

물-에너지-식량 넥서스를 활용한 통합적 농업자원관리정책 평가 - 지하수 함양 사업을 중심으로 -

성재훈* · 이현정** · 조원주*

한국농촌경제연구원 부연구위원* · 한국농촌경제연구원 연구원**

The Evaluation of Integrated Agricultural Resource Management Policy through Water-Energy-Food Nexus - An Application to Management of Aquifer Recharge Project -

Sung, Jae-hoon* · Lee, Hyun-jung** · Cho, Wonjoo*

*Research Fellow, Korea Rural Economic Institute

**Researcher, Korea Rural Economic Institute

ABSTRACT : Korean agriculture experienced rapid changes in its production structure to respond fluctuations on external conditions, and these changes have increased the dependence between agricultural resources and negative environmental externalities from agricultural production. As a tool for managing agricultural resources and reducing negative environmental effects from agricultural production, this study employs water-energy-food nexus for integrated resource management. To show the necessity of an integrated approach, this study evaluated three policy scenarios including changes in capital interest, water capacity, and energy cost. The results show that three scenarios have unintended consequences for farmers' incomes and their use of resources. Also the unintended consequences of government policies also affected farms' vulnerability to environmental changes. In particular, the expansion of financing for the establishment of non-circulating water curtain facilities did not have a significant effect on the crop switching of farms. In addition, increasing the amount of available water through the aquifer recharge project leads to the installation of non-circulating water curtain facilities in zucchini farm. It raises dependence on groundwater in agricultural production, thereby increasing farmers' vulnerability to groundwater shortages. These results imply that the agricultural sector needs to consider the interrelationship between agricultural resources when designing or evaluating policies.

Key words : Water-Energy-Food Nexus, Danmok District, Agricultural Sector Model, Integrated Resource Management

1. 서론

1950년대 이후 급격히 진행된 경제성장과 인구증가, 도시화, 세계화 그리고 기후변화는 자원의 안정적 수급에 불확실성을 증가시켰다(Hoff, 2011). 1인당 1일 칼로리 소비량은 전 세계적으로 1969/1971년 2,370kcal에서 2005/2007년 2,772kcal로 증가하였으며(FAO, 2012), 연간

에너지 소비량 역시 석유 환산량으로 1971년 1인당 133.6kg에서 2013년 189.4kg으로 증가하였다(World Bank, 2017). 또한, 2007~2008년에 일어난 식량 및 에너지 가격 증가와 실질 곡물 가격의 꾸준한 상승은 국제 시장을 통한 식량 및 에너지의 안정적인 수급에 불안감을 가져왔다(Allouche et al., 2014; Piesse and Thirtle, 2009). 그리고 화석연료를 대체하기 위한 바이오연료 생산이 2000년 160억 리터에서 2010년 1,000억 리터로 증가하였는데(IEA, 2011), 이로 인해 토지와 수자원에 대한 수요는 더욱 커졌다.

Corresponding author : Cho, Wonjoo
Tel : 061-820-2207
E-mail : wjcho@krei.re.kr

향후 자연 자원에 대한 수요 가운데 물, 에너지 식량 자원에 대한 수요가 지속적으로 증가할 것으로 예상되며, 이로 인해 자원의 희소성과 자원 간의 상호 의존성은 더욱 증대될 것으로 전망된다. FAO는 2050년 식량 수요가 2005~2007년 평균 식량 수요 대비 약 60% 증가할 것으로 전망하였으며, 증가한 식량 수요를 충족시키기 위해서는 2050년까지 7,000만 ha의 토지가 곡물 생산을 위해 추가적으로 필요할 것으로 분석하였다(FAO, 2012). 또한, 세계에너지협의회(World Energy Council, 이하 WEC)는 2050년 에너지 수요가 2010년 에너지 수요 대비 시나리오별로 27~61% 가량 증가할 것으로 전망하였다(WEC, 2015). 마지막으로 2050년 물 수요는 2000년 대비 55% 증가할 것으로 예상되며, 제조업과 전기 생산을 위한 물 수요가 다른 산업에 비해 가장 큰 폭으로 증가할 것으로 나타났다(OECD, 2012).

이와 더불어 자원의 비대칭적 분포는 자원 공급의 불안정성을 더욱 악화시킬 것으로 예상된다. 식량 생산을 위해 확장 가능한 농지의 60%가 사하라 사막 이남의 아프리카나 라틴 아메리카, 선진국에 분포되어 있다. 이러한 불균등한 농지 분포는 향후 식량 자원의 불공평한 분배와 공급 불안정성을 야기시킬 수 있다(FAO, 2012). 또한, 세계화로 개발도상국의 경제개발이 가속화되고, 자원 사용의 지역별 연계성이 강화될 것으로 예상된다. 그 결과 자원사용과 이로 인한 환경오염이 특정지역에 집중되어, 특정 지역에서 발생한 자원 공급의 불안정성이 다른 지역 혹은 전 세계로 확산될 우려가 있다.

기후변화 역시 자원의 희소성과 자원 공급의 불안정성을 악화시킬 것으로 전망되는데 IPCC(2014b)는 기후변화로 인해 향후 10년 동안 곡물 생산량이 매년 1%씩 감소할 것으로 전망하였다. 특히 식량 공급을 위한 잠재농지가 집중적으로 분포한 사하라 이남의 아프리카는 기후변화로 곡물 생산성이 크게 감소할 것으로 분석되었다(Schlenker and Lobell, 2010). 또한, 기후변화로 평균 기온이 1°C 증가할 경우 세계 인구의 약 7%가 사용하고 수자원이 20% 이상 감소하는 것으로 예측되었다(IPCC, 2014a). 마지막으로 기후변화로 인한 강수 패턴의 변화와 기온상승은 에너지 수요를 증가시키고, 수력 및 화력 발전의 효율을 감소시킬 것으로 예측된다(IPCC, 2014a, 2014c).

이러한 자원의 희소성과 공급 불안정 문제를 해결하기 위해 개별적인 자원관리 정책이 시행되어 왔으나 많은 한계점을 보였다. 예를 들어 수자원의 효율적 관리를 위해 1992년 제안된 더블린 접근법(Dublin approach) 혹은 통합적 수자원 관리(Integrated Water Resource Management)는 다양한 이해당사자로 인해 신속하고 효

과적인 의사결정이 어려웠으며, 기후변화와 개발도상국의 급격한 경제개발에 대응하기에는 많은 한계점을 드러냈다(Muller, 2015).

또한, 자원 간의 상호 의존성은 정책의 불확실성을 증대시키고, 의도치 않은 정책효과를 가져왔다. 예를 들어 바이오연료 정책으로 바이오연료 작물에 대한 수요와 가격이 증가하여 농업인들이 한계지와 초치까지 바이오연료 작물을 생산하는 유인을 제공하였다. 그 결과 바이오연료 정책은 탄소배출 저감이라는 본래의 정책 목표 달성에 걸림돌이 되었다. 이와 더불어 Ogallala-High Plain 지역의 사례를 보면 농업용수 절약 기술(Low Energy Precise Application)을 도입한 뒤 농가들이 농업용수를 절약한 만큼 관개면적을 증가시켜 결과적으로는 농업용수의 사용량이 더욱 증가하는 의도치 않은 정책효과를 가져오기도 하였다.

우리나라 농업부문은 생산구조 및 외부여건 변화로 인해 통합적 자원관리가 절실히 필요한 실정이다. 구체적으로 시설작물 및 축산부문 증가는 농업생산에서 에너지와 수자원 사용 집약도를 증가시켰을 뿐 아니라 농업용수 수질에 대한 수요도 증가시켰다. 특히 대규모 시설재배 단지는 이미 지하수 수위 하락과 같은 공유재의 비극을 겪고 있다. 또한, 기후변화로 인해 가뭄의 빈도와 강도가 증가하고, 농촌지역의 도시화·혼주화와 더불어 최근 논의되고 있는 물관리 일원화 역시 통합적 농업자원관리 필요성을 역설하고 있다.

본 연구는 물-에너지-식량 넥서스 플랫폼을 이용하여 통합적 농업자원관리정책을 평가하고자 한다. 이를 위해 물-에너지-식량 넥서스와 관련된 선행연구를 검토하고, 사례지역을 선정하여 농업부문모형(Agricultural Sector Model)을 구축하고, 지하수 함양 사업을 바탕으로 시나리오 분석을 실시하였다.

II. 관련 이론

물-에너지-식량 넥서스는 아직까지 그 개념이 명확하게 정립되지 못했다. 그 이유는 지금까지의 물-에너지-식량 넥서스를 포함한 넥서스 연구가 넥서스에 포함된 자원을 하나의 시스템으로 간주하고 이를 바탕으로 정책을 포함한 외부 요인의 영향을 평가하는 기능적 측면을 보다 강조하였기 때문이다. 또한, 넥서스 연구가 연구의 목적과 배경에 따라 넥서스를 구성하는 요소들이 매우 다양하게 구성되는 특징(맥락특이성)을 가지고 있어 넥서스 개념이 합의되는 데 어려움이 있다. 따라서 넥서스의 광범위한 적용가능성과 맥락특이성을 감안한다면 넥서스

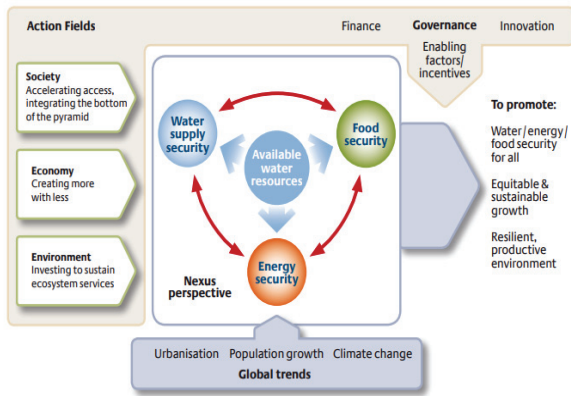


Figure 1. The water, energy and food security nexus Nexus in Bonn 2011 conference (Hoff, 2011)

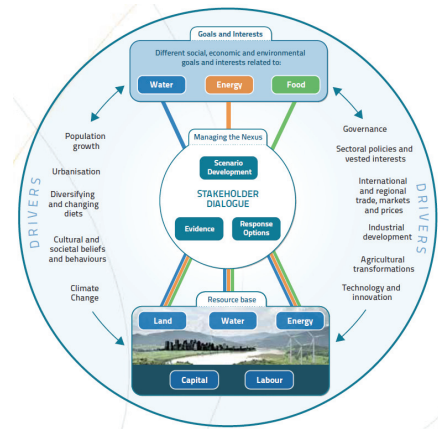


Figure 2. The FAO approach to the Water-Energy-Food Nexus (FAO, 2014a)

의 개념적 정의에 초점을 맞추기보다는 넥서스를 효과적인 자원관리를 위한 의사결정지원도구 혹은 의사결정지원 플랫폼으로 파악하고 활용하는 것이 합리적이라 생각된다.

통합적 자원관리 방안으로서 넥서스 접근법은 2008년 세계경제포럼에서 처음 제시되었다. 2011년 본(Bonn) 컨퍼런스 이후 넥서스 접근법(프레임워크)은 넥서스 접근법의 특징과 목표, 배경 등을 도식화 시켜놓은 것으로 사용 목적과 사례지역 및 분석 대상에 따라 다양한 형태가 제시되어 사용되고 있다. 현재 물-에너지-식량 넥서스에 관한 연구는 국제기구를 중심으로 이루어지고 있는데 넥서스 프레임워크가 단순히 넥서스의 개념적인 의미를 담은 것을 넘어 실질적이고 구체적인 자원관리, 더 나아가서는 넥서스 평가 툴(tool)의 설계도와 같은 모습으로 변하고 있다. 본(Bonn) 컨퍼런스에서 제시된 초기의 넥서스 프레임워크는 수자원을 중심으로 자원 간의 연관성에 초점을 맞춘 매우 개념적인 형태에 불과하였다(<Figure 1> 참고). 그러나 이후 FAO에서 제시한 넥서스 프레임워크는 실질적이고 구체적인 자원관리 방안에 초점이 맞추어져 있다(<Figure 2> 참고).

더 나아가 유럽의 Sustainable Integrated Management For the Nexus of water-land-food-climate for a resource-efficient Europe(이하 SIM4NEXUS)와 OECD의 넥서스 프레임워크는 넥서스 평가 모형의 설계도와 같은 역할을 하고 있다(OECD, 2015; Laspidou et al., 2017). 특히 SIM4NEXUS의 넥서스 프레임워크는 넥서스 접근법에 대한 도식화 없이 자원 간의 상호연관성만을 보다 구체적으로 나타내고 있다(<Figure 3> 참고).

앞서 언급한 국제기구들은 이미 넥서스 접근법을 바탕으로 한 의사결정지원 도구를 구축하고 이를 정책에

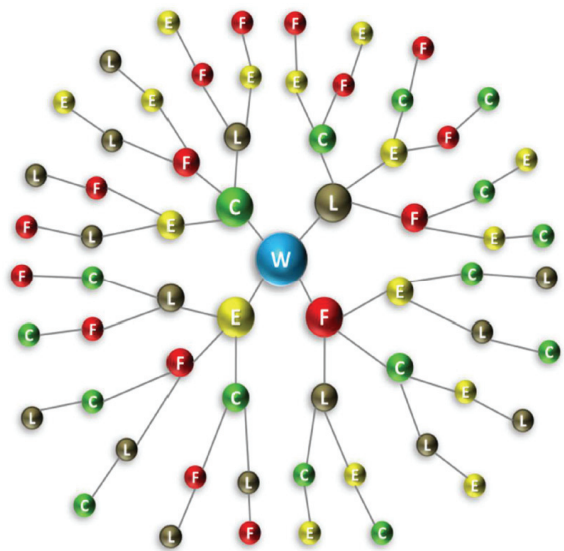


Figure 3. The Nexus tree of SIM4NEXUS for an initial change in Water component (Laspidou et al., 2017)

활용하고 있다. 각국의 대학이나 연구기관 역시 지역 분석이나 농업 등과 같은 산업 부문에 넥서스 접근법을 바탕으로 한 모형을 구축하고 이를 정책 효과 분석에 활용하고 있다.¹⁾ 우리나라는 자원 간의 상호연계성을 고려한 통합적 정책의 필요성에 대한 논의는 활발히 진행되고 있지만(Lee et al., 2015, Lee et al., 2015, Jang, 2015, Hong, 2015, Kim et al., 2015, Kim et al., 2017, Choi, 2017, Lim, 2018), 넥서스 접근법을 바탕으로 한 의사결정지원 도구의 구축이나 정책평가 등은 이루어지지 못한 실정이다.

III. 분석 방법 및 자료

1. 분석 방법

농업부문모형은 특정 지역을 한 농가로 가정하고 지역 농업시스템의 최적화된 영농형태를 분석하는 데에 이용되며, 농업생산조건, 부존자원 현황, 품목 특성 등을 모형에 반영할 수 있다는 장점이 있다(박경원과 권오상 2011; 박경원 등 2015). 단, 농업부문 밖에서 형성되는 변수, 예를 들어 가격 등은 외생적으로 가정하며, 기준년도의 실제 관측치와 예측치가 불일치할 수 있는 단점이 있다.

이와 같은 최적화 모형을 바탕으로 한 농업부문모형의 단점을 극복하기 위해 본 연구에서는 Howitt(1995)이 제안한 실증적 수리계획모형(Positive Mathematical Programming, 이하 PMP)을 이용하였다. PMP는 Hydro-economic model 혹은 Bio-economic model을 구축하는 데에 광범위하게 사용되고 있는데(Merel and Howitt, 2014), 최근에는 지역 단위 물-에너지-식량 넥서스 평가를 위한 통합 모형 구축에 유용한 방법으로 주목받고 있다(Kling et al., 2016).

우선 단목지구가 K개의 품목을 생산하기 위해 M개의 농업자원을 이용한다고 가정하면, 단목지구 전체의 최적화 행위는 아래 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Max}_x \sum_{k=1}^K [p_k y_k - c_k] x_k, \\ & \text{s.t.} \sum_{k=1}^K a_{k,j} x_k \leq b_j, j=1, \dots, M \\ & x_k \leq x_{0k} (1 + \tau_1) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 p_k 는 k 품목의 생산자 수취가격, y_k 는 k 품목의 단위면적당 단수, c_k 는 k 품목의 단위면적당 생산비용, x_k 는 k 품목의 재배면적을 말한다. $a_{k,j}$ 는 k 품목을 생산하는데 필요한 단위면적당 j 번째 자원의 필요량을 뜻하며, b_j 는 j 번째 자원의 부존량이며, x_{0k} 는 k 품목의 실제 재배면적을 말한다. 마지막으로 τ_1 은 일종의 수렴반경으로 캘리브레이션(Calibration) 제약을 뜻한다.

식(1)에서 도출된 해는 실제 관측치와 일치한다. 하지만 마지막 제약조건 때문에 시나리오 분석에는 사용하지 못하는 단점이 있다. 이 때문에 마지막 제약조건 없이 실제 관측치와 예측치를 일치시킬 수 있는 방법이 필요하다. Howitt(1995)는 쌍대정리(duality)를 이용하여 마지막 제약조건이 없어도 실제 관측치와 예측치가 일치할

수 있는 방법을 제안하였다.

본 연구에서 사용한 실증적 수리계획 모형의 캘리브레이션 과정을 Paris(2011)를 바탕으로 설명하면 다음과 같다. 우선 식(2)는 행렬 형태로 나타낸 식(1)의 쌍대(Dual) 문제이며, 식(3)과 식(4)는 목적식이 x_k 의 이차함수 형태인 비선형 최적화 문제와 그에 해당하는 쌍대 문제이다.

$$\min_{\lambda, \mu} [b' \mu + \lambda' x_0], \text{ s.t. } A' \mu + \lambda + c \geq p \quad (2)$$

$$\text{Max}_x R' x - x' Q x / 2, \text{ s.t. } Ax \leq b \quad (3)$$

$$\min_{\mu} [b' \mu + x' Q x], \text{ s.t. } A' \mu + Q x \geq p \quad (4)$$

여기서 μ 는 식(1)의 첫 번째 제약조건의 라그랑지안 승수 벡터($M \times 1$), λ 는 식(1)의 두 번째 제약조건의 라그랑지안 승수 벡터($K \times 1$), A는 $a_{k,j}$ 를 요소로 하는 $M \times K$ 행렬, b는 자원의 부존량 벡터($M \times 1$), c는 단위면적당 생산비용 벡터($K \times 1$), R은 품목별 매출액 벡터($K \times 1$)를 나타내며, 품목별 가격과 단수를 곱한 값으로 구성된다. 여기서 Q는 $K \times K$ 파라미터 행렬이다.

만약 $\lambda + c = Qx$ 라면 식(2)와 식(4)의 해는 일치함을 알 수 있다. 이에 따라 실증적 수리계획 모형의 캘리브레이션은 $r + c = Qx_0$ 을 만족하는 Q의 값을 찾는 것이다. 제한된 정보로 Q의 값을 구하는 다양한 방법이 개발되었다. 본 연구는 분석의 편의를 위해 Q의 대각원소들을 $\hat{Q}_{kk} = \lambda_k + c_k$ 을 통해 추정하고 Q의 비대각 요소들은 0으로 가정하였다(Paris, 2011). 이는 각각의 작목을 재배하는 것은 다른 작목을 재배하는 것에 영향을 주지 않음을 의미한다. 결과적으로 시나리오 분석은 추정된 \hat{Q} 을 이용한 식(5)를 통해 이루어진다.

$$\text{Max}_x R' x - x' \hat{Q} x / 2, \text{ s.t. } Ax \leq b \quad (5)$$

마지막으로 본 연구에서는 PMP를 통해 계측된 작목별 재배면적과 단위면적 당 물 사용량, 에너지 사용량, 농업소득, 이산화탄소 배출량을 곱하여 시나리오에 따른 작목별 물 사용량, 에너지 사용량, 농업소득, 그리고 이산화탄소 배출량을 계측하였다(<Table 1>, <Table 2> 참고).

2. 분석 자료

단목지구는 약 250ha이며, 2,058개의 시설 하우스(약 142.3ha)가 972개의 지하수공을 통해 지하수를 이용하고 있다(Figure 4) 참고). 품목별로는 호박이 시설하우스의 46%를 차지하고 있으며, 파프리카(19%), 고추(14%), 딸

Table 1. Water use, Energy use, and CO₂ emission for each commodity

Product	Water use (ton/10a)	Energy use (Diesel, ton/10a)	CO ₂ emission (ton CO ₂ eq)
Without water curtain			
Strawberry	1.62	617.6	1.60
Zucchini	2.14	70.9	0.18
Tomato	3.98	1035.4	2.68
Pepper	1.71	2070.6	5.36
With water curtain			
Strawberry	73.31	0.0	0.0
Zucchini	59.53	0.0	0.0
Tomato	22.17	0.0	0.0
Pepper	74.67	0.0	0.0

Source: Data for Energy use are from 2016 Agricultural and Livestock Production Cost Survey, Data for water use are from Basic Investigation and Detailed Design for Groundwater Reclamation Project in Jinju Danmok District. CO₂ emission is based on emission factors in 2017 National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea.

Table 2. Resource use, operating cost, price, and yield for each commodity

	Cultivated areas (Unit: 10a)	Water use (Unit: ton)	Operating cost (Unit:1,000won/10a)	Energy cost (Unit:1,000won/10a)	Agricultural Profit (Unit:1,000won/10a)
Without water curtain					
Strawberry	19.247	31.190	9,047.331	963.13	6,097
Zucchini	321.581	679.924	3,442.858	267.47	1,125
Tomato	9.620	38.312	14,123.519	3,331.03	2,016
Pepper	261.499	448.162	9,702.380	3,830.36	4,218
With water curtain					
Strawberry	118.680	8699.896	9,047.331	48.16	6,097
Zucchini	264.854	15767.206	3,442.858	13.37	1,125
Tomato	3.220	71.380	14,123.519	166.55	2,016
Pepper	12.400	920.920	9,702.380	191.52	4,218
Total	1011.101	26,656.990	-	-	-

Source: Data regarding farm operation are from 2016 Agricultural and Livestock Production Cost Survey, 2016 Agricultural Science and Technology Economic Analysis Criteria, Data for cultivated areas and water use are from Basic Investigation and Detailed Design for Groundwater Reclamation Project in Jinju Danmok District.

기(10%), 피망(7%)가 그 뒤를 따르는 것으로 조사되었다.

단목지구에 설치된 972개의 수공 중 46.6%는 생육용 수만을 공급하고 있으며, 4.7%는 수막용수만을 공급하고, 42.8%는 생육과 수막용수 모두를 공급하고 있다. 하지만 250ha의 면적 중 200ha가 지하수 수위 하락으로 지하수 공급이 충분하지 못해 농어촌공사는 이 지역에 지하수함양사업을 계획 중에 있다.

본 연구에서는 모형 구축을 위해 농어촌연구원에서 제공한 진주 단목지구 용수 및 토지이용 실태조사를 우선적으로 이용하였다. 농어촌공사의 용수 및 토지이용 실태조사는 단목지구 시설 하우스를 대상으로 한 전수조

사이며, 작물별 면적과 수막 사용 여부, 생육용 혹은 수막용 물 사용량에 관한 자료를 포함하고 있다. 조사결과에 따르면 2,058개의 시설 하우스 중 1,726개의 시설 하우스가 지하수 부족을 경험했다. 이는 농업인들이 시설 재배를 하면서 자신들이 사용할 수 있는 지하수의 양을 모두 사용했음을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 진주 단목지구 용수 및 토지이용 실태조사의 지하수 이용량을 단목지구의 최대 가용 용수량이라 가정하였다.²⁾

두 차례의 현장 방문을 통해 분석대상 품목을 선정하였는데 파프리카, 피망, 미니 파프리카는 일반적으로 다른 작물로의 품목 변경이 일어나지 않는 것으로 조사되



Figure 4. Groundwater wells in Danmok District

어 분석대상에서 제외하였다. 또한, 수막시설 역시 비순환식수막재배 시설이 주를 이루는 것으로 판단되어, 본 연구에서의 수막재배시설을 비순환식수막재배 시설로 가정하였다.

농가의 생산비와 소득 자료는 2016년 농촌진흥청의 지역별 농산물소득자료를 이용하였다. 하지만 수막재배를 이용하였을 경우의 에너지비용은 농산물소득자료에 포함되어 있지 않다. 따라서 본 연구는 한국농어촌공사의 「진주 단목지구 지하수함양사업 기본 조사 및 세부 설계」 자료를 바탕으로 수막재배를 실시할 경우 에너지 비용이 1ha당 1/20로 줄어든다고 가정하였다.³⁾

또한, 에너지 비용을 제외한 경영비, 단수, 생산물의 품질은 수막재배 유무에 영향을 받지 않는다고 가정하였다.⁴⁾ 수막재배 설치비는 신진에스텍의 비순환수막재배시설 경제성 분석결과를 이용하였으며, 비순환수막재배시설의 내구연수는 농촌진흥청의 2016년 농업과학기술 경제성 분석 기준자료집을 이용하였다.⁵⁾

수막시설의 내구연수는 6년이며, 설치비용을 연간비용으로 변환하여 모형에 반영하였으며, 비순환수막재배시설을 설치할 경우, 영농광열은 오직 전기를 통해서만 이루어진다고 가정하였다. 모형 구축은 품목 생산에 필요한 비용은 품목별 경영비에서 임차료를 제외한 금액을 이용하였다.

단목지구의 품목별 재배면적과 물 사용량, 생산비와 소득 자료는 <Table 2>와 같다. 단위면적 당 시설호박의 농업 소득이 매우 낮음에도 불구하고, 재배면적이 가장 넓다. 이는 호박 이외 다른 품목의 경우 소득 관련 자료로 통제되지 않는 품목전환과 관련된 눈에 보이지 않는 암목적 비용(shadow cost)이 0보다 큰 것을 의미한다.

구체적으로 <Table 3>은 본 연구에서 사용된 실증적 수리계획 모형을 바탕으로 계측한 자원의 암목적 가치(μ)와 품목전환을 위해 필요한 암목적 비용(λ)을 나타낸다. 분석결과, 호박을 제외한 모든 품목의 품목 전환과 관련된 암목적 비용은 0보다 큰 것으로 나타났다. 또한,

마토의 품목 전환과 관련된 암목적 비용은 23백만 원/10a로 가장 큰 것으로 나타났으며, 고추(12백만 원/10a)와 딸기(8백만 원/10a)가 그 뒤를 따르는 것으로 분석되었다. 이러한 암목적 비용은 실제적인 품목 전환의 제약 요인으로 작용한다.

Table 3. Shadow values of resources and land use change

Shadow values		Estimates	
Shadow price(μ)	land (won/10a)	4,260,726	
	water (won/ton)	860	
Shadow cost (λ , won/10a)	Without water curtain	Strawberry	8,072,926
		Zucchini	0
		Tomato	20,466,103
		Pepper	12,026,320
	With water curtain	Strawberry	8,721,536
		Zucchini	0
		Tomato	23,410,201
		Pepper	15,398,053

IV. 분석 결과

본 연구에서는 정부의 안정적인 수자원 공급과 생산비를 절감하기 위한 세 가지 정책 시나리오를 구성하였다⁶⁾: 첫 번째 시나리오는 농업기계 구입지원 사업을 확대하여 비순환수막재배 시설 설치 비용의 100%를 무이자로 융자한다고 가정하였다. 비순환수막재배 시설 설치 비용을 100% 무이자로 융자해 줄 경우, 비순환수막재배 시설 설치한 농가는 1년에 10a 당 29,750원의 자본이자 비용을 지불하지 않아도 된다. 두 번째 시나리오는 지하수 함양사업으로 단목지구의 지하수 가용용수량이 30% 증가하였다고 가정하였다. 마지막 시나리오는 정부가 온실가스 배출 저감을 위해 농업용 에너지 가격 보조를 줄여 농가 에너지 비용이 50% 증가하였다고 가정하였다.

시나리오 분석 결과는 <Table 4>와 같다. 우선 시나리오 1, 즉 비순환식수막재배 시설 설치비 융자 확대는 농가의 작목전환에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다. 이는 비순환식수막재배에 설치에서 자본이자가 비순환식수막재배 시설의 감가상각비(175,000원/1년.10a)에 비해 상대적으로 매우 작기 때문이다. 구체적으로 비순환식수막재배 시설 설치로 인해 발생하는 연평균비용의 약 85%는 비순환수막재배 시설의 감가상각비이다. 따라서 자본 이자를 감면시켜주더라도 비순환식수막재배 시설 설치로 인해 발생하는 연평균 비용은 농업인들에게

Table 4. Results of analysis based on three scenarios

	Commodity	Observed	Scenario 1: Finance installation cost at zero interest rate	Scenario 2: Increase ground water capacity by 30%	Scenario 3: Increase energy cost by 50%
Land use (Unit: 10a)	Without water curtain				
	Strawberry	19.247	19.247	19.247	18.834
	Zucchini	321.581	321.565	89.448	341.749
	Tomato	9.620	9.620	9.620	9.259
	Pepper	261.499	261.501	261.499	242.141
	With water curtain				
	Strawberry	118.680	118.631	118.680	118.354
	Zucchini	264.854	264.918	496.987	265.192
	Tomato	3.220	3.221	3.220	3.220
	Pepper	12.400	12.397	12.400	12.351
Total	1011.101	1011.101	1011.101	1011.101	
Water use (Unit: ton)	Without water curtain				
	Strawberry	31.190	31.190	31.190	30.520
	Zucchini	679.924	679.891	189.120	722.566
	Tomato	38.312	38.311	38.312	36.874
	Pepper	448.162	448.166	448.162	414.986
	With water curtain				
	Strawberry	8699.896	8696.336	8699.896	8676.021
	Zucchini	15767.206	15770.994	29586.505	15787.352
	Tomato	71.380	71.410	71.380	71.389
	Pepper	920.920	920.692	920.920	917.281
Total	26656.990	26656.990	39985.485	26656.990	
Agricultural Profit (Unit: 1,000 won)	Without water curtain				
	Strawberry	237,413	237,416	237,413	223,245
	Zucchini	1,370,753	1,370,686	381,274	1,411,016
	Tomato	237,905	237,899	237,905	213,557
	Pepper	4,259,431	4,259,468	4,259,431	3,480,373
	With water curtain				
	Strawberry	1,548,212	1,551,108	1,548,212	1,541,114
	Zucchini	1,142,022	1,150,178	2,142,957	1,141,708
	Tomato	89,162	89,295	89,162	88,905
	Pepper	244,560	244,869	244,560	242,411
Total	9,129,459	9,140,919	9,140,914	8,342,329	
CO ₂ emission (Unit: tonne CO ₂ eq) ¹⁾	Without water curtain				
	Strawberry	30.78	30.78	30.78	30.12
	Zucchini	59.05	59.04	16.42	62.75
	Tomato	25.80	25.79	25.80	24.83
	Pepper	1402.24	1402.26	1402.24	1298.44
	With water curtain				
	Strawberry	-	-	-	-
	Zucchini	-	-	-	-
	Tomato	-	-	-	-
	Pepper	-	-	-	-
Total	1,517.87	1,517.88	1,475.25	1,416.14	

Note: 1) We assume that energy cost of farm equals to 0 when the farm adopts water curtain. Also, we assume that farms only use diesel for heating. Lastly, we apply the method and emission factors in 2017 National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea.

여전히 큰 부담으로 작용할 수 있다. 또한, 비순환식수막재배 설치비 용자확대로 인해 감소하는 자본이자비용이 작목전환이나 비순환식수막재배 시설 설치에 드는 암묵적인 비용에 비해 적기 때문에 자본이자의 감소가 농가들에게 작목전환이나 수막재배시설 설치에 충분한 경제적 유인을 제공하지 못한 것으로 판단된다.

지하수 함양사업으로 인한 가용용수량 증가는 호박의 비순환식수막재배 시설 설치를 증가시키는 것으로 나타났다. 구체적으로 가용용수량이 30% 증가할 경우, 수막재배를 하지 않는 시설호박의 면적은 약 32.1ha에서 약 8.9ha로 감소하지만 수막재배 시설호박의 재배면적은 약 26.5ha에서 약 50.0ha로 증가하였다. 이에 반해 다른 작목의 재배면적은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

앞서 <Table 3>에서 제시하였듯이, 진주단목지구 토지의 암묵적 가치는 426만원/10a 그리고 지하수의 암묵적 가치는 860원/ton으로 계측되었다. 이는 단목지구 농가들이 추가적인 지하수나 토지를 확보하기 위해 지불할 수 있는 금액이 0보다 큰 것을 의미한다. 따라서 지하수 함양사업으로 인해 증가한 가용용수량의 증가는 단목지구 농가들에게 수막시설 설치를 통한 수익 향상의 기회요인으로 작용한다. 하지만 앞서 언급하였듯이 호박 이외의 품목은 품목전환이나 수막시설 설치의 암묵적 비용이 매우 큰 것으로 나타났다. 이에 따라 지하수 함양사업으로 인한 가용용수량 증가는 품목전환과 수막재배 설치비용과 관련된 암묵적 비용이 다른 품목에 비해 적은 시설호박의 재배면적에 가장 큰 영향을 미친 것으로 해석할 수 있다.

분석결과에 따르면 시나리오 1과 시나리오 2의 농가 수익 총합이 비슷하다. 즉, 정부가 시설 농가의 경영 안정화를 목표로 두 가지 정책을 시행한다면 비록 수익 증대 효과는 같지만 농가들의 자원이용 상황은 달라진다는 점이다. 예를 들어 시나리오 2의 경우, 가용용수량 증가로 인해 수막재배시설 설치 농가가 증가하였고, 이에 따라 단목지구 전체 농가 수익 역시 증가하였다. 하지만 수막재배시설 설치 농가의 증가는 농업생산에서의 지하수 의존도를 높여 지하수 부족에 대한 농가들의 취약성 증가를 유발할 수 있다. 따라서 시나리오 2의 분석 결과는 정책 설계 시 정책 목표뿐만 아니라 정부 정책으로 인한 의도하지 않은 정책 효과에 대해 고려해야 함을 의미한다.

마지막으로 농업부문 면세유나 전기료에 대한 혜택이 줄어들어 농가들의 에너지 비용이 50% 증가할 경우, 수막재배를 사용하지 않은 시설고추의 재배면적이 약 26.1ha에서 24.2ha로 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 수막재배를 사용하지 않는 시설호박의 재배면적은 약

32.1ha에서 34.2ha로 증가하는 것으로 나타났다.

이와 같은 분석결과가 도출된 이유는 고추가 단위면적당 에너지비용이 가장 큰 작목이기 때문에 에너지 비용 증가는 수익성에 큰 영향을 끼칠 수밖에 없다. 즉, 이러한 에너지비용 증가가 고추의 수막재배시설 설치 증가가 아닌 시설호박 재배면적을 증가시켰다고 분석된다.

또한, 수막재배를 사용하는 작목들 면적에는 큰 변화가 없는 것으로 계측되었다. 이는 앞서 언급하였듯이 시설호박으로의 작목전환과 관련된 낮은 암묵적 비용에 따른 것으로 해석할 수 있다. 이와 더불어, 정부 정책으로 인한 에너지비용 증가는 시설고추에서 시설호박으로의 작목전환을 유도하였으며, 단목지구에서 사용되는 유류의 양과 이산화탄소 발생량을 크게 감소시키는 것으로 나타났다. 하지만 이러한 에너지비용 증가로 인해 단목지구 농업 수익은 약 9% 감소한 것으로 나타났다. 즉, 온실가스 감축을 위한 정부의 농업부문 에너지원에 대한 세제 혜택 감소는 이산화탄소 감축이라는 정책 목표를 이루는 데에는 유용한 반면, 농가의 수익성에는 부정적인 영향을 끼치는 것으로 분석되었다.

V. 요약 및 결론

급격한 경제성장과 인구증가, 도시화, 세계화 그리고 기후변화 등은 자원의 희소성과 자원의 안정적 공급의 불확실성을 증가시키고 있다. 하지만 지금까지의 개별적 자원관리 정책은 자원의 희소성 및 공급 불안정에 대응하기에는 많은 한계점을 가지는 것으로 나타났다.

우리나라의 농업부문 역시 생산구조 및 여건변화로 통합적 농업자원관리의 필요성이 증대되고 있다. 이에 본 연구는 농업 정책의 설계 및 평가에서 자원 간의 상호 연관성을 고려한 통합적 접근을 위해 진주 단목지구를 대상으로 한 세 가지 정책 시나리오에 따른 영향을 평가하였다.

시나리오 분석결과 비순환식수막재배 시설 설치비 용자확대(시나리오 1)는 시설 설치 시 자본이자가 시설의 감가상각비에 비해 상대적으로 매우 작아 농가의 작목전환에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다. 지하수 함양사업에 따른 가용용수량 증가(시나리오 2)는 호박의 비순환식수막재배 시설 설치를 증가시키는 것으로 나타났다. 하지만 다른 작목의 재배면적에는 큰 영향이 없는 것으로 분석되었다. 마지막으로 농업부문 면세유나 전기료 혜택 감소에 따른 농가의 에너지비용이 50% 증가(시나리오 3)하면 수막재배를 사용하지 않은 시설고추의 재배면적은 감소하나 시설호박의 재배면적은 이와 반대로 증

가하는 것으로 추정되었다. 따라서 정부의 서로 다른 세 가지 정책은 농가의 소득이나 농가의 자원 활용에 의도치 않은 결과를 미치는 것으로 나타났다.

한편, 시나리오 1과 2를 비교했을 때, 정책에 따른 농가 수입은 비슷하나, 시나리오 2의 경우 농가의 지하수 의존도를 높이기 때문에 지하수 부족에 따른 농가들의 취약성이 증가할 수도 있다. 이는 정부 정책의 의도치 않은 결과로 인해 농가의 환경변화에 대한 취약성과 소득 역시 영향을 받을 수도 있다는 것을 의미한다. 이러한 분석결과는 농업부문 역시 통합적 자원관리를 위해 넥서스적 접근법의 적용이 필요함을 시사한다.

비록 본 연구에서 사용한 농업부문모형이 품목전환에 따른 눈에 보이지 않는 비용을 모형 안에서 통제하였다 하더라도, 본 연구의 분석결과는 자료의 완전성 측면에서 많은 한계점을 가진다. 구체적으로 단목지구 농가들에 대한 농가수준 자료(farm-level data)와 수막시설 설치로 인한 에너지 사용량 변화 등의 자료 부재는 향후 추가적인 자료 구축이 반드시 필요한 부분이라 생각된다.

본 연구에서의 정책 시나리오는 진주단목지구에서 현재 시행되고 있는 물, 에너지 관련 정책들만을 바탕으로 하였다. 하지만 향후 농업부문의 통합적 자원관리를 위해서는 보다 광범위하고 다양한 정책 시나리오의 구성과 적용이 필요할 것으로 생각된다.

우리나라는 지속가능성 혹은 농업자원관리를 위한 농가수준 자료가 매우 부족하다. 또한, 농가 수준의 자료가 존재한다고 하더라도 자료 간의 시간적·공간적 불일치로 인해 자료들을 결합(merging)하는데 큰 어려움이 있다. 결국, 이러한 자료의 제약은 본 연구뿐만 아니라 향후 농업자원관리를 위한 물-에너지-식량 넥서스 적용의 걸림돌로 작용할 것이며, 물-에너지-식량 넥서스의 적용을 위해 시급히 해결해나가야 할 문제라고 생각된다.

광열비를 근사하기에는 한계가 있다. 이에 따라 본 논문에서는 『진주단목지구 지하수함양사업 기본 조사 및 세부설계』를 바탕으로 에너지 비용이 1/20로 감소한다고 가정하였다.

- 주4) 농촌진흥청의 지역별 농산물소득자료는 시도를 기준으로 하고 있어 단목지구의 생산비 특징을 잘 반영하지 못하는 한계를 가지고 있다. 이러한 자료 부족은 본 연구의 한계점이다.
- 주5) 구체적으로 비순환식 수막 설치비용은 1750천원/10a로 설정하였으며(<http://www.참좋은냉장고.kr>), 내구연수는 10년으로 설정하였다. 마지막으로 농업기계 구입지원 사업으로 설치비용의 80%는 이자율 3%를 적용하였다.
- 주6) 본 연구의 시나리오들은 현재 시행되고 있는 진주단목지구의 시설농가 관련 정책 중 물과 에너지 사용과 관련된 정책을 중심으로 구성하였다. 다만, 공간의 한계로 인해 각각 정책에 대한 다양한 시나리오 결과를 제시하지 못하였으며, 이는 본 연구의 한계점에 속한다.

이 성과는 2018년도 정부(농림축산식품부)의 재원으로 농촌진흥청의 지원을 받아 수행된 연구임 (PJ013435042018).

References

1. Allouche, J., Middleton, C. and Gyawal, D., 2014, Nexus Nirvana or Nexus Nullity? A dynamic, STEPS Working Paper, Volume 63.
2. Choi, J. Y., 2017, "Sustainable resource management through water-energy-food nexus.", *World Agriculture* 206:1-18.
3. FAO, 2012, WORLD AGRICULTURE TOWARDS 2030/2050, Rome: FAO of the UN.
4. FAO, 2014a, The Water-Energy-Food Nexus: A new approach in support of food security and sustainable agriculture, Rome: FAO of the UN.
5. FAO, 2014b, Walking the Nexus Talk: Assessing the Water-Energy-Food Nexus in the context of the sustainable Energy for all Initiative, Rome: FAO of the UN.
6. Greenhouse Gas Inventory and Research center, 2017, 2017 National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea.
7. Hoff, H., 2011, Understanding the Nexus, Stockholm, Stockholm Environmental Institute.
8. Hong, J. H., 2015, "Water-Energy-Food Nexus", Magazine of Korea Water Resource Association: Water for Future, 48(11):50-55.
9. Howitt, R. E., 1995, "Positive Mathematical

주1) FAO(2014b)와 IRENA(2015)는 현재 개발된 넥서스 평가 틀들의 특징 등을 정리하였다.

주2) 진주 단목지구 용수 및 토지이용 실태조사에 따르면, 한 농가가 다수의 시설 하우스와 관정을 가지고 있는 경우, 지하수를 지하수가 부족한 시설 하우스로 이동시켜 사용하는 것으로 나타났다. 또한, 현장조사 결과, 강한 유대관계가 있는 농가 간에는 지하수를 공유하는 것으로 조사되었다. 이는 진주단목지구 용수 및 토지이용 실태조사의 지하수 사용량이 총 지하수 사용량이라는 가정을 뒷받침하는 하나의 추가적인 근거가 된다.

주3) 『진주단목지구 지하수함양사업 기본 조사 및 세부설계』에 따르면 비순환식수막제배시설은 시설운영에 오직 전기만을 사용한다. 하지만 비록 경남지역의 2016년 농가소득자료에는 농가의 유류 및 전기 사용량과 영농광열비에 관한 자료가 있으나, 면세유 가격과 농업용 전기가격을 바탕으로 농가소득자료집의 영농

- Programming.”, *American Journal of Agricultural Economics*, 77: 329-342.
10. IEA, 2011, *Technology Roadmap Biofuels for Transport*, Paris, International Energy Agency.
 11. IPCC, 2014a, “Chapter 3. Freshwater Resources”, in *climate change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: 229-269.
 12. _____, 2014b, “Chapter 7. Food Security and Food Production System”, in *climate change 2014: Impact, Adaptation, and Vulnerability*: 485-553.
 13. _____, 2014c, “Chapter 10. Key Economic Sectors and Services”, in *climate change 2014: Impact, Adaptation, and Vulnerability*: 659-706.
 14. IRENA, 2015, *Renewable Energy in the Water, Energy & Food Nexus*, International Renewable Energy Agency.
 15. Jang, S, H., 2015, “The Overview of Water-Energy-Food Nexus Technology to Respond to Resource Crisis and Lead the Water Industry”, *Magazine of Korea Water Resource Association: Water for Future*, 48(11):24-31.
 16. Kim H., Yoon S., Cho E., & Kim J., 2015, *A study on Policy Directions for the Water-Food-Energy Nexus (I) : Water-Energy Nexus*. Korea Environment Institute.
 17. Kim, S. J., Jung, C. G., Lee, J. W., 2017, “Water-Energy-Food Nexus: Opportunity to create the water industry as a social infrastructure remodeling and new national growth engine”, *Magazine of Korea Water Resource Association: Water for Future*, 50(8):54-64.
 18. Kling, C., et al., 2016, *Research needs and challenges in the FEW system: coupling economic models with agronomic, hydrologic, and bioenergy models for sustainable food, energy, and water systems*, Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University.
 19. Korea Rural Community Corporation, 2017, *Basic Investigation and Detailed Design for Groundwater Reclamation Project*.
 20. Laspidou, C., et al., 2017, D1.1: Scientific inventory of the Nexus, SIM4NEXUS.
 21. Lee, E. R., Choi., B. M., Chae, H. S., Jung, Y. H., Park, J. E., 2015, “Identify strategies and systems for a sustainable water-energy-food nexus”, *Magazine of Korea Water Resource Association: Water for Future*, 48(11):42-49.
 22. Lee, S. H., Choi, J. Y., 2015, “Trends in development and research of water-energy-food nexus in terms of sustainable development and food security.”, *Magazine of Korea Water Resource Association: Water for Future*, 48(11):32-41.
 23. Lim, K. J., 2018, “Nexus Approach from Food and Agricultural Perspective”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 66(6):26-31.
 24. Mérel, P., and R.E. Howitt, 2014, “Theory and Application of Positive Mathematical Programming in Agriculture and the Environment.”, *Annual Review of Resource Economics*, 6(1): 451-470.
 25. Muller, M., 2015, “The ‘nexus’ as a step back towards a more coherent water resource management paradigm.”, *Water Alternatives* 8(1): 675-694.
 26. OECD, 2012, “Chapter 5. Water.” in *ENVIRONMENTAL OUTLOOK TO 2050: The consequences of Inaction Key Findings on Water*, OECD publishing. <<http://dx.doi.org/10.1787/9789264122246-en>>
 27. OECD, 2015, *Economic Impacts of the Land-Water-Energy Nexus: A joint OECD/PBL report on exploring the feedbacks of bottlenecks in the nexus on the global economy*, EVN/EPOC(2015)25, Environment Directorate/Environment Policy Committee, OECD.
 28. Paris, Q., 2011, *Economic foundations of symmetric programming*, Cambridge University Press.
 29. Park, K. W., Kwon, O. S, 2011, “Analyzing the Impacts of Climate Change on Korean Agricultural Sector Using a Recursive Positive Mathematical Programming Approach,” *Journal of Korean Agricultural Economics*, 52(2), 51-76.
 30. Park, K. W., Kwon, O. S., Kim, K. S., 2015, “The Regional Impacts of Climate Change on Korean Agriculture: A Positive Mathematical Programming Approach”, *Korean Journal of Economic Studies*, 63(1), 61-91.

31. Piesse, J., Thirtle, C., 2009, "Three bubbles and a panic: An explanatory review of recent food commodity price events.", *Food policy*, (34): 119-129.
32. Rural Development Administration, 2016, *Agricultural and Livestock Production Cost Survey*.
33. Rural Development Administration, 2016, 2016 *Agricultural Science and Technology Economic Analysis Criteria*.
34. Schlenker, W., and Lobell, D.B. 2010. "Robust negative impacts of climate change on African agriculture", *Environmental Research Letters*, 5: 1-8.
35. Sinjin Energetech, <http://www.참좋은냉장고.kr>.
36. WEC, 2015, *World Energy Scenarios: Composing energy futures to 2050*, London, World Energy Council.
37. World Bank, 2017, *Energy use*, <http://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.PCAP.KG.OE?end=2013&start=1971&view=chart>:

-
- Received 3 September 2019
 - First Revised 15 October 2019
 - Finally Revised 21 October 2019
 - Accepted 18 November 2019