감, 참외, 자두처럼 수입량 자체가 거의 0인 품목에서 발생한다. 그리고 본고는 수박처럼 노지재배 수박과 시설재배 수박이 구분되어 있는 경우에는 두 종류의 수박 중 국내시장에서 보다 큰 비중을 차지하는 경우에 수입품과 대체관계를 이룬다고 보았는데, 대부분의 경우 노지재배 보다는 시설재배가 높은 시장점유율을 차지하였다. 따라서 이들 품목의 경우 노지재배 품목은  $k_j = 0$ 의 값을 가지도록 하였다. 다만 배추와 무의 경우는 가을배추와 가을무가 수입품과 대체관계를 이룬다고 가정하였다.

$k_j \neq 0$ 이기 때문에 수입농산물이 국내산 농산물과 소비에 있어 대체관계를 형성하는 경우에는  $a_{1j}$ ,  $b_{1j}$ ,  $a_{2j}$ ,  $b_{2j}$ ,  $k_j$ 의 5가지 파라미터를 모두 구해내야 한다. 총 28개 품목이 이에 해당된다. Dixit(1989)은 1) 국산농산물 (역)수요함수, 2) 수입농산물 (역)수요함수, 3) 수입산과 국내산을 통합하는 수량지수함수를 도출한 후 그로부터 도출되는 가격탄력성, 4) 대체탄력성의 함수식, 5) 국내산과 수입산의 소비비율이 그 가격비율에만 의존한다는 가정을 충족시키기 위한 조건식 등, 총 5가지 조건식을 충족하는 비선형 연립방정식체계를 풀어 위의 5가지 파라미터를 구해내는 방법을 보여주었는데, 본고 역시 그 방법을 사용하였다.<sup>9)</sup>

품목별 수요함수 추정을 위한 품목별 수요의 가격탄력성은 한국농촌경제연구원 의 『농업부문 전망모형 구축 연구(2007)』와 『주요 채소·과일의 수급함수 추정(2000)』을 반영하여 구하였으며, 불완전대체관계를 가정한 품목별 국내산-수입산 대체탄력성은 일반균형분석을 위해 구축된 GTAP(Global Trade Analysis Project) DB 7.1의 자료를 원용하였다.

이어서 가변생산비 및 부존자원관련 제약을 구성하여야 한다. 중간투입재 외의 생산자원으로는 토지와 노동을 사용하였는데, 9개 지역별 자료를 사용하였다. 토지의 경우 토지면적자료를 사용할 경우 품목간 생산대체 가능성을 지정해 주어야 하

9) 본고의 모든 계산과 최적화에는 GAMS 23.7.3을 이용하였다.

는 문제가 있는데, 이는 다분히 자의적으로 이루어질 수가 있기 때문에 토지면적이 아니라 식부면적을 토지부존자원으로 간주하였다. 이렇게 함으로써 원칙적으로는 모든 작물간 대체가 이루어질 수 있음을 가정하였다.

생산성관련 파라미터  $\theta_{ijk}$ 를 구하기 위해서는 단위면적당 생산량자료도 필요하기 때문에 지역별·품목별 단위면적당 생산량, 기준년도의 실제 생산량, 지역별 경지(식부)면적 자료는 『농림수산물통계연보(2010)』를 통해 얻고, 품목별 가격자료는 농촌진흥청의 『농축산물소득자료집(2009)』으로부터 구하였다. 지역별·품목별 생산비용  $c_{ij}$ 는 농촌진흥청의 『지역별 농축산물소득자료(2009)』의 경영비를 이용하였고, 노동생산성의 경우 『지역별 농축산물소득자료(2009)』의 자가노력비와 고용노력비를 이용하여 노동투입시간을 환산하였다. 특정 지역에서 생산되지 않는 품목이라서 단위면적당 생산량, 가격자료, 생산비용, 노동투입 시간 자료를 구할 수 없는 경우는 해당품목을 그 지역에서 생산하는데 불리한 경우라 가정하고, 단위면적당 생산량은 전국평균의 0.9배, 생산비용 및 노동투입 시간은 전국평균의 1.1배를 적용하였다. 마지막으로 품목별 실제 수입량과 수입가격은 ‘농수산물유통공사’에서 제공하는 『농수산물수출수입지원정보(www.kati.net)』의 수출입통계를 반영하였다.

## 2. 기후변화의 생산성 변화 효과

기후변화에 따라 품목별 생산성이 어떻게 달라질지에 대해서는 여러 연구가 있지만 적용된 품목이나 지역측면에서 볼 때 아직도 불충분하며, 연구 간 서로 상이한 결과를 보여주기도 한다. 예를 들면 전 세계를 대상으로 진행된 연구성과를 정리한 Calzadilla et al. (2010)의 논문은 한국과 일본 등에서도 추가적인 기온상승으로 인해 주요 농산물의 생산성이 하락할 것으로 보았지만, 유사한 목적을 가지고 진행된 Hertel et al. (2010)의 연구는 반대로 한국과 일본에서는 다수 품목의 생산성이 기후변화로 인해 증대할 것이라 전망하기도 하였다. 본고는 쌀처럼 국내 연구진에 의해 연구가 진행된 경우에는 이를 반영하며, 국내 연구진의 실증분석이 기후변화의 부정적 영향을 예측하기 때문에 국내 연구성과가 없는 경우에는 해외 연구 중 부정적 영향을 주로 예측하는 Calzadilla et al. (2010)의 전망을 반영하기로 한다.

쌀, 보리와 같은 식량작물에 대한 연구는 국내 연구진에 의해 지역별·작물별로 보다 세분화되어 진행되었기 때문에 그 결과를 활용하는 것이 가능하다. 기후변화

에 따른 쌀의 단위면적당 생산량 변화는 환경부(2011)의 연구를 위해 국립농업과학원의 연구진이 수행한 벼 생육모델(ORYZA2000)을 이용한 작물시뮬레이션 분석결과를 활용하였는데,<sup>10)</sup> 이 중 실제 경작되는 품종을 반영하여 강원지역은 오대벼(조생종), 그 외 모든 지역은 일품벼(중만생종)를 대상으로 기후변화 시나리오 A1B에 따른 1971~2000년의 단위면적당 생산량 평균치대비 2011~2040년의 단위면적당 생산량 평균치 변화율을 적용한다. 겉보리와 쌀보리의 경우 보리 생육모형(CERES-Barley)에 대한 분석결과를 활용하는 것이 가능한데(심교문 외, 2011a, 2011b), 쌀과 마찬가지로 기후변화 시나리오 A1B에 따른 작물별·지역별 시뮬레이션 결과가 세분화되어 있는 장점이 있다. 기후변화 시나리오 A1B에 대하여 생산성 변화는 쌀의 경우 생산성이 저하되는 반면 보리류는 생산성이 향상되는 것으로 나타났다(〈Table 2〉).

〈Table 2〉 The Impacts of Climate Change on Per Acre Crop Productivities (%)

Province	Percentage Difference between the 1971-2000 Average and the 2011-2040 Average			
	Rice <sup>1)</sup>	Common Barley <sup>2)</sup>	Naked Barley <sup>3)</sup>	Beer Barley <sup>4)</sup>
Gyeonggi	-11.47	8	3	6
Gangwon	-6.59	45	36	41
Chungbuk	-7.82	45	36	41
Chungnam	-10.49	8	3	6
Jeonbuk	-7.63	8	3	6
Jeonnam	-7.95	7	3	5
Gyeongbuk	-7.51	8	3	6
Gyeongnam	-7.79	7	3	5
Jeju*	-8.41	7	3	5

Source: Rice<sup>1)</sup>, Ministry of Environment(2011); Common Barley<sup>2)</sup> and Naked Barley<sup>3)</sup>, Shim et al. (2011a, 2011b); Beer Barley<sup>4)</sup>, the mean of Common Barley and Naked Barley.

\*) National averages are applied to Jeju.

10) 쌀의 경우 작물시뮬레이션기법 외에도 관측되는 생산성자료와 기후변수간의 관계를 계량경제모형을 이용해 추정한 권오상·김창길(2008), 김정호(1998), 노재선 외(2012), 남영식 외(2012), 이병훈·문한필(2012), 조현경 외(2013) 등의 연구가 있다. 거의 모든 연구들이 구체적인 시기만 다를뿐 결국에는 기온상승이 쌀의 단수를 하락시킬 것이라는 예측을 하고 있다.



콩의 경우 국내 지역별로 세분화된 연구결과는 부재하나 농촌진흥청(2010)의 연구결과를 활용하였다. 온도변화(1.5℃상승, 3℃상승, 5℃상승)에 따른 신팔달콩과 대원콩의 발육과 수량 변화를 시뮬레이션 하였는데, 기후변화 시나리오 A1B의 온도변화와 가장 유사한 1.5℃상승 했을 때 신팔달콩의 수량변화 결과를 콩과 땅콩에 적용하였다.

그 외 작물의 경우에는 해외 연구결과를 반영하였는데, Calzadilla et al. (2010)은 작물 시뮬레이션 결과를 정리하여 온도변화(2℃상승, 4℃상승)에 대한 한국 및 일본의 C3계, C4계 작물 생산성 변화를 보여주고 있다(〈Table 3〉). 기후변화 시나리오 A1B의 온도변화와 가장 유사한 2℃상승 했을 때의 결과를 적용하되, 본 연구의 대상품목 중 옥수수는 C4계에 속하고, 그 외 다른 작물은 C3계에 속하므로 각각의 단수변화를 적용하였고, 시설작물은 생산기술을 통해 기후변화에 완전 적응할 수 있다고 가정하여 생산성 변화는 없다고 본다.

〈Table 3〉 Productivity Changes in C3 and C4 Crops in Korea and Japan (%)

Temperature Change			
2℃ Increase		4℃ Increase	
C3*	C4**	C3	C4
-10.33	-4.5	-18	-17.83

Source: Calzadilla et al. (2010).

\*) C3 crop includes rice, wheat, vegetables, fruit, nuts, oil seed and other agricultural products.

\*\*) C4 crop includes cereal grains, sugar cane and sugar beet.

이상의 절차를 통해 분석에 적용한 품목별 단위면적당 생산량 변화 예측치는 〈Table 4〉와 같다.

한편, 기후변화와 기상이변 등으로 농업생산의 변동성이 증가할 가능성이 있다. 예를 들면 기상청(2010)은 2010년의 기후를 이상기후로 정의하고, 한파와 폭설 및 이상저온, 일조량부족과 동시에 집중호우 및 태풍(곤파스)으로 인해 연중 농업재해가 발생했음을 지적하였다. 본고는 작물시뮬레이션 기법을 이용해 국내에서는 최초로 기후변화에 따른 향후 벼의 생산가변성 예측치를 도출하였고, 이를 분석에 반영하였다. 본고는 CERES-Rice 모형을 활용하였는데, 기상청에서 제공하는 국가 표

준 기상 시나리오 자료 중 12.5km 공간해상도를 가진 고해상도 RCP 8.5 자료가 현재 및 미래의 기상조건을 대표한다고 가정하고 이충근 외(2012)의 연구처럼 전국의 기상관측소 인근의 53개 지점을 선정하였다. 이들 지점을 대상으로 1979년부터 2100년까지 일별 최고, 최저 기온, 태양복사량 및 강수량 자료를 추출하여 연간 벼 생산성을 추정하고, 생산성이 예측된 지점들을 도별로 구분하여 예측값의 평균값으로 도별 생산성을 추정하였다. 또한, 도별 재배면적을 가중치로 하여 연도별 전국 단위의 생산량을 계산하였다.

〈Table 4〉 Per Acre Productivity Change due to Climate Change (%)

Crops	Change
Rice, Common Barley, Naked Barley, Beer Barley	〈Table 2〉
Soybeans, Peanuts	9.07
White Potatoes, Sweet Potatoes, Water Melons(field), Melons(field), Strawberries(field), Cucumbers(field), Pumpkins(field), Tomatoes(field), Spinach(field), Lettuce(field), Chinese Cabbage(Spring field/fall field), Cabbage, White Radish(Spring field/fall field), Red Peppers(field/greenhouse), Carrots, Green Onions, Onions, Ginger, Garlic, Apples, Asian Pears, Peaches, Grapes, Tangerines, Persimmons, Plums, Sesame	-10.33
Corn	-4.5
Water Melons(greenhouse), Melons(greenhouse), Strawberries(greenhouse), Cucumbers(greenhouse), Pumpkins(greenhouse), Tomatoes(greenhouse), Spinach(greenhouse), Lettuce(greenhouse), Chinese Cabbage(greenhouse), White Radish(greenhouse), Red Peppers(greenhouse)	0
total 47 crops	

이렇게 구축한 연도별 단위면적당 생산량자료를 바탕으로, 매년 전·후 1년을 포함한 단위면적당 생산량의 표준편차를 도출하고 이것의 증가율을 구하여 식 (13)의  $var(\theta_{ijk})$ 에 적용하는 것으로 농업생산의 변동성에 대한 가정을 수립할 수 있다. 표준편차의 1979~2000년 평균 대비 2010~2040년 평균은 약 8% 증가하는 것으로 나타나, 이를 분석에 반영하였다.

IV. 분석결과

먼저 BAU에 있어서는  $\alpha = 0.05$ , 즉  $\Psi = 1.65$ 를 가정하여, 생산에 필요한 부존 자원량이 부족한 현상이 발생할 확률이 5% (20년 빈도) 미만이 되도록 하였다. 앞에서 밝힌 <Table 4>의 품목별 생산성 변화와 함께 표준편차가 약 1.08배로 증가하는 시나리오를 구성하여 새로운 균형이 수립되었다. 농업부문의 효과는 모든 품목의 생산량, 수입량, 가격에 있어 나타나지만, 그 총체적 효과를 살펴보기 위해 국내 생산량지수와 가격지수를 각각  $QI = \frac{\sum_{j=1}^J x_j^1 p_j^0}{\sum_{j=1}^J x_j^0 p_j^0}$  및  $PI = \frac{\sum_{j=1}^J x_j^0 p_j^1}{\sum_{j=1}^J x_j^0 p_j^0}$ 와 같이 구하였다. 그리고 수량지수는 각 지역별로도 구하였다. 여기서  $x_j^0, x_j^1, p_j^0, p_j^1$ 는 각각 BAU 생산량, 시나리오 하의 생산량, BAU 가격, 시나리오 하의 가격을 나타낸다. 또한 동시에 수식 (13)의 목적함수 값  $Z$ 의 변화도 구하였다.

<Table 5> Indices of Domestic Production and Price (%)

	Domestic Production ( <i>QI</i> )	Domestic Price ( <i>PI</i> )
<b>Total</b>	<b>96. 68</b>	<b>106. 95</b>
Gyeonggi	96. 06	
Gangwon	100. 99	
Chungbuk	98. 42	
Chungnam	93. 85	
Jeonbuk	94. 85	
Jeonnam	96. 87	
Gyeongbuk	96. 16	
Gyeongnam	98. 31	
Jeju	98. 35	

먼저 전국의 생산량지수와 가격지수를 보면 생산은 약 3.32%가 감소하고, 가격은 6.95% 상승한다. 3.32%의 생산손실은 작물학 연구들이 예측하는 쌀을 포함한 주요 품목의 단순 생산성 하락수치보다는 낮은 수치인데, 생산자들이 생산성 하락에 반응하여 품목변환 등을 적극적으로 시행하기 때문에 발생한 결과이다. 아울러 국내생산이 감소하면 수입의 증가 등이 발생하지만, 결과적으로 시나리오에서는 가

격지수가 6.95% 상승하여 생산량 감소비율보다 높는데, 이는 소비가 비교적 비탄력적이라는 농산물의 특성을 반영하는 것이다. 이때 수식 (13)의 목적함수 값은 0.12%로 소폭 감소하는데, 이는 수입농산물 때문에 국내생산 감소에도 불구하고 소비자의 소비량은 크게 줄어들지 않는 현상을 반영한 것이라 해석할 수 있다.

이어서 지역별 변화를 살펴보면, 기온상승의 영향 등을 비교적 적게 받는 강원지역은 생산량이 증가하지만, 상대적으로 고온인 다른 모든 지역은 생산량이 감소한다. 즉 기후변화는 지역별로 상이한 생산변화효과를 가져다준다는 것이 보여진다. 생산량지수가 감소하는 폭이 가장 큰 곳은 전통적인 곡창지역이라 할 수 있는 충남과 전북으로서, 각각 6.15%와 5.15%의 생산 감소가 발생한다. 이어서 경기, 경북, 전남, 경남, 제주, 충북의 순으로 높은 생산 감소가 발생한다.

생산량 변화의 지역별 효과를 47개 모든 품목에 대해 살펴보기는 어렵기 때문에 전체 47개 작물을 <Table 1>에서처럼 11개의 품목군으로 분류하여 품목군별 생산량변화와 가격변화를 지역별로 비교·분석하였다. <Table 6>은 따라서 품목군별 국내가격지수와 품목군별·지역별 국내생산량 지수를 보여준다. 모든 품목군에 대하여 국내 가격은 상승하지만, 특히 옥수수인 잡곡의 경우 기준년도에 비해 36%나 증가하고, 생산은 46%가 감소한다. 이는 <Table 4>가 보여주는 바와 같이 옥수수 등의 잡곡의 기후변화에 따른 생산성 손실이 클 뿐 아니라, 기존의 국내 농업에 있어 잡곡생산의 비교열위를 반영하는 현상이다. 유사한 이유로 맥류와 특용작물의 경우도 가격상승률이 높고 생산감소율도 높다.

특히 맥류와 콩의 경우 <Table 4>의 물리적 영향 분석에서는 기후변화로 인해 생산성 자체가 높아질 것으로 분석이 되었지만, <Table 6>에서 그 경제적 효과는 생산이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 이들 품목은 가격과 한계생산비 사이의 격차인 순가격이 상대적으로 낮아 농산물 전체의 생산성 하락이 발생하고 생산 가변성 증대에 따른 토지 요구량이 늘어날 때 이들 품목보다는 쌀이나 과일 및 채소류 등으로 품목전환이 이루어지기 때문에 발생한다.

가장 큰 비중을 차지하는 쌀의 경우 생산감소율은 3% 정도로 낮지만 국내산의 시장점유율이 높고 주식인 관계로 가격은 그보다 높은 13%가 상승한다. 채소류와 과일류의 경우 이미 시설재배의 비중이 높은 관계로 기후변화에 따른 생산감소율이 상대적으로 낮고, 따라서 가격상승률도 상대적으로 낮다.

〈Table 6〉 Indices of Domestic Production and Price by Product Group

		Food Crops					Vegetable				Fruit	Oilseed Crop
		Rice	Barley	Potatoes	Miscellaneous	Pulse	Fruit-bearing Vegetables	Leafy and Stem Vegetables	Root Vegetables	Spice & Culinary Vegetables		
Domestic Price	<b>Total</b>	<b>1.13</b>	<b>1.19</b>	<b>1.06</b>	<b>1.36</b>	<b>1.06</b>	<b>1.02</b>	<b>1.04</b>	<b>1.04</b>	<b>1.04</b>	<b>1.02</b>	<b>1.18</b>
Domestic Production	<b>Total</b>	<b>0.97</b>	<b>0.78</b>	<b>0.96</b>	<b>0.54</b>	<b>0.91</b>	<b>0.98</b>	<b>0.95</b>	<b>0.89</b>	<b>0.96</b>	<b>0.98</b>	<b>0.79</b>
	Gyeonggi	0.94	0.41	0.99	0.01	0.90	0.996	1.03	0.89	0.88	1.01	0.85
	Gangwon	1.05	1.73	1.02	0.79	0.96	0.99	0.96	0.86	0.99	1.00	1.13
	Chungbuk	1.003	1.17	0.99	0.68	0.92	0.999	0.96	0.86	0.88	0.99	0.99
	Chungnam	0.93	0.61	0.93	0.01	0.88	0.98	0.94	0.82	0.84	0.97	0.75
	Jeonbuk	0.96	0.74	0.92	0.01	0.86	0.98	0.94	0.92	0.87	0.95	0.70
	Jeonnam	0.99	0.81	0.99	0.01	0.92	0.96	0.94	0.91	0.98	0.96	0.72
	Gyeongbuk	0.97	0.56	0.94	0.01	0.89	0.97	0.82	0.82	0.92	0.98	0.79
	Gyeongnam	0.97	0.78	0.87	0.01	0.88	0.995	0.94	0.90	1.05	0.96	0.63
	Jeju	0.92	0.87	0.94	0.01	0.91	0.93	1.01	0.93	1.0004	0.99	0.81

본고가 처음으로 분석하여 제시하는 기후변화의 지역별 영향을 보면, 쌀의 경우 전국 생산량은 3% 줄어들지만 상대적으로 고위도 지역인 강원도와 충북은 생산이 늘어나며, 특히 강원도의 생산량이 5% 이상 늘어날 것으로 보인다. 같은 고위도이면서도 대규모 소비처이고 과채류 등의 생산기반이 잘 갖추어진 경기도의 경우 기후변화에 적응하여 보다 고부가가치인 엽채류, 과실류, 과채류 등의 생산을 늘리는 적응과정을 거치기 때문에 쌀의 생산량은 오히려 감소할 것으로 보인다. 쌀은 특히 이미 기온이 높은 제주도에서 8%에 달하는 생산 감소를 보일 것이고, 이상 언급한 외의 지역에서는 전국 평균 정도의 생산량 감소가 예측된다.

전체 생산량이 가장 많이 감소할 것으로 보이는 잡곡 즉 옥수수의 경우 강원 및 충북에서만 생산되고 나머지 지역에서는 거의 생산이 이루어지지 않을 것으로 보인다. 강원도의 경우 상대적 기후조건의 양호함으로 인해 식량작물 중에는 쌀, 맥류와 서류의 생산을 늘리며, 과실류와 특용작물도 늘리거나 현 수준은 유지할 것으로 보여, 전체적으로 기후변화로 인한 이득을 얻는 유일한 지역이 될 것으로 예측된다.

반면 전체 생산량 지수의 하락폭이 가장 큰 충남은 모든 품목에서 생산이 감소할 것으로 보이는데, 쌀은 7%, 잡곡은 거의 전부, 특용작물은 25% 정도의 생산감소가 예상된다. 쌀을 비롯한 농업생산의 비중이 높은 전남과 전북은 유사한 변화 형

태를 보여주는데, 쌀은 전국 평균 정도이거나 그보다 낮은 비율로 감소하지만, 역시 특용작물과 잡곡의 생산감소율이 높다.

경기와 더불어 대량 소비처에 인접하고 과채류 주산지인 경남은 쌀은 전국 평균 정도, 그 외 식량작물은 평균보다도 높은 생산 감소율을 보일 것이지만, 경기도와 마찬가지로 채소류와 과실류에 있어서는 생산 감소가 별로 이루어지지 않거나 일부 늘어나 이들 품목의 생산 비중을 늘리는 반응을 보일 것으로 예상된다.

이미 기온이 높은 제주도의 경우 쌀과 잡곡의 생산량은 크게 줄이고, 대신 경기 및 경남 등과 유사하게 채소류나 과실류의 생산 비중은 늘리는 반응을 할 것으로 보인다.

마지막으로 세부 품목별 생산, 수입 및 가격의 영향은 <Table 7>처럼 전국을 대상으로 정리하였다. 우선 과채류의 경우 노지와 시설에서 동시에 재배되는 품목은 특히 노지의 재배감소율이 크다. 이는 노지재배의 경우 기후변화의 영향을 상대적으로 더 받기 때문인데, 향후 기후조건의 변화로 인해 과채류의 경우 시설재배 비중이 커질 것임을 알 수 있다. 가장 중요한 채소류인 무와 배추의 경우에는 가장 생산비중이 큰 가을무와 가을배추의 영향은 상대적으로 적고 생산비중이 작은 봄무와 봄배추의 생산 감소율이 높다.

파, 양파, 마늘, 생강 등의 양념채소류의 생산량 감소는 미미하게 발생하는 것으로 예상된다. 과수 역시 비교적 적은 생산 감소를 보여주는데, 상대적으로 배와 감의 소비감소율이 높은 편이다.

쌀의 경우 국내 생산 감소율은 3%로 낮지만 수입증가율이 44%로 높은 것은 수입산 쌀의 국내 시장 점유율이 수입규제로 인해 높지 않기 때문이다. 이미 앞에서 살펴본 바와 같이 보리류와 옥수수, 콩 및 서류 등의 국내 생산 감소율이 높고, 그에 따른 수입증가율이 높다. 반면 시설채소나 과일류의 생산 감소율은 높지 않은 것으로 나타나며, 이들 품목의 수입은 국내 생산 감소분을 충당하는 정도로 이루어질 것으로 보인다.

한편 이상의 분석결과는 CGE모형 연구 중 국내 농업에 대한 기후변화 영향을 분석한 가장 세밀한 연구인 권오상·이한빈(2013)의 연구결과와 부분적으로 비교될 수 있다. 이들의 동태 CGE모형은 본고의 경우처럼 특히 쌀의 경우 A1B 시나리오 하의 작물 시뮬레이션 분석 결과를 반영하여 분석을 행하되 농업부문을 12개로 분류하고 본고의 경우와 달리 축산부문을 포함하였다. 분석결과 2050년이 되면 쌀의

경우 생산이 기후변화로 1.04% 감소하고 가격은 11% 증가한다고 보았다. 그리고 쌀 외의 품목의 경우도 직접적인 기후변화의 생산성 손실이 없다고 가정할 경우에도 품목간 대체 등으로 인해 전체적으로 생산이 줄어들어 본고의 경우와 유사한 결과를 보여주었다. 그러나 모형의 특성상 품목구분에 제한이 있고, 지역별 효과분석은 이루어지지 않았으며, 생산 가변성 변화효과도 반영되지 못하였다.

〈Table 7〉 Impacts on each Crop's Production, Import, and Price (%)

	Variables				Variables		
	Domestic Production	Import	Domestic Price		Domestic Production	Import	Domestic Price
Rice	-3.27	44.05	13.12	Lettuce (field)	-6.04		0.91
Common Barley	-15.90	14.59	23.45	Lettuce (greenhouse)	-0.29	3.23	1.85
Naked Barley	-24.71		14.09	Cabbage	-3.04	25.58	16.05
Beer Barley	-17.32	20.07	28.76	White Radish (spring field)	-20.29		2.03
White Potatoes	-3.73	5.74	4.99	White Radish (fall field)	-1.22	12.20	7.06
Sweet Potatoes	-4.09	5.23	7.17	White Radish (greenhouse)	-28.47		3.13
Corn	-46.23	0.40	35.87	Carrots	-2.59	3.60	3.26
Soybeans	-9.41	5.15	5.82	Red Peppers (field)	-17.55		3.86
Water Melons (field)	-8.99		1.53	Red Peppers (greenhouse)	-0.28	1.07	0.71
Water Melons (greenhouse)	-0.69	7.00	4.06	Green Onions	-2.88	5.97	5.19
Melons (field)	-6.97		0.69	Onions	-2.00	6.71	4.58
Melons (greenhouse)	-2.72		0.27	Ginger	-0.84	7.78	4.54
Strawberries (field)	-6.02		0.60	Garlic	-0.77	7.23	5.97
Strawberries (greenhouse)	-0.12	1.89	1.06	Apples	-1.32	5.78	3.74
Cucumber (field)	-7.42		0.74	Asian Pears	-3.04	0.00	1.77
Cucumber (greenhouse)	-0.17	2.05	1.17	Peaches	-0.91	8.21	4.80
Pumpkins (field)	-10.93		1.92	Grapes	-0.82	1.11	1.02
Pumpkins (greenhouse)	-0.50	2.72	1.76	Tangerines	-1.22	n/a	0.30
Tomatoes (field)	n/a		57.42	Persimmons	-5.87	9.888	2.58
Tomatoes (greenhouse)	-0.82	1.44	1.19	Plums	-6.11	n/a	1.04
Chinese Cabbage (spring field)	-12.70		1.64	Sesame	-22.02	26.01	19.21
Chinese Cabbage (fall field)	-1.56	6.02	3.99	Peanuts	-17.56	10.07	11.05
Chinese Cabbage (greenhouse)	-30.27		2.06				
Spinach (field)	-13.80		2.07				
Spinach (greenhouse)	-0.63	7.00	4.02				

\*) n/a means that the figure is almost zero under the new equilibrium. Cells are empty when the BAU imports are zero.

## V. 요약 및 결론

기후변화가 농업부문에 미치는 경제적 영향은 먼저 기후변화가 품목별 생산성 변화에 미치는 물리적 영향을 분석하고, 이어서 그로 인해 발생하는 경제적 효과를 분석하는 절차를 밟아야 한다. 국내 연구의 경우 물리적 영향분석은 쌀 등의 소수 품목에 대해 자연과학적 분석이 이루어졌고, 경제적 효과는 CGE와 같은 일반균형 모형에 의한 분석이 수 차례 진행되었다. CGE모형과 더불어 경제적 효과분석에 유용하게 사용할 수 있는 것이 농업부문모형(ASM)인데, 국내의 경우 아직은 본격적으로 기후변화 효과분석에 도입되지는 못하였다.

농업부문모형은 거시경제변수나 전체 가격지수 등에 대해서는 외부적으로 주어진 것으로 가정할 수밖에 없는 한계가 있지만 대신 품목이나 기술조건, 특히 지역별 영향분석을 정교하게 행할 수 있다는 장점을 가진다. 본고는 부문모형이 가지는 이러한 장점을 살리면서도, 그 단점을 보완하고자 모형에 시장균형조건을 반영하는 방법, 기준 연도에 있어 모형의 해와 실제 균형이 일치하도록 캘리브레이션하는 방법, 수입농산물과 국내농산물의 불완전 대체를 반영하는 방법, 그리고 학제적 연구를 통해 기후변화에 따른 쌀과 같은 주요 품목의 생산가변성 변화를 분석에 반영하는 방법을 모색하였다. 이렇게 수립된 모형을 통해 축산을 제외한 거의 모든 농산물을 포함하는 47개 품목의 지역별 생산량과 가격지수 및 수입량 변화를 기후변화 시나리오 가정하에서 도출하였다.

분석결과 2℃의 기온상승은 생산량지수로 측정할 때 국내 농업생산을 3.32%를 감소시키고, 이로 인해 국내가격지수는 6.95%가 증가할 것으로 예측된다. 이러한 변화는 자연과학분야의 물리적 영향평가가 쌀과 같은 주요 품목의 단수하락으로 예측하는 수치보다는 상당히 작은 수치인데, 이는 기후변화의 효과가 품목별·지역별로 상이하고, 품목별 수요의 탄력성 등도 서로 다른 상황에서 생산자들이 기후변화에 적극적으로 반응하여 품목선택을 능동적으로 바꾸기 때문에 발생하는 현상으로 보인다.

그러나 전체적인 효과는 그러하더라도 품목별 및 지역별 세부효과는 매우 큰 차이를 보인다. 가장 중요성이 높은 쌀의 경우 국내산과 수입산이 현재처럼 차별화가 되는 상황에서는 기후변화가 있어도 3% 정도로 소폭의 생산 감소가 발생할 것이지만, 이로 인해 가격은 13% 정도 상승할 것으로 예측된다. 잡곡류나 서류의 경우



현재에도 수익성이 높지 않고 기후변화에 상대적으로 민감하여 생산이 크게 감소할 수 있으나, 대신 채소류와 과일류의 경우 시설재배의 비중이 커지면서 기후변화에도 불구하고 생산량이 유지될 수 있을 것으로 보인다.

지역별로 보면 강원도나 충북처럼 기온상승의 피해를 상대적으로 덜 받는 지역은 쌀이나 특용작물을 포함하는 다수 품목의 생산량을 늘릴 수 있지만 다른 지역은 생산량이 줄어듦으로 보인다. 경기도나 경남 등 소비지 인근 생산지는 쌀이나 여타 식량작물의 생산은 줄이는 대신 과일 및 채소류의 비중을 높이는 등, 지역별로도 기후변화에 대한 적응형태가 상당히 다르다는 점도 보여 진다.

본고의 농업부문모형은 부문모형이 가진 한계를 완화하는 여러 시도를 반영하고 있지만 비교적 단순한 모형이다. 향후 지역별 토양조건이나 용수가용량 등과 같은 환경변수를 추가하고, 축산을 포함하는 품목의 광역화를 시도하며, 산림이용 등을 포함하는 농업생산 외의 토지이용형태를 반영하는 노력 등을 시도하여 국내 재배환경을 반영하는 보다 정교한 분석을 시도할 가치가 있을 것으로 보이며, 이를 위해서는 무엇보다도 자연과학분야와의 학제적 연구가 강화되어야 할 것으로 보인다.

## ■ 참 고 문 헌

1. 권오상·김창길, “기후변화가 쌀 단수변화에 미치는 영향: 비모수적 및 준모수적 분석,” 『농업경제연구』, 제49권 제4호, 2008, pp.45-64.  
(Translated in English) Kwon, O. and C. Kim, “Climate Change and Rice Productivity: Nonparametric and Semiparametric Analysis,” *Korean Journal of Agricultural Economics*, Vol. 49, No. 4, 2008, pp.45-64.
2. 권오상·이한빈, “기후변화에 따른 농업생산성 변화의 일반균형효과 분석,” 『자원·환경경제연구』, 제21권 제4호, 2012, pp.947-980.  
(Translated in English) Kwon, O. and H. Lee, “Climate Change, Agricultural Productivity, and their General Equilibrium Impacts: A Recursive Dynamic CGE Analysis,” *Environmental and Resource Economics Review*, Vol. 21, No. 4, 2012, pp.947-980.
3. 권오상·이한빈, “기후변화에 따른 글로벌 농업생산성 변화의 경제적 효과 분석,” 『농촌경제』,

제36권 제3호, 2013, pp.1-32.

(Translated in English) Kwon, O. and H. Lee, "The Economic Impacts of Climate Change on Agriculture and Trade Liberalization: A Global CGE Analysis," *Journal of Rural Development*, Vol. 36, No. 3, 2013, pp.1-32.

4. 기상청, 『2010 이상기후 특별보고서』, 2010.

(Translated in English) Korea Meteorological Administration, "2010 Climate Anomalies Report," 2010.

5. 김정호, "쌀 단수의 변동과 전망," 『농촌경제』, 제21권 제1호, 1998, pp.33-44.

(Translated in English) Kim, J., "A Perspective on Rice Productivity," *Journal of Rural Development*, Vol. 21, No. 1, 1998, pp.33-44.

6. 남영식 · 양승룡 · 공용호 · 박호정, "기후변화로 인한 한국 쌀(정곡) 생산 변화에 관한 연구: RCP 8.5 시나리오를 중심으로," 『농업경제연구』, 제53권 제4호, 2012, pp.61-89.

(Translated in English) Nam, Y., S. Yang, Y. Song and H. Park, "Research on the Change of Milled Rice Production under Climate Change in Korea: Based on RCP 8.5," *Korean Journal of Agricultural Economics*, Vol. 53, No. 4, 2012, pp.61-89.

7. 노재선 · 권오상 · 조승현, "기후변수와 쌀 단수간의 인과성 및 이상기후가 쌀 단수에 미치는 영향 분석," 『농업경제연구』, 제53권 제1호, 2012, pp.21-39.

(Translated in English) Roh, J., O. Kwon and S. Cho, "Causality Between Climate Variables and Rice Yields," *Korean Journal of Agricultural Economics*, Vol. 53, No. 1, 2012, pp.21-39.

8. 농림수산식품부, 『농림수산식품통계연보』, 2010.

(Translated in English) Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, "Food, Agriculture, Forestry and Fisheries Statistical Yearbook," 2010

9. 농수산식품수출지원정보, [www.kati.net](http://www.kati.net).

(Translated in English) Korea Agricultural Trade Information (Kati), [www.kati.net](http://www.kati.net).

10. 농촌진흥청, 『2009년도 국가농업 R&D 시험연구사업보고서-Agenda 5. 기후변화대응 미래농업기술 개발』, 2010.

(Translated in English) Rural Development Administration, "2009 National Agricultural R&D Report-Agenda 5. Development of the Future Agricultural Technology for Climate Change," 2010.

11. 농촌진흥청, 『농축산물소득자료집』, 2009.

(Translated in English) Rural Development Administration, "Income Data from Agriculture and Livestock Activities," 2009.

12. 농촌진흥청, 『지역별 농축산물소득자료』, 2009.

(Translated in English) Rural Development Administration, "Regional Income Data from Agriculture and Livestock Activities," 2009.

13. 박경원 · 권오상, "동태 실증수리계획법(PMP)을 이용한 기후변화의 경제적 효과 분석: 쌀 생산성 변화를 중심으로," 『농업경제연구』, 제52권 제2호, 2011, pp.51-76.

(Translated in English) Park, K. and O. Kwon, "Analyzing the Impacts of Climate Change on Korean Agricultural Sector Using a Recursive Positive Mathematical

- Programming Approach,” *Korean Journal of Agricultural Economics*, Vol. 52, No. 2, 2011, pp. 51-76.
14. 심교문 · 민성현 · 이덕배 · 김건엽 · 정현철 · 이슬비 · 강기경, “A1B 기후변화 시나리오가 국내 가을 쌀보리의 잠재수량에 미치는 영향 모사,” 『한국농림기상학회지』, 제13권 제4호, 2011a, pp. 192-203.  
(Translated in English) Shim, K., S. Min, D. Lee, G. Kim, H. Jeong, S. Lee and K. Kang, “Simulation of the Effects of the A1B Climate Change Scenario on the Potential Yield of Winter Naked Barley in Korea,” *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 13, No. 4, 2011a, pp. 192-203.
  15. 심교문 · 이덕배 · 민성현 · 김건엽 · 정현철 · 이슬비 · 강기경, “A1B 기후변화 시나리오에 따른 미래 겉보리 잠재생산성 변화 예측,” 『한국기후변화학회지』, 제2권 제4호, 2011b, pp. 317-331.  
(Translated in English) Shim, K., D. Lee, S. Min, G. Kim, H. Jeong, S. Lee and K. Kang, “Assessing Impacts of Temperature and Carbon Dioxide Based on A1B Climate Change Scenario on Potential Yield of Winter Covered Barley in Korea,” *Climate Change Research*, Vol. 2, No. 4, 2011b, pp. 317-331.
  16. 이병훈 · 문찬필, “공간계량경제 방법론을 이용한 단순반응모형의 예측력에 관한 비교연구,” 『농업경제연구』, 제53권 제3호, 2012, pp. 23-43.  
(Translated in English) Lee, B. and H. Moon, “A Study on Comparison of Forecasting Power in Yield Response Models Using Spatial Econometrics Method,” *Korean Journal of Agricultural Economics*, Vol. 53, No. 3, 2012, pp. 23-43.
  17. 이충근 · 김준환 · 손지영 · 양운호 · 윤영환 · 최경진 · 김광수, “생육모의 연구에 의한 한반도에 서의 기후변화에 따른 벼 생산성 및 적응기술평가,” 『한국농림기상학회지』, 제14권 제4호, 2012, pp. 207-221.  
(Translated in English) Lee, C., J. Kim, J. Shon, W. Yang, Y. Yoon, K. Choi and K. Kim, “Impacts of Climate Change on Rice Production and Adaptation Method in Korea as Evaluated by Simulation Study,” *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 14, No. 4, 2012, pp. 207-221.
  18. 조현경 · 조은빛 · 권오상 · 노재선, “기후변수와 쌀 생산성: 패널 지역자료를 이용한 준모수적 분석,” 『농업경제연구』, 제54권 제3호, 2013, pp. 73-96.  
(Translated in English) Cho, H., E. Cho, O. Kwon and J. Roh, “Climate Variables and Rice Productivity: A Semi-parametric Analysis Using Panel Regional Data,” *Korean Journal of Agricultural Economics*, Vol. 54, No. 3, 2013, pp. 73-96.
  19. 한국농촌경제연구원, 『주요 채소·과일의 수급함수 추정』, 2000.  
(Translated in English) Korea Rural Economic Institute, “Presumed Supply and Demand Function of Major Vegetables and Fruits,” 2000.
  20. 한국농촌경제연구원, 『농업부문 전망모형 구축 연구(1/2차연도)』, 2007.  
(Translated in English) Korea Rural Economic Institute, “A Study on Modelling of the Korea Agricultural Simulation Model,” 2007.
  21. 환경부, 『우리나라 기후변화의 경제학적 분석(II)』, 2011.  
(Translated in English) Ministry of Environment, “Economic Analysis of Climate Change

- in Korea(Ⅱ),” 2011.
22. Adams, R. M., B. H. Hurd, S. Lenhart and N. Leary, “Effects of Global Climate Change on Agriculture : An Interpretive Review,” *Climate Research*, 11, 1998, pp.19-30.
23. Bosello, F. and J. Zhang, “Assessing Climate Change Impacts: Agriculture,” FEEM Working Paper, 2005.
24. Calzadilla, A., K. Rehdanz, R. Betts, P. Falloon, A. Wiltshire, and R. Tol, “Climate Change Impacts on Global Agriculture,” Working paper FNU-185, Kiel Institute for the World Economy, 2010.
25. Calzadilla, A., K. Rehdanz and R. S. J. Tol, “Trade Liberalization and Climate Change: A CGE Analysis of the Impacts on Global Agriculture,” ESRI Working Paper, No. 381, 2011.
26. Chang, C.-C., “The Potential Impact of Climate Change on Taiwan’s Agriculture,” *Agricultural Economics*, 27, 2002, pp.51-64.
27. Charnes, A. and W. W. Cooper, “Chance-Constrained Programming,” *Management Science*, 6, 1959, pp.73-79.
28. de Frahan, B. H., J. Buysse, P. Polome, B. Fernagut, O. Harmignie, L. Lauwers, G. van Huylenbroeck, and J. van Meesel, “Positive Mathematical Programming for Agricultural and Environmental Policy Analysis: Review and Practice,” in A. Weintraub, C. Romero, T. Bjørndal, and R. Epstein, eds., *Handbook of Operations Research in Natural Resources*, Springer, 2007.
29. Dixit, A., “Optimal Trade and Industrial Policies for the US Automobile Industry,” in R. C. Feenstra, ed., *Empirical Methods for International Trade*, MIT Press, 1989.
30. Eruygur, H. O., *Impacts of Policy Changes on Turkish Agriculture: An Optimization Model with Maximum Entropy*, Ph. D. Dissertation, Department of Economics, The Middle East Technical University, 2006.
31. Hazell, P. B. R., and R. D. Norton, *Mathematical Programming for Economic Analysis in Agriculture*, MacMillan Publishing Company, 1986.
32. Hertel, T. W., M. B. Burke, and D. B. Lobell, “The Poverty Implications of Climate-Induced Crop Yield Changes by 2030,” *Global Environmental Change*, 20, 2010, pp.577-585.
33. Howitt, R., “Positive Mathematical Programming,” *American Journal of Agricultural Economics*, 77, 1995, pp.329-342.
34. IPCC, *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change, Forth Assessment Report of the IPCC*, Cambridge University Press, 2007.
35. Lehtonen, H., *Principles, Structure and Application of Dynamic Regional Sector Model of Finnish Agriculture*, Ph. D. Dissertation, Department of Engineering Physics and Mathematics, Helsinki University of Technology, 2001.
36. McCarl, B., M. Musumba, J. B. Smith, P. Kirshen, R. Jones, A. El-Ganzori, M. A. Ali, M. Kotb, I. El-Shinnawy, M. El-Agizy, M. Bayoumi, and R. Hynninen, “Climate Change Vulnerability and Adaptation Strategies in Egypt’s Agricultural Sector,” *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, doi 10.1007/s11027-013-9520-9, 2013.

37. Nordhaus, W., *A Question of Balance: Weighing the Options on Global Warming*, Yale University Press, 2008.
38. OECD, *The Economics of Climate Change Mitigation: Policies and Options for Global Action Beyond 2012*, 2009.
39. Palatnik, R. R. and R. Roson, "Climate Change Assessment and Agriculture in General Equilibrium Models: Alternative Modeling Strategies," Climate Change Modelling and Policies Programme, Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM), 2008.
40. Palatnik, R. R., I. Kan, M. Rapaport-Rom, A. Ghermandi, F. Eboli and M. Shechter, "Land Transformation Analysis and Application," A Paper Presented in the 18th Annual Conference of the European Association of Environmental and Resource Economists in Rome, 2011.
41. Paris, Q., *Economic Foundations of Symmetric Programming*, Cambridge University Press, 2011.
42. Paris, Q. and R. E. Howitt, "An Analysis of Ill-Posed Production Problems Using Maximum Entropy," *American Journal of Agricultural Economics*, 80, 1998, pp.124-138.
43. Park, K.-Y and O. S. Kwon, "Analyzing the Impacts of Agricultural Production Loss and Increased Output Variability due to Climate Change: A Positive Mathematical Programming Model with Risk," A Paper Presented in The 2nd Congress of the East Asian Association of Environmental and Resource Economics, 2-4 Feb., 2012, Bandung, West Java-Indonesia.
44. Reilly, J., F. N. Tubiello, B. McCarl and J. Melillo, "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, 2001.
45. Stern, N., *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge University Press, 2007.
46. Tsigas, M. E., G. B. Frisvold and B. Kuhn, "Climate Change and Agriculture," in Hertel, T. W. (ed.), *Global Trade Analysis: Modeling and Applications*, Cambridge University Press, 1997.
47. Willnbockel, D., "Exploring Food Price Scenarios towards 2030 with a Global Multi-Regional Model," Institute of Development Studies at the University of Sussex, UK, 2011.

[Appendix] Parameters of the Quasi-linear Demand System under the Incomplete Substitution between Domestic Products and Imports

	$a_1$	$a_2$	$b_1$	$b_2$	$k$
Rice	11,786,296	6,517,302	1.5715	1.4432	0.8270
Common Barley	2,393,561	789,680	49.5119	17.6621	8.5241
Naked Barley	1,707,138	3,714,286	5.5388	0	0
Beer Barley	2,448,649	662,068	22.7215	17.0627	3.3812
White Potatoes	1,988,667	2,953,484	1.9903	12.3420	1.9774
Sweet Potatoes	3,156,526	1,713,256	6.1112	899.9044	1.8619
Corn	942,000	616,953	3.5470	0.0530	0.0451
Soybeans	10,591,563	1,686,466	28.5197	0.6666	2.9430
Water Melons (field)	817,830	2,575,686	1.1594	0	0
Water Melons (greenhouse)	6,070,234	17,726,256	7.0917	8611.0420	18.8550
Melons (field)	2,285,800	2,285,800	75.2353	0	0
Melons (greenhouse)	2,285,800	2,285,800	0.9877	0	0
Strawberries (field)	2,979,900	1,617,627	94.8197	0	0
Strawberries (greenhouse)	48,542,988	17,793,851	220.2463	220.9902	76.4513
Cucumber (field)	902,000	455,853	2.0273	0	0
Cucumber (greenhouse)	13,266,000	5,014,388	41.5729	18.8463	14.8681
Pumpkins (field)	1,489,200	629,898	1.5830	0	0
Pumpkins (greenhouse)	7,446,000	3,779,388	36.8561	29.6875	16.6519
Tomatoes (field)	2,396,860	1,165,763	152.1196	0	0
Tomatoes (greenhouse)	4,132,517	3,175,700	7.5141	19.0468	3.9049
Chinese Cabbage (spring field)	272,089	209,796	0.0391	0	0
Chinese Cabbage (fall field)	819,744	747,733	0.3975	994.9566	0.2882
Chinese Cabbage (greenhouse)	237,120	209,796	0.2448	0	0
Spinach (field)	2,160,850	578,992	7.0598	0	0
Spinach (greenhouse)	11,216,344	4,438,953	179.0514	577.3569	65.2464
Lettuce (field)	2,068,850	835,868	16.2316	0	0
Lettuce (greenhouse)	13,792,345	6,408,350	105.6959	556.8022	45.2205
Cabbage	1,740,336	15,373,856	4.6696	1731.5406	37.9312
White Radish (spring field)	289,300	437,166	0.0555	0	0
White Radish (fall field)	1,916,667	3,351,604	2.7892	58.4205	4.4876
White Radish (greenhouse)	314,130	437,166	0.2330	0	0
Carrots	3,920,636	2,559,345	23.6125	11.6016	12.8546
Red Peppers (field)	4,293,180	551,726	6.7670	0	0
Red Peppers (greenhouse)	19,514,453	3,059,573	69.2792	3.3789	9.4785
Green Onions	2,493,292	21,249,065	4.2997	2199.6943	28.5188
Onions	1,361,871	1,257,756	0.7021	7.8998	0.5066
Ginger	47,981,765	5,604,446	2598.3496	54.7194	291.5922
Garlic	24,213,380	8,622,136	62.2769	16.8249	21.3336
Apples	8,836,118	5,760,705	13.3122	125.8983	7.1151
Asian Pears	2,474,280	1,405,948	2.3365	0	0
Peaches	15,182,468	8,408,804	66.1669	184.9194	33.3347
Grapes	12,264,000	4,647,746	21.0826	23.7894	4.7311
Tangerines	4,906,250	28,200,000	1.3034	0	0
Persimmons	2,400,480	2,111,137	1.8235	0	0
Plums	2,872,350	33,500,000	6.7108	0	0
Sesame	59,384,623	6,051,339	2405.0302	28.3773	195.8782
Peanuts	11,902,348	4,882,594	447.6381	69.7834	133.7165

Source: Own calculation.

# The Regional Impacts of Climate Change on Korean Agriculture: A Positive Mathematical Programming Approach\*

Kyungwon Park\*\* · Oh-Sang Kwon\*\*\* · Kwang Soo Kim\*\*\*\*

## Abstract

The purpose of this interdisciplinary study is to evaluate the regional impacts of agricultural productivity change and the growing instability of agricultural production using a Korean agricultural sector model. We apply the positive mathematical programming (PMP) approach of Howitt (1995), which has a built-in process of keeping the consistency between its model solutions and the observed data. Moreover, our study makes output prices endogenous by incorporating market equilibrium conditions into the programming model, and allows imperfect substitution between imported and domestic foods following the specification of Dixit (1989). This study finds that substantial regional and commodity substitution will occur in response to climate change, and hence, emphasizes the importance of regional and commodity specific adaption measures.

**Key Words:** climate change, positive mathematical programming (PMP), agricultural productivity

**JEL Classification:** Q0, Q1, C6

---

*Received: Feb. 18, 2014. Revised: Aug. 18, 2014. Accepted: Sept. 2, 2014.*

\* This work was carried out with the support of Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. PJ009860), Rural Development Administration, Republic of Korea.

\*\* First Author, Ph.D. Student, Department of Agricultural Economics and Rural Development, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-921, Korea, Phone: +82-2-880-4711, e-mail: erfolg28@snu.ac.kr

\*\*\* Corresponding Author, Professor, Department of Agricultural Economics and Rural Development, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-921, Korea, Phone: +82-2-880-4728, e-mail: kohsang@snu.ac.kr

\*\*\*\* Assistant Professor, Department of Plant Science, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-921, Korea, Phone: +82-2-880-4546, e-mail: luxkwang@snu.ac.kr