

상·하향 통합모형을 활용한 농업 수자원 부족의 경제적 효과 분석

이승호 · 권오상* · 강성원**

서울대학교 농경제사회학부 박사과정

*서울대학교 농경제사회학부 교수 겸 농업생명과학연구원 겸무원연구원

**한국환경정책평가연구원 선임연구위원

Economic Impacts of Agricultural Water Shortages in Korea - A Combined Top-down and Bottom-up Model Analysis -

Lee, Seung-Ho · Kwon, Oh-Sang* · Kang, Sung-Won**

Ph. D. Student, Department. of Agricultural Economics and Rural Development, Seoul National University

**Professor, Department. of Agricultural Economics and Rural Development, Seoul National University*

***Senior Research Fellow, Korea Environment Institute*

ABSTRACT : This study analyzes the impacts of agricultural water shortages in Korea using a combined top-down and bottom-up model. A multi-region multi-output agricultural sector model with detailed descriptions of production technologies and water and land resource constraints has been combined with a standard CGE model. The impacts of four different water shortage scenarios were simulated. It is shown that an active adaptation of crop choices occurs in even the regions with relatively abundant water resources in order to respond to the change in relative output prices caused by water shortages. We found that although the losses in production values are not quite large despite water shortages due to the price feedbacks, the loss in GDP is substantial. We show that our combined approach has advantages in deriving region and product specific production effects as well as the overall GDP loss effect of water shortages.

Key words : Combined Top-down and Bottom-up Model, Water Resource Shortages, Agricultural Sector

1. 서 론

최근 봄철 가뭄이 심하게 발생함에 따라 수자원 부족으로 인한 어려움이 경제 전반에 걸쳐 나타났다. 우리나라의 봄철 수자원 부족 현상은 건조한 겨울과 봄의 특성상 일반적으로 나타나는 현상이지만, 최근의 가뭄은 그 정도가 보다 심해져 수자원의 적기활용에 어려움을 겪고 있다. 이러한 건기의 수자원 부족 현상은 이후 기후변화 등의 영향으로 보다 심해질 것으로 일부 학자들이 예상하기도 하였으며(Bates et al., 2008; Sheffield and Wood,

2008), 연중 강수량 자체는 증가할 수 있지만 월별 편차는 더 커질 전망이다. 때문에 수자원 수급 환경 변화에 따른 영향을 예측하고 평가하는 것은 수자원 수급 계획 및 정책관련 분석으로서 중요도를 가진다.

특히 농업부문에서 봄철은 대부분 작물의 파종과 이식이 이루어지는 시기이며, 작물 생장의 초기단계로서 이 시기의 안정적인 기후여건과 물의 공급은 이후 생장에 중요한 영향을 미친다. 여전히 국내 농업 재배면적의 절반 가까이를 차지하는 쌀의 경우 4-5월은 모내기과 논에 물대기 작업이 이루어지는 시기이고, 다른 작물들도 이 시기에 수자원이 충분히 공급되지 못할 경우 파종·이식 시기가 늦어져 최적기에 생장이 이루어지지 못하거나 이미 파종·이식된 작물의 생장에 부정적 영향을 미칠 수 있다. 따라서 봄철의 수자원 부족 현상이 장기화되고 고

Corresponding author : Kwon, Oh-Sang

Tel : 02-880-4728

E-mail : kohsang@snu.ac.kr

착화될 경우 환경 변화에 맞게 농업 생산자들의 생산 선택이 달라질 수 있으며, 그 파급효과는 경제 전반에 걸쳐 나타날 수 있다.

기존의 농업부문 수자원 부족 문제는 가뭄과 연계된 자연재해의 한 부분으로 인식되었으나, 최근 기후변화의 실제적인 영향으로 지역의 강수 패턴이 변화하고 그에 따라 수자원 상황에도 변화가 나타나면서 단순한 피해 계측 중심의 연구에서 수자원 부족이 농업과 경제 전반에 미치는 영향에 대한 연구로 연구 범위가 확장되고 있는 추세이다. 해외에서 수자원 변화가 농업부문에 미치는 영향을 지속적으로 연구하고 있는 대표적인 곳은 미국 캘리포니아 주이다(Howitt et al. 2012, 2015; Cooley et al. 2015). 전형적인 건조기후 특성이 나타나는 캘리포니아 지역은 쌀과 더불어 과수, 채소, 낙농 등의 고부가가치 농업이 대규모로 이루어지면서도 상시적인 수자원 부족 문제를 겪고 있어 그에 따른 경제적 효과 분석이 활발히 이루어지고 있다. Howitt et al.(2015)은 2015년 캘리포니아 지역에 나타난 가뭄으로 인한 수자원 변화와 이를 기초로 추정된 2016년, 2017년의 수자원 변화를 캘리포니아 지역 농업 모형인 SWAP(Statewide Agriculture Production) 모형과 다지역 CGE 모형의 하나인 IMPLAN(Impact for Planning) 모형에 적용하여 농업 품목별 생산 및 이윤 변화, 고용 변화 등 수자원 변화에 따른 경제적 효과를 분석하였다. 이외에도 인도와 아프리카 등 비슷한 문제가 발생하고 있는 여러 지역에서 가뭄으로 인한 수자원 부족과 그에 따른 농업 생산성 변화, 경제적 효과에 대한 연구가 다수 이루어지고 있다(Boubacar, 2010; Nath et al., 2016).

수자원 변화에 따른 농업부문의 영향을 분석한 국내 연구는 주로 가뭄과 함께 고려되는 경우가 많으며, 경제적 영향을 평가하기보다는 가뭄 피해현황 및 대처방안, 수자원 관리 방안 등 정성적인 측면 중심으로 이루어져 왔다(이응구, 2015; 한국농어촌공사, 2016). 가뭄의 피해 규모 산정에 대한 연구로 서순석 외(2009)는 건설교통부의 피해액 산정식에 근거하여 쌀에 대한 농업용수 부족의 피해액을 계산하였고, 채광석 외(2016)는 기후변수를 고려한 회귀식을 통해 가뭄이 쌀 단수에 미치는 영향을 추정하고 이를 근거로 쌀의 가뭄피해액을 계산하였다. 두 연구는 가뭄으로 인한 농업부문의 직접적인 피해를 계측했다는 점에서 의미가 있지만, 품목이 쌀에 한정되어 있고, 기본적으로 갑자기 닥친 가뭄에 대한 단기적, 수동적 대응에 대한 결과로서 장기적인 수자원 감소 현상이나 그에 대한 생산자의 반응 등은 고려되고 있지 않다. 아울러 피해액 계측에 있어서도 대규모 생산량 변화에 의해 나타날 수 있는 시장가격 변화 등은 반영하지

않은 한계가 따른다.

한편 권오상 외(2009)는 수자원 변화의 확률적 영향을 반영한 국가 전체 농업부문에 대한 상향식 모형을 개발하여 농업용수 부족량 감소에 따른 농업부문 이윤 변화를 파악하고 이를 기초로 농업용수의 경제적 가치를 평가하였다. 따라서 이 연구는 생산자들이 수자원 부족량 변화에 적응하는 과정을 명시적으로 반영하여 농업부문에 미치는 영향을 평가하였다는 점에서 여타 연구와 차별화가 되지만, 생산량변화에 의한 가격변화의 피드백 효과를 반영하지 않았으며, 가뭄이 비농업부문에 미치는 파급효과도 반영하지 않았다는 부분균형분석의 한계를 가지고 있다. 아울러 수자원 부족량을 연단위로 파악하여 농업용수 수요의 계절적 특성이 반영되지 못하였으며, 최적화 모형의 특성상 나타날 수밖에 없는 생산선택이 특정 품목에 집중되는 소위 과잉특화현상에 대한 고려도 이루어지지 않았다.

본고는 기존 연구들이 가지는 이러한 한계를 극복할 수 있는 모형의 개발과 분석을 통해 농업부문의 수자원, 특히 봄철의 수자원 부족이 고착화될 경우 발생하는 농업부문과 국가경제 전체의 경제적 영향을 분석하고자 한다. 본 연구는 서순석 외(2009), 채광석 외(2016) 등의 연구와 달리 장기적으로 수자원 부족이 고착화된 상태에 대한 생산자의 반응과 그 영향을 도출한다. 아울러 권오상 외(2009)에 반영되지 않은 생산량 변화에 따른 가격변화의 영향과 함께 농업부문이 농업 외 부문과 서로 연계되어 투입요소와 산출물을 주고받는 효과까지도 함께 분석하며, 생산자는 물론 소비자들이 얻게 되는 후생효과까지도 동시에 분석을 시행한다.

이러한 종합적 분석을 시행하기 위해 본고는 농업부문 상향식 모형과 하향식 모형을 연계한 통합모형을 활용한다. 국가경제 전반에 대한 일반균형모형인 하향식 모형은 정책 효과 분석에 다수 활용되지만 미시적인 단위의 세부적인 변수에 대한 분석에는 한계가 있으며, 상향식 모형은 부분균형모형의 한계로 인해 경제적 영향 분석에 상대적인 약점을 가지고 있다. 두 모형을 연계한 통합모형은 각 모형의 한계점을 보완하게 되며, 보다 세부적인 정책변수의 경제적 영향을 평가할 수 있다는 면에서 강점을 가진다.

상·하향 통합모형은 에너지 부문의 세밀한 특성반영을 위해 주로 개발되었지만(Böhringer and Rutherford, 2009), 국내외에 있어 아직 농업 수자원 변화의 영향을 위한 분석에 사용된 바가 없고, 그러한 분석을 할 수 있도록 모형이 구축된 바도 없다. 본고는 농업부문의 수자원 수요와 지역별 수자원 공급량을 명시적으로 고려하고, 한국 농업의 지역별 생산구조까지도 반영하는 비교적 정교한

농업부문 상향식 모형을 개발하여 이를 하향식 모형과 연계시켜 연구목적을 달성하고자 한다.

II. 모형과 자료구축¹⁾

2.1 하향식 모형

본고에서 활용하는 하향식 모형은 일반균형모형 (general equilibrium model)의 형태로 구성된 비교적 표준적인 1국가 정태 CGE 모형이라 할 수 있으며, 전체 산업은 13개의 세부 농업부문을 포함하여 총 53개로 구성되어 있다. 농업부문은 쌀, 맥류/잡곡, 콩류, 감자류, 채소, 과일, 기타농산물의 경종 8개 품목, 낙농, 한육우, 양돈, 가금, 기타축산의 축산 5개 품목으로 구분하였다.

본고의 하향식 모형에 적용된 생산함수는 네스팅 (nesting) 구조를 가지는 CES(constant elasticity of substitution) 함수이며, 에너지를 여타 중간재로부터 분리하여 부가가치와 결합시킨 에너지-부가가치 복합재를 하나의 네스트로 가지는 특징을 가지고 있다. 에너지-부가가치 복합재는 에너지 복합재와 부가가치 복합재의 CES 결합으로 나타난다. 부가가치 복합재는 노동과 자본의 콥-더글라스(Cobb-Douglas) 결합 형태이며, 에너지 복합재는 석탄, 액체화석연료를 포함하는 화석연료 복합재와 전력의 콥-더글라스 결합을 통해 생산된다.²⁾

해외 부분의 경우 수입은 국내에 수입품을 판매함을 통해, 지출은 국내의 수출품을 구매함을 통해 나타난다. 해외에서 수입된 상품은 국내 상품과 CES결합을 통해 만들어지는 아밍턴(Armington) 복합재 형태로 국내에서 소비되며, 국내생산자는 생산선택 시 수출로 인해 발생하는 이윤을 함께 고려하는 CET(constant elasticity of transformation) 함수 형태로부터 수출량을 결정한다. 해외 저축은 해외 부분의 수입에서 지출을 뺀 값을 의미하며, 환율로 조정된 값을 활용해 국내외 무역액의 균형을 맞추는 모형 마감(closure)이 이루어진다.

정부는 각 경제주체로부터 걷은 세금을 소득으로 하며, 정부 소비 및 이전 지출을 통해 지출이 발생하고, 정부 저축을 통해 총 세수와 정부 지출의 균형을 달성한다. 저축 및 투자 부분에서는 각 경제주체로부터 발생한 총 저축을 통해 투자가 발생하며, 총 저축 수준에 맞게 총 투자 규모가 조정됨에 따라 저축과 투자 간의 균형이 이루어진다.

가계 부문은 생산요소 공급에 따른 요소소득과 정부가 지급하는 이전소득을 통해 수입을 얻는다. 가계의 효용함수는 로그 효용함수 형태이며, 주어진 소득에서 소

득세를 제외한 가처분소득을 가지고 효용을 극대화하는 방식으로 소비와 저축이 이루어진다. 한편 가계 자본소득의 일부는 자본의 감가상각에 대한 비용으로 강제적으로 저축으로 분리된다.

하향식 모형의 입력자료로 사용되는 SAM (social accounting matrix)은 가장 최근의 실측 산업연관표인 2010년 기초가격 기준의 기본부문 산업연관표 총거래표를 기본자료로 하여 구축하였다.

2.2 상향식 모형

상향식 모형은 특정 부문에서 이루어지는 생산 과정을 투입부터 산출까지 생산기술 단위로 자세히 묘사하는 부분균형모형이다. 상향식 모형을 농업부문에 활용한 국내 연구로는 기후변화가 품목별로 미친 영향을 분석한 박경원·권오상(2011), 박경원 외(2014), 수자원부존량 변화를 분석한 권오상 외(2009), 그리고 제주도라는 지역단위의 최적 의사결정모형인 권오상 외(2016) 등의 연구가 있다.

본고의 농업부문 상향식 모형은 13가지 농산물이 9개의 지역에서 생산되는 구조를 가지고 있다. 각 품목별로 국가 전체의 시장이 형성되어 있어, 9개 지역의 산출물이 합쳐져 품목별 총 공급량을 형성하고, 여기에 소비자의 시장수요가 결합되어 시장 균형이 형성된다. 본고의 상향식 모형은 수식 (1)과 같이 13가지 농산물 시장에서 형성되는 생산자 잉여와 소비자 잉여의 합을 극대화하는 것을 목적식으로 가지는 최적화 모형으로 구성되었다. 여기에 노동과 함께 토지와 수자원의 지역별, 월별 이용가능량이 제약조건으로 모형에 포함되고, 해당 자원의 단위 생산량 당 수요량이 지역별, 월별로 제약식에 반영된다. 그리고 비료, 농약, 사료 등의 중간투입재 이용에 따른 비용, 즉 가변비용도 모형에 반영된다.

$$\begin{aligned} \max_{\{q_i\}} & \sum_i \bar{P}_i Q_i \left[1 - \frac{Q_i - 2\bar{Q}_i}{2\epsilon_i \bar{Q}_i} \right] - \sum_i C_i(Q_i) \quad (1) \\ \text{s.t.}, & Q_i = \sum_r q_i^r, \quad q_i^r \geq 0, \quad r = 1, \dots, R_i, \quad i = 1, \dots, I \\ & C_i(Q_i) = \sum_r c_i^r q_i^r, \quad c_i^r = \sum_m P_m \theta_{im}^r, \quad m = 1, \dots, M \\ & \sum_i \alpha_{ij}^r q_i^r \leq \beta_j^r, \quad j = 1, \dots, J \end{aligned}$$

i 는 품목, r 은 생산지역, m 은 생산에 사용된 중간투입재, j 는 부존자원의 종류를 나타내는 지수이다. 품목 i 의 국가 전체 공급량 Q_i 는 각 지역에서의 생산량 q_i^r 의 합이다. 상향식 모형에 적용되는 수요곡선의 구성을 위해서

는 기준이 되는 가격과 산출량이 필요하며, 가격과 산출량이 각각 \bar{P}_i 와 \bar{Q}_i 로 주어질 때, 상향식 모형의 수요곡선은 (\bar{P}_i, \bar{Q}_i) 를 지나가는 직선이라 가정한다. 이렇게 구성된 수요곡선에 품목 i 에 대한 수요의 가격탄력성 ϵ_i 을 적용할 경우 수식 (1)의 목적함수에서 $\bar{P}_i Q_i \left[1 - \frac{Q_i - 2\bar{Q}_i}{2\epsilon_i \bar{Q}_i} \right]$ 는 새로운 공급량으로 Q_i 를 선택할 때의 수요곡선 이하 면적이 된다(Hazell and Norton, 1986). 또한 목적함수에서 함수 $C_i(Q_i)$ 는 품목별 가변비용함수를 의미하기 때문에 결국 수식 (1)의 목적함수는 모형이 새로이 찾아낸 공급 및 소비량이 Q_i 일 때 농산물 시장 i 에서의 소비자 잉여와 생산자 잉여의 합을 모든 품목에 대해 더해준 값이 된다.

수식 (1)의 제약식 $c_i = \sum_m P_m \theta_{im}$ 는 m 번째 중간투입재가 q_i 한 단위 생산을 위해 사용되어야 할 양 θ_{im} 와 그 가격 P_m 를 곱한 것을 모두 더해준 것이 각 지역의 품목별 단위 생산비 c_i 와 같음을 의미한다. 그 앞의 제약식 $C_i(Q_i) = \sum_r c_r q_r$ 는 각 지역의 품목별 단위 생산비 c_i 에 지역별 생산량 q_i 를 곱해 모든 지역에 대해 합해준 것이 각 품목의 총 가변비용임을 의미한다. 마지막 제약식 $\sum_j \alpha_{ij} q_j \leq \beta_j$ 는 상품 한 단위 생산에 필요한 자원 이용량 α_{ij} 에 지역별 생산량 q_j 를 곱해준 것, 즉 생산에 소요되는 자원량이 각 지역의 자원 부존량 β_j 를 넘어설 수 없음을 의미한다.

한편 수식 (1)과 같은 상향식 모형에서는 가변 생산비 $C_i(Q_i) = \sum_r c_r q_r$ 가 각 품목별, 지역별로 고정된 한계생산비 c_i 를 가지기 때문에 목적식의 값을 극대화하는 과정에서 각 품목별로 생산비가 가장 낮은 지역의 모든 자원이 우선적으로 활용된 후, 이어서 다른 지역에서도 생산이 시작되는 식의 의사결정이 이루어진다. 그러나 이러한 결과는 현실의 상황과 괴리가 있으며, 이를 조정해 주지 않을 경우 보다 유리한 생산자에게 생산량이 집중되는 과잉특화현상을 초래하게 된다. 계획모형이 가지는 이러한 과잉특화문제는 Howitt (1995)이 고안한 PMP(positive mathematical programming)기법에 의해 해결책이 제시된 바가 있다. 이 방법은 가변생산비함수를 $C_i(Q_i) = \sum_r \left(d_r + \frac{1}{2} e_r q_r \right) q_r$ 와 같이 2차함수로 설정하여 한계생산비가 생산량의 증가함수가 되도록 하며, 파라미터 d_r 과 e_r 는 각 지역에서 이루어진 실제 생산행위가 모형의 최적화 결과와 일치하여 두 값이 일관성을 가질 수 있도록 모형 내에서 계산된다. 이러한 PMP기법은 국내

농업부문에 대한 분석을 위해 박경원·권오상(2011), 박경원 외(2014), 권오상 외(2016) 등에 의해 사용된 바가 있으며, 권오상 외(2017)에 의해 최초로 상·하향 통합모형의 설정에 활용되었다. 이렇게 PMP절차를 갖춘 통합모형에서는 외부 충격이 도입되지 않는 한 국가 전체의 생산 및 소비량이나 가격은 물론이고, 각 지역의 미시적 생산량까지도 모형의 해와 실제 경제자료가 완전 일치하게 된다.

2.3 통합모형의 연계 알고리즘

상향식 모형과 하향식 모형은 다음의 과정을 통해 완결된 하나의 해를 도출하게 된다. 먼저 하향식 모형은 농업부문 외의 부문에 대해서는 통상적인 일반균형모형처럼 생산과 소비관련 변수 값을 모두 결정하며, 통합이 이루어지는 농업부문에서는 생산관련 의사결정은 하지 않고 각 농산물의 수요함수와 시장균형을 달성하는 수요량, 시장가격을 도출하여 이를 상향식 모형에 전달한다. 상향식 모형은 하향식 모형에서 전달받은 균형 수요량 \bar{Q}_i 와 가격 \bar{P}_i 를 통해 선형근사한 수요곡선을 도출하고, 해당 수요곡선을 반영한 최적화 문제를 풀어 각 지역의 생산량 q_i 와 그 합인 Q_i 를 새로운 공급량으로 찾아 하향식 모형에 보낸다. 이 과정에서 가변비용 계산에 필요한 중간투입재의 가격은 각 중간투입재와 연결되는 하향식 모형 상품의 가격을 가중합한 값이 활용되며, 농업부문 생산에 투입되는 중간투입재 및 생산요소의 수요량도 하향식 모형에 전달된다. 하향식 모형은 상향식 모형에서 전달받은 정보로 기존 생산량 값을 업데이트하여 새로운 균형가격을 찾게 된다. 하향식 모형이 다시 균형을 이루는 결과를 얻으면 그에 따른 정보를 상향식 모형에 전달하게 되는 식으로 반복적인 정보전달과정이 나타나게 되며, 이 과정을 통해 모든 시장에서 하향식 모형의 (선형근사가 아닌) 실제 수요곡선과 상향식 모형의 공급곡선이 만나게 되면 더 이상의 반복 계산에도 수행해도 통합모형의 해가 바뀌지 않는 수렴현상이 발생하고, 이를 통합모형의 해로 간주한다.³⁾

결과적으로 하향식 모형은 연계된 부문의 총 수요량과 모든 품목의 가격 정보를 담당하고, 상향식 모형은 연계된 부문의 총 공급량과 생산에 투입되는 생산요소 및 중간투입재의 수요량에 대한 정보를 담당하게 된다. 두 모형이 연계된 부문에 대해 서로 역할을 나누고, 반복적으로 정보를 주고받으면서 두 모형이 동일한 해를 도출하도록 하는 것이 모형 연계 알고리즘의 핵심적인 내용이다(Figure 1).

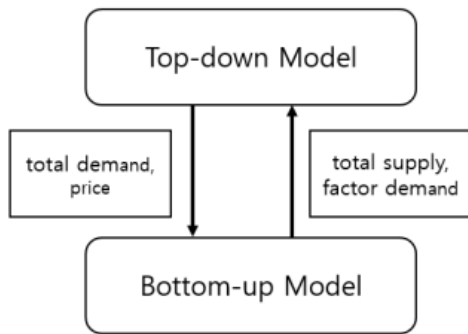


Figure 1. Information Exchange Algorithm of Linked Model

2.4 상향식 모형의 수정 및 모형 운용을 위한 자료 구축

본고는 앞서 농업부문에 대한 통합모형 분석을 수행한 권오상 외(2017)와 동일한 형태의 하향식 모형과 상·하향 모형 통합 연계 알고리즘을 활용하고 있지만, 상향식 모형은 본고의 연구목적에 맞게, 그리고 실제로 현장에서 이루어지는 생산과정과의 일치성을 높이기 위해 상당한 수정과 개선을 시도하였다.

본고에서 변경된 부분은 크게 두 가지로, 첫 번째는 토지 제약식의 변경이다. 기존 권오상 외(2017)에서는 토지에 대한 제약식이 재배면적에 대해 연단위로 구성되어 각 품목의 재배면적의 합이 총 재배면적을 넘지 않도록

구성되었다. 하지만 이러한 제약 설정은 이모작을 배제하는 것이며, 이모작이 이루어질 경우 동일 토지가 두 품목에 대한 재배면적으로 모두 집계가 이루어지기 때문에 실제 농지면적과 총 재배면적은 다소 차이가 발생할 수 있다. 이를 수정하기 위해 모형 내에서 이모작 선택이 가능할 수 있도록 품목별 토지수요를 월별로 구분하였으며, 각 지역별로 농업 생산에 활용 가능한 토지의 총량은 재배면적이 아닌 경지면적으로 다시 추산하였다.

토지의 월별 사용에 대한 자료로는 농촌진흥청에서 제공하는 품목별 [농작업 관리일정]을 참고하였으며, 각 작물의 생장이 이루어지는 시기 동안 토지에 대한 수요가 발생하는 것으로 간주하고 월별 토지 수요를 구성하였다. 농작업 일정의 기간 구분 단위인 순(旬)은 월별 토지수요의 1/3을 차지하는 것으로 반영하였으며, 중부, 남부로 표현되는 지역구분은 중부에 경기, 강원, 충북, 충남 지역이, 남부에는 전북, 전남, 경북, 경남, 제주 지역이 포함되도록 하였다.

논에서는 기본적으로 이모작이 이루어지지 않는 것으로 가정하고, 쌀은 모든 월에 대해 1의 토지 이용 비율을 적용하였으며, 해당 품목 생산 시 동일 토지에 다른 품목의 생산이 어려운 과일, 시설채소, 화훼, 축산 품목 또한 모든 월에 대해 1의 비율을 적용하였다. 다른 품목들은 생장시기를 고려하여 토지 이용 기간과 월별 토지 이용 비율을 적용하였으며, 세부 품목별 토지 이용 비율에 품목군 내에서 각 세부 품목의 재배면적 비중을 적용하여 품목군별 월별 토지 이용 비율을 도출하였다.

Table 1. The Sources of Main Data

Data	Reference	Note
total water resource demand of each class	Chapagain and Hoekstra(2004)	almost agricultural product
	Kwon et al.(2009)	livestock and greenhouse cultivation
	Brouwer and Heibloem(1986)	flowers
monthly water resource demand of each class	Ahn et al.(2010)	reference crop evaporation of Korea
	Allen et al.(1998)	single crop coefficient
monthly water resource supply of each region	National Climate Data Service System	monthly climatological normal precipitation of each point: 1981-2010
monthly land demand of each region	www.nongsaro.go.kr. 'Agricultural Management Schedule'	crop
	Lee(2016)	livestock
average yield per hectare of each region and class	Food, Agriculture, Forestry and Fisheries Statistical yearbook	-
arable land area		-

토지의 총 공급 가능 면적은 모형에서 자료 구성의 기준년도로 활용되고 있는 2010년의 경지면적 자료와 축산 품목의 사육 면적의 합으로 구성된다. 경지면적 자료는 [농림수산물통계연보]를 참고하여 적용하였다.⁴⁾ 축산 품목의 사육 면적은 구체적인 자료를 습득하는 것이 어렵기 때문에 이승호(2016)에서 [가축사육시설 단위 면적당 적정 가축사육기준]을 적용해 추산한 축산 토지 이용 면적을 동일하게 적용하였다. 한편 전남과 전북 지역의 경우 특정 월의 토지 수요 면적이 총 공급 가능 면적을 초과하는 현상이 나타나 토지 수요 면적이 가장 큰 월의 값을 총 공급 가능 토지 면적으로 변경하여 적용하였다.

토지 제약식은 구체적으로 식 (2)와 같은 형태로 구성된다.

$$\sum_i X_{BU_{ri}} LA_{ri} landuse_{ri}^t \leq \overline{A_r^t} \quad (2)$$

r 은 지역, i 는 품목을 나타내며, X_{BU} 는 상향식 모형에서 얻은 품목별 생산액을 나타낸다. t 는 각 월을 구분하기 위한 첨자이다. LA_{ri} 는 i 품목의 생산액을 토지면적으로 환산해주는 지역별 계수이며, 따라서 $X_{BU_{ri}} LA_{ri}$ 은 r 지역 i 품목 생산에 활용된 토지면적을 의미한다. $landuse_{ri}^t$ 는 앞서 [농작업 관리일정]을 통해 정리된 월별 토지 이용 비율 계수이며, $\overline{A_r^t}$ 는 r 지역에서 활용 가능한 토지의 총 면적을 의미한다. 따라서 제약식은 각 월에 r 지역에서 농업 생산에 활용되는 토지 면적이 r 지역의 활용 가능한 토지 면적보다 크지 않아야 함을 의미한다.

두 번째의 모형개선 내용으로서, 농업부문 수자원 변화의 효과 분석을 위해 상향식 모형에 수자원 관련 제약식을 추가하였다. 본고에서의 농업 수자원이란 일반적으로 통용되는 농업용수와 같이 농업생산에 활용되는 총 수자원량을 의미한다. 또한 농업 수자원 수요량을 각 작물의 생산 과정에서 투입된 물의 총량을 의미하는 가상물 함유량(virtual water content)을 통해 파악하였기 때문에 관개 등을 통해 인위적으로 농지에 투입한 물 이외에도 강수를 통해 토지와 작물이 흡수하게 되는 물까지 포괄하는 총체적인 수자원 활용량을 농업 수자원 수요의 범위로 정의하였다.

수자원 수요량 구성을 위한 품목별 수자원 사용량에 대한 상세한 정보는 UNESCO 연구보고서인 Chapagain and Hoekstra(2004)를 통하여 정리하였다. 이 보고서는 물 발자국(water footprints)이라는 개념을 통해 품목별 가상물 함유량을 국가별로 제시하고 있어, 이를 기초로 국내 농업 수자원 수요량을 추산하였다. 보고서에 정리된 가상물 함유량의 단위는 단위생산량 당 물 수요량(m^3/ton)

이기 때문에, 모형에서 고려하고 있는 생산선택 단위인 재배면적 당 물 수요량(m^3/ha)으로 전환해주기 위해 [농림수산물통계연보]의 지역별, 품목별 생산 단수(ton/ha)를 적용하였다. 자료가 제시되어 있지 않은 시설재배, 축산 품목은 권오상 외(2009), 화훼는 Brouwer and Heibloem(1986)에서 제시된 해바라기(sunflower)의 물 수요량 자료를 참고하여 적용하였다.

이렇게 계산된 품목별, 지역별 물 수요량은 연간 총 수요량이며, 이를 월별로 나누어주기 위해서는 추가적인 작업이 필요하다. 월별 수자원 수요량 자료는 FAO 보고서(Allen et al., 1998)를 참조하여 구성하였는데, 작물의 수자원 수요량은 작물이 가지고 있는 수분을 빼앗기는, 수분이 공기 중으로 증발산되는 양을 통해 추산하며, 증발산량을 추정하는 식은 식 (3)과 같다.

$$ET_c = K_c \times K_s \times ET_0 \quad (3)$$

ET_c 는 작물의 일일 증발산량(mm/day)을 나타내며, 일일 증발량은 기준증발산량 ET_0 와 품목 특성에 따른 계수 K_c , 토양 및 환경적 요인에 따른 계수 K_s 의 곱으로 구성된다. ET_0 는 한국에 대한 월별 ET_0 의 값을 제공하고 있는 안재현 외(2010)를 참고하여 적용하였다. K_c 는 Allen et al.(1998)에 제시된 온대기후에 대해 적용되는 계수를 품목에 맞게 적용하였다. K_c 의 값은 세부적으로 작물의 생육단계에 따라 초기, 중기, 말기에 해당하는 K_{cini} , K_{cmid} , K_{cend} 세 개의 값이 적용되는데, 품목별 [농작업 관리일정] 자료를 참고하여 작물의 생육시기를 적절히 세 시기로 구분하여 값을 적용하였다. K_s 의 경우 동일 지역 내에서도 특성이 달라질 수 있는 등 매우 세부적인 수준의 정보를 필요로 하기 때문에 현 단계에서는 모두 1로 고정하여 적용하였다.

한편 농업용수의 공급량, 또는 공급 가능량을 산정하는 것은 매우 어려운 작업이다. 수자원 공급은 자연적 공급인 유효우량과 수리시설을 통해 공급되는 수자원으로 구분할 수 있는데, 유효우량은 기상 정보에 근거하여 기상학, 수문학적 방법으로 추산할 수 있다 하더라도, 수리시설을 통해 공급되는 수자원은 계측이 매우 어렵다. 먼저 수리시설 수자원 공급량에 대한 정의 자체가 쉽지 않으며, 공급량을 공급가능량, 실제 유출량, 실제 농지에서 활용한 양 등 어느 개념으로 정의하느냐에 따라 공급량의 값 자체가 크게 달라질 수 있다. 또한 수리시설이 보유한 수자원 용량이 실제 공급능력을 반영하고 있다고 보기 어려운 측면도 있다. 저수지나 댐의 수위가 낮은 경우 공급 가능한 수자원이 부족하다고 볼 수도 있지만,

Table 2. Monthly Water Supply of Each Region

(thousand m ³)		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	
Gyeonggi	ER	16,916	19,279	35,714	56,919	85,510	109,965	
	FW	4,800	4,800	53,911	81,104	123,885	93,993	
Gangwon	ER	15,103	15,214	24,144	30,839	43,498	61,358	
	FW	1,323	1,323	17,244	28,855	51,085	39,709	
Chungbuk	ER	12,873	15,560	25,894	36,417	47,891	77,181	
	FW	1,792	1,792	23,074	38,963	73,901	47,547	
Chungnam	ER	28,707	32,152	51,879	74,382	98,050	163,589	
	FW	4,335	5,890	91,921	150,622	226,745	140,653	
Jeonbuk	ER	30,090	35,982	45,978	65,663	83,748	143,247	
	FW	7,323	11,855	94,415	156,920	202,336	122,619	
Jeonnam	ER	39,511	58,320	91,532	125,785	152,597	264,600	
	FW	5,733	6,418	88,005	167,383	243,243	96,286	
Gyeongbuk	ER	46,247	48,712	71,846	98,117	123,230	194,799	
	FW	3,692	3,692	54,323	125,326	215,128	124,387	
Gyeongnam	ER	20,923	30,081	50,118	77,671	94,064	139,683	
	FW	6,635	9,188	51,523	85,839	123,408	60,423	
Jeju	ER	12,985	13,139	22,443	25,683	30,250	42,584	
	FW	663	663	3,702	16,646	23,300	7,312	
(thousand m ³)		Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
Gyeonggi	ER	308,329	279,859	138,611	41,262	37,771	16,741	1,146,876
	FW	4,800	4,800	10,096	58,394	4,800	4,800	450,185
Gangwon	ER	143,015	138,854	90,258	29,931	24,407	11,423	628,044
	FW	1,323	1,323	1,323	16,425	1,323	1,323	162,575
Chungbuk	ER	161,688	144,435	77,254	25,915	23,167	12,540	660,816
	FW	1,792	3,742	12,811	30,501	1,792	1,792	239,498
Chungnam	ER	303,132	303,458	157,847	52,736	52,222	29,187	1,347,341
	FW	4,335	22,003	39,188	108,104	4,335	4,335	802,467
Jeonbuk	ER	256,132	257,801	122,302	40,597	41,704	28,643	1,151,887
	FW	8,351	24,337	47,159	99,537	4,749	9,903	789,503
Jeonnam	ER	359,787	338,710	211,741	61,672	60,747	33,487	1,798,489
	FW	12,354	50,683	35,114	139,060	11,473	12,290	868,042
Gyeongbuk	ER	332,729	325,315	206,479	63,689	62,135	39,556	1,612,853
	FW	3,692	14,847	6,030	90,085	3,692	3,692	648,583
Gyeongnam	ER	209,124	193,458	116,684	34,129	29,141	14,122	1,009,197
	FW	2,761	10,822	24,469	79,291	14,604	15,552	484,515
Jeju	ER	51,821	57,235	39,103	15,297	14,138	10,073	334,749
	FW	825	808	1,540	14,148	4,312	663	74,583

ER은 유효우량(effective rainfall), FW는 수리시설 공급량을 의미함.

한편으로는 이미 상당량을 공급한 이후일 수도 있으며, 반대로 수위가 높은 경우에는 공급 가능한 수자원이 많거나 혹은 수자원 수요가 없는 상황으로 판단할 수도 있다. 뿐만 아니라 수리시설에서 농지에 공급되는 과정에서 수로와 토양, 대기로 상당량이 유출되는데, 이 유출량에 대한 정확한 계량 또한 매우 어렵다. 한국농어촌공사에서 운영하는 [농촌용수종합정보시스템], [농업용수이용합리화계획]에 용수구역별로 농업용수 공급량을 추산한

자료가 있긴 하지만, 해당 자료는 수리시설을 통한 실제 공급량이 아닌 농지의 수자원 수요에 따른 공급필요량을 산정한 것이기 때문에 해당 자료를 수자원 공급량으로 직접 활용하기는 어렵다. 또한 농업용수의 효율적 관리를 위한 공급량 추산에 대한 연구가 계속적으로 이루어지는 중이며, 현 단계에서는 모형에 적용 가능한 신뢰할 수 있는 수자원 공급량 자료는 존재하지 않는 것으로 확인되었다.

따라서 본고에서는 농어촌공사 등에서 적용하는 기존 공급량 추산 방법과 유사하게 수요량에 근거하여 수자원 공급량을 추산하였다. 먼저 유효수량은 유효수량을 포함한 용수 이용량과 포함하지 않은 용수 이용량의 차이를 통해 9,690,252천m³/년 인 것으로 계산되었으며, 각 지역의 경지면적 비중과 월별 강수량 비중을 통해 지역별, 월별로 분배하였다. 그리고 각 지역의 월별 수자원 수요량에서 유효수량으로 채워지지 않는 부족분만큼 수리시설의 수자원 공급이 이루어지는 것으로 가정하였다.

하지만 수리시설에 의한 수자원 공급의 경우 농지와 품목의 유형에 따라 특성이 다르기 때문에 이를 고려하여 수자원 공급량과 제약식을 구성하였다. 저수지의 경우 대부분이 논에 물을 공급하기 위한 목적으로 만들어져 평지에 위치한 논과 직접 수로로 연결되어 있기 때문에 저수지의 수자원은 밭에서 활용되는 것이 거의 불가능한 것으로 알려져 있다. 그리고 국내 밭 농업은 기본적으로 수자원 공급을 강우에 의존하는 천수전이 대부분이며, 일부 부족한 수자원은 지하수로 보충하고 있고, 축산 역시 축사에서 지하수를 끌어다 사용하는 경우가 일반적이다. 그렇기 때문에 논과 밭, 축산에서 활용하는 수리시설의 수자원은 공유가 매우 제한되는 것으로 볼 수 있으며, 그에 따라 각 품목에 따른 수자원 공급량을 각각 구성할 필요성이 있다.

논과 밭에 대해서는 각 지역과 월에 분배된 유효수량을 논과 밭의 경지면적 비중에 따라 분배해 주었으며,⁵⁾ 그 후에 수리시설 공급량을 산정하였다. 축산의 경우 유효수량이 생산에 활용될 수 없기 때문에 모든 수자원 공급이 수리시설, 즉 지하수를 통해 이루어지는 것으로 가정하였다. 이 경우 수자원 공급량과 수요량이 정확히 일치하게 되는데, 오히려 이러한 상황이 비현실적일 수 있기 때문에 수리시설에서 이루어지는 공급량에 예비용량을 고려하여 공급량을 구성하였다. 저수지 의존도가 높은 논인 경우 기존 수리시설에 대한 의존량 대비 20%의 예비용량을 가지는 것으로 적용하였으며,⁶⁾ 지하수를 주로 사용하는 밭과 축산의 경우 수자원의 지속적인 활용을 위해 기존 사용량의 최대 10%까지만 추가적으로 활용 가능한 것으로 설정하였다.⁷⁾ 이렇게 구성된 각 지역별 월별 유효수량과 수리시설 수자원 공급량 추정치는 Table 2와 같다.

수자원 제약식은 식 (4)와 같이 3가지 유형으로 분리하여 구성된다.

$$\begin{aligned} X_{BU,r,ricc} LA_{r,ricc} wateruse_{r,ricc}^t &\leq & (4-1) \\ ER_{waters_r,share_{r,ricc}} + WF_{waters_r,ricc}^t &*(1.2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{dry} X_{BU,r,dry} LA_{r,dry} wateruse_{r,dry}^t &\leq & (4-2) \\ ER_{waters_r,share_{r,dry}} + WF_{waters_r,dry}^t &*(1.1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{lstock} X_{BU,r,lstock} HERDA_{r,lstock} wateruse_{r,lstock}^t & & (4-3) \\ + X_{BU,r,missl} LA_{r,missl} wateruse_{r,missl}^t &\leq \\ WF_{waters_r}^t &*(1.1) \end{aligned}$$

r, i, t, X_{BU} 는 식 (2)와 동일한 의미로 활용되었다. $rice$ 는 쌀, dry 는 밭작물, $lstock$ 은 기타축산을 제외한 축산 품목, $missl$ 은 기타 축산을 나타내는 품목별 첨자이다. LA 와 $HERDA$ 는 작물과 축산 품목의 생산액을 재배면적과 사육두수로 환산해주는 지역별 계수이며, 기타축산은 자료 특성에 따라 사육두수가 아닌 생산면적 단위로 환산해주었다.⁸⁾ $wateruse_{r,i}^t$ 는 r 지역의 i 품목이 t 월에 필요로 하는 단위 수자원 수요량을 나타내는 계수이며, 일반 작물과 기타 축산에 대해서는 단위 면적당 물 수요량, 나머지 축산에 대해서는 두당 물 수요량으로 표현되었다. $ER_{waters_r}^t$ 은 t 월 r 지역에 대한 유효수량이며, (내생적으로 결정되는) $share_{r,i}$ 는 r 지역의 논과 밭의 경지면적 비중으로 두 값의 곱을 통해 유효수량을 논과 밭에 분배한다. $WF_{waters_r,i}^t$ 는 t 월 r 지역 i 품목에 대한 수리시설의 수자원 공급량이며, 수자원 수요량과 유효수량을 통해 계산된 값이 적용되었다. 또한 쌀에 대해서는 수리시설 공급량에 1.2, 밭과 축산에 대해서는 1.1을 곱하여 수리시설 수자원 공급량의 여유분이 반영될 수 있도록 하였다.

III. 농업 수자원 부족의 영향 분석

전 세계를 대상으로 수문학이나 기상학 분야에서 몇 차례 진행된 연구들에도 불구하고(Sheffield and Wood, 2008; Sheffield et al, 2012; Dai, 2013), 기후변화로 인한 향후의 농업용수 부족량에 대한 수량적 예측은 아직까지 신뢰할만한 정보가 부족한 것으로 파악되고 있다. 무엇보다 강수량 변화와 수리시설 수자원 공급량 변화의 상관관계가 모호하여 둘 간의 구체적인 수량관계를 제시하기가 어렵다. 강수량이 감소하면 활용가능한 수자원도 감소하지만 그 감소 비율은 기존 수자원 잔존 용량, 기후여건, 자연·환경적 요인 등에 의해 다양하게 나타날 수 있고, 더욱이 대부분 수리시설의 공급용량은 수요량을 초과하여 설계되기 때문에 강수량의 감소로 수위가 낮아지더라도 그것이 꼭 수자원의 부족을 의미하는 것은 아니기 때문이다.

따라서 본고는 향후의 정확한 수자원 감소 비율 추정 이 어려운 상황에서 가상적으로 수자원량이 감소하는 시나리오를 구성하여 모형에 반영하였다. Sheffield and Wood(2008)에 따르면 한국이 속한 동아시아 지역은 가뭄빈도 및 강도가 증가할 것으로 예측되지만 애초에 가뭄강도가 심한 지역이 아니기 때문에 비교적 그 영향은 작은 편이며, RCP시나리오에 따르면 한국의 연간 강수량은 오히려 증가하지만 계절 간 강수량 격차가 다소 증가할 것으로 예측되고 있다. 그에 따라 본고에서는 봄철인 3-5월의 수자원 공급이 감소하는 경우에 대해 시나리오를 구성하였다. 여름은 우기이며, 장마 등을 통해 충분한 수자원 확보가 가능하고, 가을은 수확기로서 오히려 비가 오는 것이 생산에 부정적 영향을 미칠 수 있기 때문에 상대적으로 수자원 변동에 대한 민감도가 낮은 계절이다. 겨울의 경우 영농활동이 제한적으로 이루어지기 때문에 수자원의 절대적 수요량 자체가 적다. 봄은 가뭄 발생 확률이 높으면서도 수자원 수요가 크게 발생하고, 또한 그 수요를 충족시키는 것이 농업 생산에 중요한 문제이기 때문에 봄철 중심으로 수자원 감소 시나리오를 구성하였다.

시나리오는 크게 두 유형으로, 먼저 봄철, 즉 3, 4, 5월의 수자원 공급 감소에 따른 영향을 파악하기 위해 모든 지역에 대해 동일한 수자원 감소 비율을 적용하였으며, 다음으로 최근 연도에 관측된 지역별 수자원 감소율 차이를 반영하여 가뭄이 심한 지역과 그렇지 않은 지역에 대해 다른 수자원 감소율을 적용하여 분석하였다.

수자원 감소 시나리오는 강수량 감소로 인한 유효수량 감소와 수리시설 공급량 감소로 나타나는데, 유효수량은 강수량 감소의 직접적인 영향을 받지만 수리시설의 경우 강수량 외에도 주변 하천, 지하수 등으로부터 유입되는 수량의 영향을 받는다. 그에 따라 강수량과 수자원 공급량 간의 관계가 불분명하지만 제한적인 상관관계를 가지는 것으로 판단하여 유효수량 감소율의 절반 수준의 수리시설 수자원 공급량 감소가 나타나는 것으로 가정하였다. 또한 지하수는 순간적인 규모 변화보다는 장기간 일정 규모가 유지되는 것이 중요하기 때문에 봄철의 단기적인 가뭄에는 공급량이 영향을 받지 않는 것으로 가정하였으며, 따라서 수리시설 수자원 감소 시나리오는 저수지에 상당히 의존하고 있는 논에 대해서만 적용하였다. 유효수량 감소 시나리오는 전국에 대해 10%, 20%, 30% 감소하는 것으로 적용하였으며, 그에 따라 논 수리시설 공급량은 5%, 10%, 15% 감소하게 된다. 지역별로 다른 감소율이 적용되는 시나리오에서는 최근 가뭄이 빈번히 발생하는 충북, 충남, 전남 지역에는 유효수량 감소율 30%, 수리시설 공급량 감소율 15%를, 이외 지역에

는 유효수량 10%, 수리시설 공급량 5%의 감소율을 적용하였다. 밭은 유효수량 감소의 영향을 받으며, 축산은 수리시설 공급량에만 의존하고 있기 때문에 총 수자원 공급량에는 변화가 없다.

이러한 시나리오에 따른 분석은 몇 가지 가정을 전제로 하고 있다. 먼저 BAU의 수자원 수요량과 공급량은 장기간에 걸친 평년 수요량 및 공급량의 의미를 가지고 있으며, 평균적으로 동일한 수준의 수자원이 동일한 시기에 활용 가능한 상황을 기준점으로 삼고 있다. 따라서 시나리오에 따른 수자원 감소는 봄철 가뭄이 심화됨에 따라 봄철의 평균적인 수자원 공급가능량이 감소하는 상황을 나타내며, 이러한 상황변화에도 추가적인 수리시설의 증설이나 개선이 이루어지지 않은 상황을 가정하고 있다. 또한 일반균형을 고려하는 모형의 특성에 따라 모형에서 도출된 결과는 고착화된 수자원 감소 현상에 따른 농업생산자의 적응이 반영된 비교적 장기간에 걸친 균형 효과를 보여준다.

Table 3은 시나리오에 따른 각 품목별 BAU대비 생산량과 가격, 그리고 수입량 변화율을 정리한 것이다. 시나리오 1~3에 걸쳐서 품목별 총 생산량은 일정한 변화를 보여주고 있는데, 콩류와 화훼는 수자원 감소에도 생산이 증가하는 경향이 나타난 반면, 다른 작물은 수자원 감소에 따라 생산량이 점차 감소하고 있고, 특히 과일과 맥류 및 잡곡의 생산량 감소율이 크게 나타난다. 이러한 전 품목에 걸친 변화는 수자원 감소에 따른 생산 선택 변화가 품목에 따라 상당히 다르게 나타날 수 있음을 의미한다. 축산의 경우 생산량이 미세하게 증가하였는데, 시나리오에서 축산의 수자원 공급은 감소하지 않았고, 작물의 전반적인 생산 감소로 수요가 줄어든 토지와 노동 등의 생산요소가 일부 축산 생산으로 전용된 것으로 볼 수 있다.

한편, 소비자 가격과 수입량은 각 시나리오에 있어서 국내 생산과 반대방향으로 움직이는 경향을 보여주지만, 상대가격 변화에 따라 소비가 증가하는 축산의 경우 국내 생산 증가로 소비 증가분을 모두 충당할 수 없어 가격과 수입량의 증가가 동시에 나타나기도 한다. 쌀과 감자류의 경우 (쌀의 경우 시나리오 1의 경우를 제외하고) 국내 생산 감소에 따라 가격과 수입량이 증가하는데, 기존 수입량이 국내 소비량에 비해 많지 않은 관계로 증가율이 상당히 높게 나타나며, 과일은 국내 생산이 크게 감소하여 가격이 상승함에도 수요가 지속적으로 나타나 수입량 증가율이 매우 큰 폭으로 나타난다.

Table 4 ~ Table 6은 모든 지역에 동일한 수자원 감소 시나리오 적용에 따른 지역별, 품목별 생산량 변화를 나타내고 있다. 수자원 감소에 따른 생산량 변화는 지역과

품목에 따라 그 변화 특성이 다르게 나타나는데, 이는 각 지역의 생산 특성이 반영된 결과로 볼 수 있다. 먼저 활용가능한 수자원이 크게 감소하는 쌀의 경우 대부분 지역에서 생산 감소가 상당하게 나타나지만, 수자원 감소율이 낮았던 시나리오 1에서는 여타 품목의 생산 감소를 대체하는 과정에서 전북, 전남 지역의 쌀 생산이 소

폭 증가하였고, 시나리오 2, 3에서는 모든 지역에서 쌀 생산이 감소하였다. 발작물의 경우 유효우량 감소의 영향으로 수자원 공급량이 감소하기 때문에 이를 고려한 생산 선택이 다시 이루어지게 되는데, 대부분 지역에서 맥류 및 잡곡과 채소, 과일, 기타농산물의 생산을 우선적으로 줄이는 것으로 나타났다. 또한 수자원 감소율이 증

Table 3. The Impacts of Water Shortages on Production, Prices, and Imports

(%)	Scenario 1 (10% Reduction in Effective Rainfall, 5% Reduction in Water Supply from Facility to Paddy Field)			Scenario 2 (20% Reduction in Effective Rainfall, 10% Reduction in Water Supply from Facility to Paddy Field)			Scenario 3 (30% Reduction in Effective Rainfall, 15% Reduction in Water Supply from Facility to Paddy Field)			Scenario 4 (10%/30% Reduction in Effective Rainfall, 5%/15% Reduction in Water Supply from Facility to Paddy Field)*		
	Production	Price	Import	Production	Price	Import	Production	Price	Import	Production	Price	Import
Rice	0.4	-0.4	-0.87	-6.4	8.0	21.5	-17.1	24.3	72.8	-4.5	6.1	16.6
Barley/ Cereals	-6.5	2.2	0.56	-18.5	6.8	1.90	-22.4	8.5	3.18	-9.8	3.4	1.07
Beans	9.9	-4.2	-4.42	33.1	-12.4	-13.4	37.5	-13.6	-13.9	18.6	-7.4	-7.79
Potatoes	-2.8	2.9	6.75	-4.4	6.2	17.3	-11.3	17.5	53.4	-3.5	4.7	12.7
Vegetables	-0.1	0.2	0.62	-1.5	2.3	7.09	-5.9	8.0	24.5	-0.4	0.9	3.30
Fruits	-9.0	6.4	12.9	-26.6	22.4	47.3	-45.9	47.3	104	-15.3	11.8	24.6
Flowers	3.1	-3.7	-10.7	8.4	-8.3	-22.4	13.2	-11.0	-27.4	4.9	-5.1	-14.0
Other Agri. Products	-0.4	0.2	0.30	-5.1	2.4	3.65	-16.7	8.5	11.7	-5.2	2.5	3.33
Dairy	0.03	0.0	0.20	0.2	0.2	1.47	0.5	0.5	4.02	0.1	0.1	0.98
Cattle	0.02	0.0	0.16	0.2	0.1	1.25	0.4	0.5	3.64	0.1	0.1	0.83
Pig	0.02	0.0	0.18	0.2	0.2	1.37	0.5	0.5	3.90	0.1	0.1	0.88
Poultry	0.03	0.0	0.22	0.4	0.4	2.32	1.2	1.1	6.62	0.3	0.3	1.53
Other Livestock	0.00	0.0	0.06	0.2	0.1	1.09	0.5	0.3	3.39	0.2	0.1	0.80

*: 충북, 충남, 전남 지역은 유효우량 30%, 논 수리시설 공급량 15%감소, 나머지 지역은 유효우량 10%, 논 수리시설 공급량 5% 감소.

Table 4. The Regional Production Impacts under Scenario 1

(%)	Gyeonggi	Gangwon	Chungbuk	Chungnam	Jeonbuk	Jeonnam	Gyeongbuk	Gyeongnam	Jeju
Rice	-0.44	-0.44	-0.44	-0.44	0.60	2.91	-0.44	-0.44	-16.3
Barley/ Cereals	-44.7	-9.20	-51.6	-7.92	56.9	-17.3	-99.0	-3.65	-69.3
Beans	2.90	-6.78	13.7	-0.62	-5.57	-1.43	57.9	-6.14	0.60
Potatoes	-0.27	-11.1	-1.84	0.21	10.6	4.57	-25.6	-0.37	-7.21
Vegetables	-1.71	1.79	0.91	-0.35	1.14	0.82	-0.99	0.01	-3.32
Fruits	-20.7	-14.4	-18.6	-14.5	12.9	1.32	-23.6	2.30	4.23
Flowers	2.79	1.58	11.0	-1.16	-3.60	-1.44	51.1	-3.43	4.64
Other Agri. Products	-14.8	-9.34	0.36	-5.24	-24.1	-3.65	19.4	-4.52	-21.3
Dairy	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03
Cattle	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
Pig	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
Poultry	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03
Other Livestock	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.01	0.06	-0.01	-0.01	-0.01

가함에 따라 밭작물도 전반적으로 모든 지역에서 생산량 감소가 크게 나타나며, 특히 시나리오 1에서 생산량 감소율이 크지 않던 감자류는 시나리오 3에서 감소율이 크게 증가하였다. 한편 콩류와 화훼의 경우 수자원 감소가 크지 않았던 시나리오 1에서는 특징적인 변화가 나타나지 않았으나, 수자원 감소율이 커짐에 따라 생산량이 증가하는 지역이 늘어나고 있다. 지역별로는 충북, 경북, 제주 지역의 콩류와 화훼 생산량 증가율이 크게 나타나고 있고, 전북 지역은 시나리오 2, 3에서 쌀과 기타농산물의 생산량만 감소하고 다른 작물의 생산은 증가하였으

며, 맥류 및 잡곡, 콩류, 감자류, 과일의 생산량 증가가 크게 나타난다.

특정 품목의 생산이 크게 감소하는 이유는 두 가지 측면에서 설명이 가능한데, 먼저 각 지역은 최적화 과정에서 생산구조가 보다 비효율적인 품목의 생산을 우선적으로 감소시킨다. 생산구조가 비효율적이라는 것은 최적화모형의 관점에서 상대적으로 비용에 비해 이윤이 작아 해당 상품 시장에서 만들어지는 후생의 크기가 작다는 것을 의미한다. 이에 해당하는 품목은 맥류 및 잡곡과 기타농산물로, 두 품목은 상대적으로 단위면적당 생산액

Table 5. The Regional Production Impacts under Scenario 2⁹⁾

(%)	Gyeonggi	Gangwon	Chungbuk	Chungnam	Jeonbuk	Jeonnam	Gyeongbuk	Gyeongnam	Jeju
Rice	-3.08	-5.38	-4.20	-2.77	-3.00	-10.5	-8.02	-13.2	-37.3
Barley/Cereals	-99.0	-23.2	-99.0	-24.2	78.4	-43.1	-99.0	-19.8	-99.0
Beans	1.55	-20.8	24.2	-3.47	86.7	38.2	115.4	-23.5	19.2
Potatoes	-2.94	-29.7	-9.60	-3.01	73.6	20.4	-76.1	-13.5	-33.2
Vegetables	-3.73	4.62	-0.53	-0.38	10.2	7.68	-16.2	1.05	-14.3
Fruits	-39.9	-28.9	-39.7	-38.5	32.3	-22.5	-62.3	-2.17	7.83
Flowers	4.62	2.68	21.4	-2.12	7.66	9.81	102.4	-5.80	31.0
Other Agri. Products	-33.6	-22.4	-1.64	-14.2	-41.9	-1.19	31.2	-21.6	-99.0
Dairy	0.17	0.17	0.17	0.17	0.31	0.26	0.17	0.17	0.17
Cattle	0.11	0.11	0.11	0.11	0.33	0.26	0.11	0.11	0.10
Pig	0.16	0.16	0.16	0.16	0.28	0.24	0.16	0.16	0.16
Poultry	0.43	0.44	0.40	0.41	0.48	0.46	0.43	0.43	0.44
Other Livestock	0.08	0.07	0.08	0.07	0.77	0.75	0.07	0.07	0.07

Table 6. The Regional Production Impacts under Scenario 3⁹⁾

(%)	Gyeonggi	Gangwon	Chungbuk	Chungnam	Jeonbuk	Jeonnam	Gyeongbuk	Gyeongnam	Jeju
Rice	-12.9	-15.9	-14.4	-12.5	-12.8	-22.2	-19.1	-25.3	-51.1
Barley/Cereals	-99.0	-44.9	-99.0	-50.9	103.6	-59.5	-99.0	-37.2	-99.0
Beans	7.40	-29.7	41.0	0.90	75.0	21.7	140.3	-38.7	47.5
Potatoes	-0.25	-43.6	-16.4	-0.33	84.6	18.1	-99.0	-25.5	-99.0
Vegetables	-4.67	-9.37	-4.26	1.40	12.1	9.11	-38.8	5.04	-43.9
Fruits	-58.4	-37.7	-64.4	-62.1	49.1	-29.1	-88.2	-6.33	-16.7
Flowers	7.84	4.4	31.6	-1.81	2.10	7.14	118.7	-6.26	152.5
Other Agri. Products	-54.7	-34.5	-5.91	-23.0	-65.5	-19.7	26.5	-39.6	-99.0
Dairy	0.48	0.48	0.48	0.48	0.63	0.58	0.48	0.45	0.45
Cattle	0.36	0.37	0.36	0.37	0.59	0.52	0.37	0.37	0.36
Pig	0.48	0.49	0.49	0.48	0.61	0.57	0.48	0.48	0.45
Poultry	1.24	1.26	1.16	1.18	1.21	1.20	1.25	1.24	1.25
Other Livestock	0.37	0.36	0.38	0.37	1.09	1.09	0.35	0.37	0.34

Table 7. The Regional Production Impacts under Scenario 4⁹⁾

(%)	Gyeonggi	Gangwon	Chungbuk	Chungnam	Jeonbuk	Jeonnam	Gyeongbuk	Gyeongnam	Jeju
Rice	6.57	6.47	-14.4	-12.5	7.88	-22.2	4.87	1.63	-16.3
Barley/ Cereals	-53.7	-10.5	-99.0	-34.0	125.9	-75.5	-99.0	-4.15	-71.6
Beans	0.83	-10.9	29.1	1.81	-21.7	42.8	61.1	-12.2	-5.43
Potatoes	1.04	-11.8	-18.7	-7.34	7.03	16.4	-26.6	-2.39	-14.1
Vegetables	-1.21	2.95	-7.74	-3.64	0.75	3.65	-0.28	0.82	-5.66
Fruits	-20.1	-12.2	-65.9	-60.4	18.0	-37.5	-20.9	2.91	8.34
Flowers	2.69	1.06	23.5	0.89	-6.54	10.1	55.5	-4.35	5.07
Other Agri. Products	-15.5	-8.68	-7.50	-17.7	-68.5	1.29	24.0	-5.58	-23.5
Dairy	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.21	0.11	0.11	0.11
Cattle	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.23	0.07	0.08	0.07
Pig	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.19	0.11	0.11	0.11
Poultry	0.29	0.30	0.27	0.28	0.26	0.34	0.30	0.29	0.30
Other Livestock	0.08	0.08	0.08	0.08	0.06	0.74	0.07	0.08	0.07

이 작은 품목들이다. 두 번째로는 모형에서 수자원 공급량 제약을 강화하였기 때문에 수자원에 대한 의존도가 높은 품목의 생산이 감소하게 된다. 높은 수자원 의존도가 생산 감소에 크게 영향을 미친 품목은 감자류, 채소, 과일이다. 과일은 수자원 공급량이 감소한 봄철에 쌀 다음으로 수자원 수요량이 많은 품목이며, 감자류와 채소가 그 뒤를 따르고 있기 때문에 수자원 제약이 강화됨에 따라 감자류와 채소의 생산량 감소율도 점차 증가하였다. 생산이 증가한 콩류와 화훼에 대해서는 반대의 설명이 가능한데, 콩류는 단위면적당 수자원 수요량이 가장 적은 품목이기 때문에 수자원 공급이 감소한 상황에서 생산 선택이 이루어졌으며, 화훼는 비교적 단위면적당 수자원 수요량이 크지 않으면서 단위면적당 생산가치가 높기 때문에 많은 지역에서 생산이 증가하였다.

지역별로 수자원 감소율에 차이를 둔 시나리오 4의 결과를 Table 7를 통해 살펴보면, 논에 대한 수자원이 크게 감소한 충북, 충남, 전남 지역은 쌀 생산량이 크게 감소하였고, 제주를 제외한 나머지 지역에서는 쌀 생산이 상당히 증가하였다. 시나리오 4에서는 쌀의 주생산지인 충북, 충남, 전남 지역의 쌀 생산량이 크게 감소함에 따라 쌀의 가격이 상승한 영향으로 다른 지역들에서는 쌀 생산이 증가하게 되었다. 한편 제주 지역의 경우 과일 생산이 크게 증가하였는데, 이는 타 지역에서 수자원 제약과 쌀의 생산 증가로 인해 과일 생산이 감소함에 따라 과일 가격이 상승하였고, 과일 생산에 강점을 가진 제주 지역에서는 과일 생산을 늘리는 선택을 하였기 때문이다. 이러한 결과는 특정 지역에서 직접적인 수자원 감소가 크게 발생하지 않더라도 지역 간 과급효과에 의

해 생산선택이 달라질 수 있음을 보여준다. 발작물의 경우 충북, 충남, 전남 지역은 시나리오 3의 결과와, 이외 지역은 시나리오 1의 결과와 유사하게 나타나고 있는데, 이는 충북, 충남, 전남 지역의 발작물 생산 비중이 쌀보다는 높지 않아 세 지역의 발작물 생산 변화가 시장에 미치는 영향력이 상대적으로 작고, 쌀 시장의 변화 자체가 발작물 생산 선택에는 큰 영향을 미치지 못하기 때문인 것으로 해석된다.

마지막으로 각 시나리오에 따른 농업부문 총 생산액과 국가 GDP변화를 Table 8에 정리하였다. 흥미로운 것은 농업부문 총 생산액의 경우 시나리오 1에서 3으로 수자원 제약이 강해짐에 따라 오히려 총 생산액 감소분의 크기가 작아지며, 지역별로 다른 수자원 감소율을 적용한 시나리오 4의 경우 총 생산액의 규모가 오히려 증가한다는 점이다. 이는 일부 품목의 경우 수자원 감소 이후에 총 생산액이 증가하기 때문인데, 쌀, 감자류, 채소의 경우 생산량 감소에도 가격 증가 효과로 인해 생산액이 증가하며, 콩류는 생산량이 증가한 것에 비해 가격 하락이 적게 나타나 총 생산액이 증가한다. 이러한 현상은 대체로 비탄력적인 소비 행태가 나타나는 농산물의 특성의 영향을 받은 것으로 보이며, 농산물에 대한 피해 규모 예측의 경우 생산량 변화에 따른 가격 효과의 영향이 매우 중요하다는 것을 보여주는 결과이다.

본고의 이러한 분석결과는 모형의 특성과 포괄범위, 시나리오의 설정에 있어 차이가 있지만 쌀에 대한 가뭄 피해액을 산정한 서순덕 외(2009), 채광석 외(2016)의 결과와 비교해볼 수 있다. 두 연구는 모두 가뭄으로 인한 단수변화를 고려하여 단수변화분을 시장가격으로 평가하

Table 8. The Changes in Major Macro Variables Resulted from Water Shortages

(Billion Won/%)		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Gross Production of Agri. Sector	Variation (Billion Won)	-107.05	-97.68	-78.86	55.25
	Changing Rate (%)	-0.218	-0.199	-0.161	0.113
GDP	Variation (Billion Won)	-164.27	-1,478.34	-4,422.74	-846.33
	Changing Rate (%)	-0.014	-0.124	-0.371	-0.071
Price Change of Value Added	Labor (%)	-0.013	-0.123	-0.346	-0.076
	Capital (%)	-0.045	-0.311	-0.802	-0.194

는 방법으로 가뭄 피해규모를 산정하였으며, 서순덕 외(2009)는 2006~2008년에 가뭄이 발생한 각 시군의 피해액을 연간 4,000~6,000만원 수준으로 계측하였고, 채광석 외(2016)는 가뭄 지역의 단수변화를 추정하는 계량 모형의 결과에 따라 2015년 가뭄 피해규모를 각각 310억 원, 154억 원으로 도출하였다. 본고 분석의 경우 시나리오 2에서 쌀의 순 생산량 감소량을 선행연구와 같이 BAU 가격 기준으로 환산하면 약 450억 원 정도로 피해액이 계측되며, 채광석 외(2016)의 결과는 가뭄발생 지역에 한정하여 쌀에 대한 피해액을 추정한 것임을 감안할 때 전 지역에 대한 피해액은 유사한 수준으로 계측될 것으로 보인다.

한편, Table 8에서 국가 전체 GDP 손실의 경우 농업부문 생산액 손실보다도 훨씬 더 큰 값으로 나타난다. 즉 농업부문 생산액 손실은 수자원 부족으로 농산물 생산이 줄어들어도 가격 상승에 의해 그 피해 규모가 어느 정도 줄어드는 반면, 노동과 자본에 대한 보수인 부가가치, 즉 GDP의 변화는 농업생산 감소에 따라 손실이 매우 클 수 있다는 것을 보여준다. 농산물 생산액 변화는 완전경쟁 시장을 가정하는 일반균형모형의 특성 상 이윤이 항상 0이기 때문에 적합한 후생효과 지표라 할 수가 없다. 반면 소득의 원천인 노동과 자본, 두 본원적 요소의 가치 변화는 적절한 후생효과지표로 사용할 수가 있다. 농업 부문을 중심으로 생산 감소가 발생하면서 노동과 자본에 대한 수요가 감소하고, 이로 인해 부가가치의 원천이 되는 두 본원적 투입요소의 가격이 하락하면서 상당한 정도의 GDP 손실이 발생하는 것으로 나타나고 있다. 특히 20%의 대규모 농업용수 공급 감소를 가정할 경우에는 GDP의 손실이 4조원을 넘어서는 규모가 된다. 그러나 변화율로 보면 GDP의 경우가 농업생산가치 보다 더 적은데, 이는 국가 경제 전체의 부가가치를 포함하는 GDP 규

모 자체가 농업생산액보다는 훨씬 크기 때문이다.

IV. 요약 및 결론

본고는 최근 농업부문에서 주요한 문제로 떠오르고 있는 가뭄과 수자원의 관리 및 확보와 관련하여 농업 수자원 감소가 농업부문에 어떠한 영향을 미칠 수 있는지를 수자원 제약을 고려한 농업부문 상·하향 통합모형을 활용하여 분석하였다.

아직까지는 현재 진행되고 있는 기후변화가 수자원 공급량에 미치는 영향을 수량화 할 정도로 과학적인 정보가 알려져 있지 않기 때문에, 강수량 감소의 영향으로 농업부문에서 활용가능한 유효우량이 BAU대비 10%, 20%, 30%, 논에 대한 수리시설 수자원 공급량이 5%, 10%, 15% 감소한다는 3개의 시나리오와, 지역별 가뭄 피해 빈도와 현황을 반영하여 충북, 충남, 전남지역에는 유효우량이 30%, 수리시설 수자원 공급량이 15% 감소하고, 나머지 지역에서는 유효우량이 10%, 수리시설 수자원 공급량이 5% 감소하는 시나리오, 총 4개의 시나리오를 구성하여 모형에 적용하였다. 분석결과 수자원이 감소할 경우 농업부문의 생산 선택은 해당 품목의 생산효율성에 따른 생산 가치와 수자원 수요량 특성을 복합적으로 고려하여 변화하게 되며, 수자원 수요량이 큰 쌀, 과일, 채소와 단위면적당 생산가치가 낮은 맥류 및 잡곡, 기타농산물의 생산은 감소하고, 상대적으로 수자원 수요가 적은 콩류와 단위 생산 가치가 높은 화훼의 생산이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 지역별로 다른 수자원 감소율을 적용한 시나리오 4의 결과에서는 쌀 주산지의 생산량 감소에 따른 쌀 가격 상승에 따라 논에 대한 수

자원 공급이 감소하였음에도 다른 지역의 쌀 생산 증가를 유발하여 시장 상황 변화가 실제적으로 농업 생산자의 품목 선택에 영향을 미칠 수 있음을 시사하고 있다.

또한 가뭄으로 인한 농업부문의 후생 변화를 새로운 균형점의 가격이 적용된 총 생산액으로 평가할 경우 수자원의 감소율이 높은 경우에 오히려 총 생산액 감소가 더 적은 것으로 나타났다. 나아가 시나리오 4와 같이 일정 수준의 자원 제약으로 인한 농업부문의 생산 구조 변화가 발생할 경우 총 생산액이 증가할 가능성도 있어 농업부문에 대한 피해액 계측에서 적용되는 가격에 따라 매우 다른 결과가 도출될 수 있음을 확인하였다. 그러나 보다 정확한 후생지표라 할 수 있는 국민경제의 부가가치는 생산자의 작목변환을 통한 적응조치에도 불구하고 가뭄으로 인해 크게 감소할 것으로 예상되어 농업용수의 단위당 가치는 상당한 것으로 분석되었다.

본고가 분석에 활용한 농업부문 통합모형은 농업부문에 대한 정책 효과를 분석할 때 지역별, 품목별 효과를 모두 관찰할 수 있다는 점에서 큰 강점을 가지며, 특히 경제적 효과를 평가함에 있어 하향식 모형으로부터 얻은 새로운 시장균형가격을 활용하기 때문에 상향식 모형이 가지는 큰 한계점을 보완해줄 수 있다. 또한 이번 연구에서 시도한 것과 같이 상향식 모형은 제약식의 추가에 따라 다양한 정보를 추가적으로 활용할 수 있는 유연성을 가지기 때문에 기존 하향식 모형에서 적용할 수 없던 구체적인 정책 적용에 대한 시뮬레이션도 가능하다.

한편 아직 많은 시도가 이루어지지 않은 통합 모형 분석을 수행함에 있어 자료의 적절성에 대한 한계점을 가지고 있다. 특히 본고에 새롭게 추가된 수자원 공급량과 수요량 자료는 그 시도 자체는 의미를 가질 수 있으나 수요량의 경우 상당부분이 15년 이상 된 보고서에 의존하고 있으며, 공급량도 구체적으로 참고할 수 있는 자료가 적어 가정에 의존하여 구성된 측면이 크다. 또한 다양한 분야의 통계자료를 하나의 모형에 포함시켰기 때문에 자료 간 연계에 대한 지속적인 검토가 필요하다. 향후 관련 분야의 연구와 자료를 지속적으로 추적함을 통해 보다 현실을 잘 묘사할 수 있도록 모형을 개선해가는 과정이 이루어져야 할 것이다.

에서 설명된다.

- 주2) 각종 탄력성이나 비중계수 등과 같은 하향식 모형의 파라미터의 획득과정에 대해서도 권오상 외(2017)를 참고할 수 있다.
- 주3) 일반적으로 하향식 모형에서 활용하는 거시 경제 자료인 산업연관표와 상향식 모형에서 활용하는 개별 기술 단위의 생산비 자료는 그 형태나 수치에서 상당한 차이를 가지고 있기 때문에 통합모형 구성을 위해서는 두 가지 유형의 자료를 통합시키는 과정이 필수적이다. 그 과정에 대한 자세한 설명은 이승호(2016), 권오상 외(2017)를 참조할 수 있다.
- 주4) 제주 지역의 논인 경우 2010년 경지면적이 33ha인데 반해 쌀 재배면적이 1,119ha로 상당한 차이가 있으며, 경지면적을 토지부존량으로 적용할 경우 분석결과에도 영향을 미치는 것으로 나타나 제주 지역의 논에 대해서는 재배면적을 부존량으로 적용하였다.
- 주5) 그러나 향후 수자원 공급량 감소로 인해 논과 밭 면적 선택이 달라져 논과 밭이 전체 유효수량 소비에서 차지하는 비중이 달라질 경우에는 이를 자동으로 반영토록 모형을 설계하였다.
- 주6) 수자원 공급에 대한 예비율은 도입이 계획 중이며, 명시하고 있는 정책 목표가 있는 것은 아니다. 그러나 [수자원장기종합계획]에서 공급예비율을 언급하면서 전력의 공급예비율 수치인 10-15%를 제시하고 있기 때문에 이를 참고하여 20%를 수리시설(저수지)의 목표 예비용량으로 설정하였다.
- 주7) 한편 일부 월에 대해서는 토지에 공급되는 유효수량이 수자원 수요량보다 커서 수리시설로 인한 공급이 불필요한 것으로 나타났다.
- 주8) 기타축산의 경우 여러 가축이 포함되어 있어 생산액을 각 가축의 사육두수로 환산하는 것에 어려움이 있다. 따라서 기타축산은 가축을 사육하는데 소요되는 토지면적을 기준으로 생산액이 결정되는 것으로 간주하였다. 이는 기준년도인 2010년에 기타축산에 포함되는 가축의 생산비율이 일정하게 유지된다는 가정을 포함한다. 가축사육면적은 농림축산식품부 행정규칙 중 「가축사육시설 단위면적당 적정 가축사육기준」을 참고하여 적용하였으며, 구체적인 과정은 이승호(2016)를 참고할 수 있다.
- 주9) 생산량 변화 중 일부 지역의 일부 품목이 기존 생산량의 99%까지 감소하는 결과가 도출되기도 하였는데, 이는 계획모형의 특성상 발생하는 일종의 구성해라고 이해할 수 있다. 하지만 생산량이 큰 비율로 감소한 품목의 대부분은 기존 생산량 자체가 적어 작은 규모의 변화가 비율로는 상대적으로 크게 측정되는 경우가 대부분이다.

본 논문은 환경부 기후변화대응 환경기술개발사업(과제번호:2014001300001)의 지원에 의해 이루어진 것임

References

1. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith, 1998, "Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements," FAO Irrigation

주1) 본고는 권오상 외(2017)에서 사용한 통합모형의 상향식 모형을 대폭 개선하여 분석에 활용하고 있으며, 하향식 모형은 위 연구와 동일한 형태를 가지고 있다. 따라서 모형과 관련된 보다 구체적인 내용은 권오상 외(2017)에서 확인할 수 있다. 그러나 본고의 상향식 모형은 연구목적에 맞게 권오상(2017) 외에 비해 많은 부분에서 더 정교하게 구성되었으며 그 차이는 소절

- and Frainage Paper No. 56.
2. Ahn, Jae-Hyun, Jae-Geun Lee, Seung-Ho Lee and Il-Pyo Hong, 2010, "Evaluation of Virtual Water Calculation Method in Korea," *Journal of Korea Water Resources Association*, 43(6), 583-595.
 3. Bank of Korea, 2014, Input-Output Table 2010.
 4. Bates, B. C., Z. W. Kundzewicz, S. Wu and J. P. Palutikof., Eds., 2008, *Climate Change and Water*, Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat.
 5. Böhringer, C. and T.F. Rutherford, 2009, "Integrated Assessment of Energy Policies: Decomposing Top-down and Bottom-up," *Journal of Economic Dynamics and Control*, 33(9), 1648-1661.
 6. Boubacar, I, 2010, "The Effects of Drought on Crop Yields and Yield Variability in Sahel," *Southern Agriculture Economics Association*.
 7. Brouwer, C., and M. Heibloem, 1986, "Irrigation Water Needs," *Irrigation Water Management Training Manual No.3*, FAO.
 8. Chae, Gwangseok, Hongsang Kim, Youngah Lim and Booyoung Kim, 2016, "A Study on the Measurement of Agricultural Damage from Drought," *Korea Rural Economics Institute*.
 9. Chapagain, A. K., and A. Y. Hoekstra, 2004, "Water Footprints of Nations," *Value of Water Research Report Series No.16*, UNESCO-IHE.
 10. Cooley, H., K. Donnelly, R. Phurisamban and M. Subramanian, 2015, "Impacts of California's Ongoing Drought: Agriculture," *Pacific Institute*.
 11. Dai, A, 2013, "Increasing Drought under Global Warming in Observations and Models," *Nature Climate Change*, 3, 52-58.
 12. Hazell, P.B.R., and R. D. Norton, 1986, *Mathematical Programming for Economic Analysis in Agriculture*, MacMillan Publishing Company.
 13. Howitt, R, 1995, "Positive Mathematical Programming," *American Journal of Agricultural Economics*, 77, 329-342.
 14. Howitt, R., D. MacEwan, Josué Medellín-Azuara and J. Lund, 2012, "Calibrating Disaggregate Economic Models of Agricultural Production and Water Management," *Environmental modelling and Software*, 38, 244-258.
 15. Howitt, R., D. MacEwan, Josué Medellín-Azuara, J. Lund and D. Sumner, 2015, "Economic Analysis of the 2015 Drought for California Agriculture," *Center for Watershed Sciences, University of California-Davis*.
 16. Korea Rural Community Corporation, 2016, *Rural Community and Environment*, 130.
 17. Kwon, Oh-Sang, Hye-Jung Kang, Hak-Kyun Jeong and Chang-Gil Kim, 2016, "Analyzing Crop Choice Adaptation to Climate Change Using a Korean Regional PMP Model," *Journal of Rural Development*, 39(2), 1-27.
 18. Kwon, Oh-Sang, Sungwon Kang and Seungho Lee, 2017, "Estimating the Mitigation Cost for Agricultural Greenhouse Gases: A Combined Top-Down and Bottom-Up Model for Korea," *Korea Environment Policy and Administration Society*, 25(2), 61-85.
 19. Kwon, Oh-Sang, Taeho Lee and Jeonghoi Heo, 2009, "Valuation of Irrigation Water: A Chance-Constrained Programming Approach," *Journal of Korea Water Resources Association*, 42(2), 281-295.
 20. Lee, Eung-Gu, 2015, "Current Status of Agricultural Water Resource and Drought Response Case," *Water for Future*, 48(7), 62-71.
 21. Lee, Seungho, 2016, "Regional Hybrid SAM for Agricultural Sector and CGE Model Analysis of Agricultural Policy" *Masters Dissertation*, Seoul National University.
 22. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, *Optimum Breeding Standards for Livestock Facilities*.
 23. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2011, *Food, Agriculture, Forestry and Fisheries Statistical Yearbook 2011*.
 24. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011, *Water Vision 2020*.
 25. Nath, R., D. Nath, Q. Li, W. Chen and W. Chi, 2017, "Impact of Drought on Agriculture in the Indo-gangetic Plain, India," *Advances in Atmospheric Sciences*, 34, 335-346.
 26. Park, Kyung-Won and Oh-Sang Kwon, 2011, "Analyzing the Impacts of Climate Change on Korean Agricultural Sector Using a Recursive Positive Mathematical Programming Approach," *The Korean Journal of Agricultural Economics*, 52(2), 51-76.
 27. Park, Kyung-Won, Oh-Sang Kwon and Kwang-Soo Kim, 2015, "The Regional Impacts of Climate Change

- on Korean Agriculture: A Positive Mathematical Programming Approach,” The Korean Journal of Economic Studies, 63(1), 61-92.
28. Rural Development Administration, 2011, Agricultural Income Data by Region 2010.
29. Seo, Soon-Seok, Duck-Gil Kim, Keon-Haeng Lee, Hung-Soo Kim and Tae-Woong Kim, 2009, “Estimation of Drought Damage Based on Agricultural and Domestic Water Use,” Korean Wetlands Society, 11(2), 77-87.
30. Sheffield, J., E. F. Wood, 2008, “Projected Changes in Drought Occurrence under Future Global Warming from Multi-model, Multi-Scenario, IPCC AR4 Simulation,” *Climate Dynamics*, 31, 79-105.
31. Sheffield, J., E. F. Wood, M. L. Roderick, 2012, “Little Change in Global Drought over the Past 60years.” *Nature*, 491, 435-438.
32. <http://ecos.bok.or.kr>.
33. <http://kosis.kr>.
34. <http://www.nongsaro.go.kr>.
35. <http://www.wamis.go.kr>.
-
- Received 10 October 2017
 - First Revised 14 November 2017
 - Finally Revised 22 November 2017
 - Accepted 23 November 2017