



물-에너지-식량-토지 넥서스를 통한 미래 쌀 수급 변화에 따른 자원별 이용량 변화 분석

Assessment of the Impacts of Rice Self-sufficiency on National Resources in Korea through Water-Energy-Food-Land Nexus Approach

이상현* · 최진용** · 유승환***,† · 허승오****

Lee, Sang-Hyun · Choi, Jin-Yong · Yoo, Seung-Hwan · Hur, Seung-Oh

Abstract

The aim of this study is to apply the Water-Energy-Food-Land Nexus approach which can analyze the trade-offs among resources, and assess the holistic impacts of food security. First, we applied rice as a study crop and analyzed the trend of consumption of rice and the area of paddy fields. Second, the portfolios of water, energy, and land for rice production were constructed using data of footprints and productivity. Finally, the self-sufficiency ratio (SSR) of rice in target year was set as food security scenario and assessed the impacts of food security on water, energy, and land availability. In 2030, the SSR of rice decreased to 87 %, and water use for producing rice decreased from 4,728 to 3,350 million m³, and the water availability index increased from 0.33 to 0.53. However, food security is essential issue and we set the 50 % and 100 % SSR of rice as high and low food security scenarios. For 100% SSR in 2030, about 3,508 million m³ water was required and water availability index reached to 0.5. In other words, there is the trade-off between food security and water-energy-lands availability. Therefore, it is difficult to make a decision whether a high level of SSR is better or worse. However, this study showed the both positive and negative impacts by change of food security and it can be useful for setting the policy decision considering both food security and sustainable resource management at the same time.

Keywords: Food security; Korea; resource availability; rice; self-sufficiency; water-energy-food-land nexus

1. 서 론

물, 식량, 에너지 안보는 현재 전 세계적으로 중요한 이슈로 급부상하였고, 수많은 국제적 의제와 고위급 회담의 주제로서 물, 식량 및 에너지 안보의 위험성이 제기되고 있다. 특히, 물과 식량 안보는 발생 가능성과 영향력이 큰 10대 글로벌 위험요인 중에 4개의 항목과 직·간접적으로 관련되어 있다 (World Economic Forum, 2015). 2015년 9월 UN 총회에서는 2000년에 발표되어 진행되어온 MDGs(Millennium Development Goals)를 평가하고 2030 목표로서 총 17개의

SDGs (Sustainable Development Goals)를 새롭게 제안한 바 있으며, 이 중 II. Zero Hunger, VI. Clean Water and Sanitation, VII. Affordable and Clean Energy, XIII. Climate Action은 물-에너지-식량 자원과 직접적인 관련이 있다. 특히, 식량과 물 안보는 연관성이 높기 때문에 식량 생산 및 소비와 연계하여 물 안보의 위험성을 살펴볼 필요가 있다. 예를 들어 기후변화에 따라 수자원 이용가능량의 변동성이 커지고, 농업 가뭄이 심각해짐에 따라 토양수분 이용의 취약성이 증가할 수 있고 (Dai, 2013), 이는 작물의 생산성에 영향을 미칠 수 있다. 식량 안보를 위해서는 모든 식량작물을 국내 생산량으로 대체하는 것이 가장 좋은 방법이지만 국내 생산 증가는 물, 에너지, 토지 등의 자원들의 추가적인 이용을 수반한다. 따라서 지속가능한 자원 관리를 위해서는 식량자급율 증진 등의 안정적인 식량 안보를 위한 정책들을 물, 에너지, 토지 이용 등의 관점에서 평가할 필요가 있다.

이에 따라 2011년 Bonn conference에서는 물, 식량, 에너지 안보간의 상호작용을 통한 의사결정이 필요함을 강조하였고, 2012년 Rio+20 UN conference에서도 물, 식량 안보와 지속가능한 농업과의 연계성의 중요성을 강조한 바 있다. 자원들 간의 상호작용을 통합적으로 고려할 수 있는 시스템에 대한 요구에 따라 물-에너지-식량 넥서스의 개념이 거론되었고, 이에 대

* Department of Biological and Agricultural Engineering, Texas A&M University

** Department of Rural Systems Engineering, and Research Institute for Agriculture & Life Sciences, Seoul National University

*** Department of Rural and Bio-Systems Engineering, Chonnam National University

**** Climate Change & Agroecology Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration

† **Corresponding author**

Tel.: +82-62-530-5182 Fax: +82-62-530-2159

E-mail: yoosh15@jnu.ac.kr

Received: December 28, 2017

Revised: June 12, 2018

Accepted: June 26, 2018

한 다양한 연구가 진행되고 있다 (Flammini et al., 2017; Mohtar and Daher, 2012; OECD-FAO, 2013). World Economic Forum에서는 water security와 관련하여 기후, 인구, 교역 등의 다양한 주제와 각 주제들을 통합적으로 고려할 수 있는 새로운 의사결정지원 시스템으로서 ‘Water-Food-Energy-Climate Nexus’를 제시하고 있으며, UN의 World Water Development Report (UN, 2014)에서는 농업분야를 중심으로 식량수요가 물과 에너지에 미치는 영향을 분석하고, 에너지 생산을 위해 사용되는 물과 식량 안보와의 관계를 분석하는 연구를 수행한 바 있다. 또한 International Renewable Energy Agency에서는 신재생에너지의 사용이 물과 식량 안보에 미치는 영향을 넥서스 개념을 적용하여 분석한 바 있다 (Ferroukhi et al., 2015). 물, 에너지, 식량을 주 자원요소로 구성된 넥서스 연구 외에도 토지 및 기후변화, 인구변화 등을 고려하는 확장된 넥서스에 관한 연구도 진행되고 있다. OECD는 토지-물-에너지 넥서스의 생물물리학적·경제적 중요성에 대한 연구에서 환경서비스 기능 평가, 토지-물-에너지 자원간의 연계성 (Trade-off)을 분석하며 토지이용을 넥서스의 주요 한 축으로 설정한 바 있다.

이와 같은 넥서스의 개념 및 구성요소들에 대한 기초연구를 바탕으로 현재는 다양한 기관 및 연구자들에 의해 넥서스 플랫폼 개발에 관한 연구가 수행되고 있다. 그중에서 CLEW (Climate, Land-use, Energy and Water) 모형은 에너지 밸런스와 식량 생산을 위한 에너지량, 수자원 밸런스와 식량 생산을 위한 관개량, 에너지 생산을 위한 수자원량 등을 결과로 도출하며, 식량 부문에 있어서 비료사용량이나 농기계사용량 등을 고려할 수 있다는 특징이 있다. Stockholm Environment Institute (2013)에서 개발한 WEAP-LEAP (Water Evaluation and Planning, Long-range Energy Alternatives Planning System)은 수자원 및 에너지 계획을 위해 개발된 도구를 결합한 모형으로, 에너지 모형을 중심으로 구성되어 있다. 입력 자료로 에너지 기술과 관련한 많은 기술적, 경제적 자료를 요구하고 있으며, 출력자료는 에너지 밸런스와 그 세부사항으로 에너지 수요, 변전량 및 공급현황 등을 제공한다. 수자원에 대해서도 상세한 공급량과 수요량을 모의하며, 지하수, 수질, 저류량, 수력발전량 등의 관련 정보도 제공한다. WEF Nexus Tool 2.0은 미국 텍사스 대학에서 개발된 도구로서, 기존 모형의 한계를 극복하기 위해서 개발된 플랫폼형 모형이다. 의사결정을 돕기 위한 시나리오 기반의 분석이 가능하나, 분석과정에서 자원간의 흐름을 단일화하여 분석하고 있으며, 최대 임계치 및 상호 피드백 작용에 대한 고려는 부족한 것으로 사료된다.

국내에서는 물-에너지-식량 넥서스 기술의 정의와 전략적 필요성에 대해서 정책적 보고서 수준에서 연구된 바는 있으나 아직 통합적인 자원관리에 대한 넥서스 시스템 구축과 관련된

연구는 미흡한 실정이다. 그러나 개별 자원들의 연계를 고려한 자원관리 방안에 대한 연구는 다양하게 수행된 바 있다. 예를 들어 Lee et al. (2015)은 식량소비 패턴의 변화에 따른 수자원 이용량의 변화를 추정하여 식량소비와 수자원 관리의 연계의 중요성을 제시한 바 있고, Yoo et al. (2016)은 식량자급율에 따른 작물별 물 사용량을 추정하여 제시한 바 있다.

우리나라는 식량 주 수입국이지만 가장 대표적인 식량작물인 쌀의 자급율을 2015년 기준 100%로 유지하고 있으며, 이와 같은 쌀의 높은 자급율을 통하여 타 작물의 식량안보 위험을 낮추는 완충효과를 기대할 수 있다. 또한 쌀 시장은 국내 농가의 주 수입을 담당하고 있기 때문에 쌀의 자급율을 유지하는 측면이 국내 전체 식량 안보와 농가의 경제 안정성을 위해서 필수적일 수 있다. 그러나 최근에 쌀의 생산량과 재배지역의 면적이 급격히 감소하고 있는데 2003년 국내 쌀 생산량은 4.9 백만톤이었으나 2010년에는 4.0 백만 톤까지 감소하였고, 2015년 생산량도 4.2 백만톤 정도만을 유지하고 있다. 즉, 최근 10년 동안 쌀 생산량은 약 0.7 백만톤 이상 감소한 것으로 나타났다. 쌀 소비량의 감소보다 생산량이 급격하게 감소할 경우 국내의 부족한 수량을 쌀 수입으로 대체하게 된다. 이러한 변화는 쌀 자급율의 감소를 의미하며 결국 식량안보에 부정적인 영향을 미칠 수 있으므로 식량 안보차원에서 자급율의 감소를 대비하기 위한 생산량 증진 등과 관련된 식량 안보 정책이 필요할 것으로 사료된다. 그러나 식량안보를 높이기 위해서는 식량 생산을 위한 물, 에너지, 토지 등이 필요하고, 이는 개별 자원들의 안보와도 직결된다. 따라서 국내의 식량 자급을 높이기 위한 방안들은 다양한 타 자원들과의 연계성 속에서 검토 및 평가될 필요가 있다.

요약하면 쌀 자급율을 통해 식량안보를 달성하기 위해서는 농업용수 외에도 에너지, 토지에 대한 복합적인 고려가 필요하며, 에너지 소비에 의한 탄소배출 역시 중요한 요소로 고려될 수 있다. 따라서 쌀 자급율 조절에 대한 통합적인 영향을 평가하기 위해서는 물-에너지-식량-토지의 연계해석이 가능한 넥서스 방법론의 접근이 필요하다. 이에 본 연구에서는 물-에너지-식량-토지 넥서스 (Water-Energy-Food-Land Nexus) 개념을 적용하여, 미래 시기의 인구, 생산량, 소비량 등의 관련 요인들의 추세를 바탕으로 쌀 자급율의 통합적인 영향을 평가하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 국내 쌀 수급 자료 수집 및 쌀 자급율 시나리오 설정

국내에서는 식량안보 증진을 위해 자급율 목표치를 설정하

고 관련 정책들이 수행된다. 특히 쌀의 경우 가장 근간이 되는 식량작물로서 자급율의 변화는 국내 총 식량안보에 큰 영향을 미칠 수 있으며, 농업용수의 상당량이 논벼재배지역에서 소비되기 때문에 수자원의 관리에도 큰 영향을 미치게 된다. 또한 논벼재배지역에서 사용되는 에너지와 이에 따른 탄소배출 역시 중요한 요소로 고려될 수 있다.

따라서 미래의 쌀 자급율 정책을 평가하기 위해서 쌀 수급 변화 분석 결과가 활용될 필요가 있다. 본 연구에서는 쌀 수급과 관련된 요인들의 경향성을 과거자료를 통하여 분석하고, 이를 바탕으로 미래시기 쌀 수급의 변화를 분석하고자 하였다. 본 연구에서는 농림축산식품부에서 연간 발행하는 농림축산식품 주요통계 자료를 활용하였고 (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2016), 과거통계자료 (1990-2015)를 바탕으로 인구, 1인당 쌀 소비량, 쌀 재배면적 시기별 변화에 대한 1차 선형회귀식을 도출하였다. 현재 2015년 데이터가 기준이 되며 과거 자료(2003-2015)를 기반으로 특정 미래 시기에 대한 요인별 추정값이 적용된다. 따라서 기존의 정책 기조를 유지한 채로 미래시기에 식량 자급율이 변화되는 추세를 분석할 수 있다.

또한 본 연구에서는 쌀의 안보가 타 자원들에 미치는 영향을 통합적으로 평가하기 위하여, 쌀 자급율 목표치를 식량안보 시나리오로서 적용하였다. 목표자급율은 목표년도인 2030

을 기준으로 상향과 하향 조정되는 것으로 설정하였다. 2030년 추정된 쌀 자급율은 약 87%이었으므로 상향치로는 100%의 자급율을 목표로 적용하였고, 하향치로는 50%를 적용하였다.

2. 쌀 자급율 관련 요인들의 연계성 포트폴리오 구축

물-에너지-식량-토지 넥서스를 통하여 쌀 자급율을 평가하기 위해서는 쌀 수급과 관련된 요인들간의 연계성을 기반으로 한 자원별 포트폴리오의 구축이 필수적이다. 자원별 포트폴리오는 식량 생산을 위한 수자원, 수자원 공급을 위한 에너지, 식량 생산을 위한 에너지 등을 포함하고 있으며, Fig. 1에 제시한 연계 모식도를 정량화한 개념이다.

본 연구에서는 물발자국을 적용하여 쌀의 국내 생산량 변화에 따른 관개용수 공급량의 변화를 산정하였다. 물발자국은 단위 생산량 당 소비되는 물의 양을 의미하며 작물중발산량, 관개필요수량, 생산량 등을 기반으로 산정되고 m/ton으로 나타낸다. 물발자국은 녹색물발자국과 청색물발자국으로 구분된다. 녹색 물발자국은 강우에 의해 공급되는 물의 양을 의미하고, 청색물발자국은 관개시설에 의해서 인위적으로 공급되는 물의 양을 의미한다. 이미 국외 연구에서는 다양한 작물의 국가별 물발자국이 제시되고 있고, 국내에서는 Yoo et al. (2014)에 의해 논벼에 대한 물발자국을 산정한 바 있다. 본

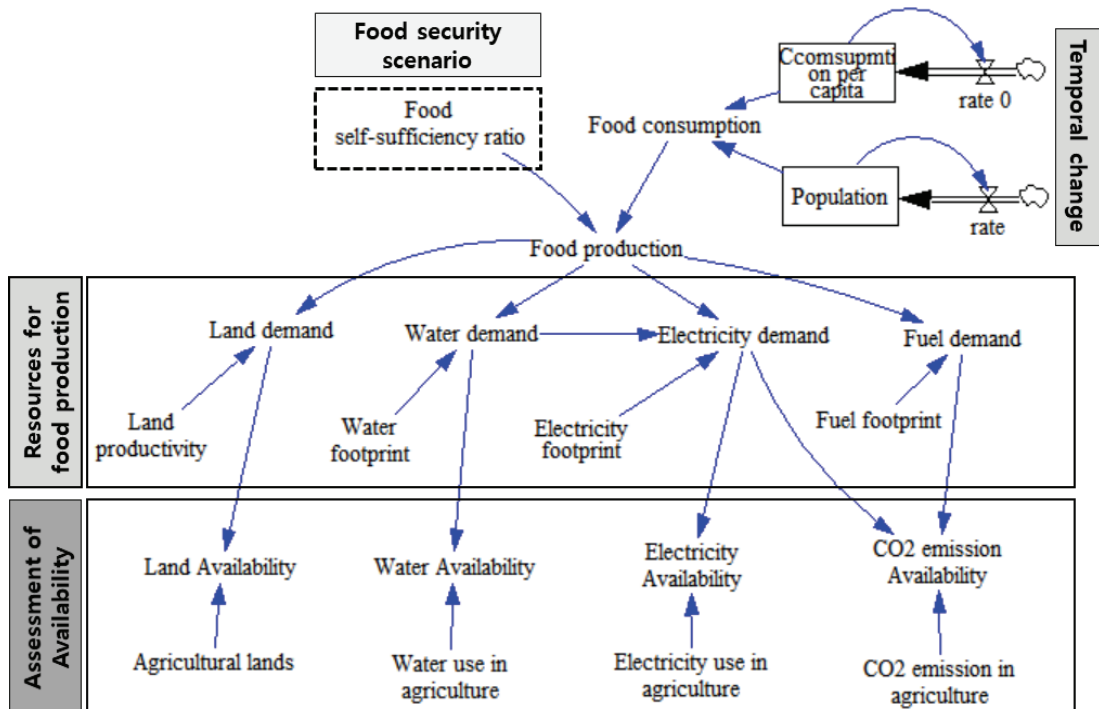


Fig. 1 Relationship among variables relating to food security

연구에서는 저수지 및 관개시설에서 공급되는 관개용수를 의미하는 청색물발자국을 적용하여 쌀 자급율 변화에 따른 관개용수 필요량의 변화를 분석하고자 하였다.

국내의 논벼는 주로 담수재배에 의해 재배되기 때문에 논벼의 물발자국을 산정할 때 담수재배에 의한 침투량과 토양 내 용수 잔여량 등을 고려해야한다. 이때 작물이 실제 소비하는 측면에서 물발자국을 산정할 경우 침투량과 토양 내 용수

잔여량은 물발자국에서 제외된다. 그러나 용수공급 측면에서 물발자국을 산정할 경우 침투량과 토양 내 용수잔여량이 포함될 필요가 있다. Yoo et al. (2014)은 소비와 공급측면에서 물발자국을 각각 산정하였는데, 본 연구에서는 공급측면에서 산정된 청색 물발자국 값을 논벼 생산을 위한 관개용수공급량 산정요소로서 적용하였다. 따라서 침투량과 토양 내 용수 잔여량을 포함한 논벼의 물발자국은 892.2 m³/ton으로 제시되었고, 논벼의 가공에 따른 쌀(백미)의 물발자국은 1114.9 m³/ton에 이르는 것으로 나타났다 (Table 1). 그러나 물발자국은 평균값의 개념이기 때문에 가뭄 및 홍수 등의 극심한 기상에 따른 관개용수량을 나타내기에는 한계가 있다.

다음으로 쌀 생산에 따른 논벼 재배지역에서의 에너지 투입량을 식량과 에너지 연계 요소로 적용하고자 하였다. 논벼 재배지역에서 투입되는 에너지는 기계 가동을 위한 전력 및 등/경유가 포함되고, 이양부터 수확까지 단계별로 에너지를 포함한다. 따라서 논벼재배지역에서의 에너지 사용량 산정은 현장조사를 통한 다양한 자료 수집을 통해서 가능한데, 현재 국내에서는 논벼재배지역에서 투입되고 있는 에너지에 대한 세부적인 자료가 부족한 실정이다. 이에 따라 논벼의 담수재배를 수행하고 있는 일본의 자료를 활용하였다 (Table 2). 일본의 연구결과에 따르면 논벼재배지역 1 ha 당 약 116 kWh의 전력과 9.3 GJ의 화석연료 에너지가 필요한 것으로 나타났다.

Table 1 Water and energy footprint, and land productivity of rice

Variables	Value	Reference
Blue water footprint of paddy rice (m ³ /ton)	892.2 (milled rice: 1114.9)	Yoo et al., 2014
Electricity use in paddy field (kWh/ha)	116.0	Association of Agriculture, 1996
Fuels use in paddy field (GJ/ha)	9.3	
Electricity use for irrigation (kWh/ha)	1200.0	Yoshida, 2011
Electricity use for drainage (kWh/ha)	824.7	
Productivity of paddy field (ton/ha)	5.05	Average during 2003 - 2015

Table 2 Direct energy consumption for rice production in the western-Kanto area in Japan (Association of Agriculture, 1996)

Seedling	Electricity 26 kWh/ha	Additional fertilizing	Blend oil 2.4 kL/ha (83 MJ/ha) Gasoline 1.4kL/ha (48 MJ/ha)
Fertilizing	Diesel 2.0 L/ha (75 MJ/ha)	Pest control	Blend oil 0.7 L/ha (24 MJ/ha)
	Gasoline 0.3L/ha (10 MJ/ha)		Gasoline 2.8 L/ha (97 MJ/ha)
Tilling	Diesel 41.0 L/ha (1545 MJ/ha)	Water management	Blend oil 40.0 L/ha (1384 MJ/ha)
	Gasoline 0.1 L/ha (3 MJ/ha)	Levee Weeding	Gasoline 2.2 L/ha (76 MJ/ha)
Puddling	Diesel 8.9 L/ha (336 MJ/ha)	Harvesting	Diesel 20.5 L/ha (773 MJ/ha)
	Gasoline 0.1 L/ha (3 MJ/ha)	Transportation	Gasoline 4.0 L/ha (138 MJ/ha)
Transportation of seedling	Gasoline 1.6 L/ha (55 MJ/ha)	Rice-drying	Kerosene 120.0kL/ha (4404 MJ/ha)
Rice-transplantation	Gasoline 4.9 L/ha (170 MJ/ha)		Electricity 90 kWh/ha (324 MJ/ha)
Herbicide application	Blend oil 0.7 L/ha (24 MJ/ha)		
	Gasoline 2.8 L/ha (97 MJ/ha)		

제시된 에너지 사용량은 논벼재배지역에서 직접적으로 사용되는 양을 의미한다. 세부적으로 살펴보면, 경작을 위해 가장 많은 에너지 (1545 MJ/ha)가 사용되는 것을 확인할 수 있다. 전력사용량만을 고려할 경우 쌀의 건조를 위해 1ha당 약 90 kWh의 전력이 사용되는 것으로 나타났다. 이러한 수치는 일본의 경우를 참조한 것이기 때문에 국내의 논벼재배지역과는 다소 차이가 발생할 수 있다. 그러나 일본 역시 담수에 의한 재배방식을 적용하므로 가장 국내와 유사한 사례로 판단된다. 논벼재배지역 내에서 직접적인 에너지 투입 외에 관개와 배수를 위해서도 에너지가 사용된다. 일본의 사례연구를 살펴보면, 일본 관서지역의 저지대 논벼재배지역의 관개를 위해서 1 ha 당 약 1200 kWh의 전력이 사용되고, 배수를 위해서는 약 825 kWh의 전력이 사용되는 것으로 분석되었다 (Association of Agriculture, 1996).

식량과 토지이용의 연계는 토지 생산성 산정을 통해서 적용하고자 하였다. 토지 생산성은 ha 당 생산량을 의미하는데 본 연구에서는 1990년부터 2013년 동안의 논벼재배지역의 쌀 생산량과 재배지역 면적을 통하여 토지 생산성을 산정하였다 (Table 1). 해당기간동안 토지생산성의 최소값은 4.52 ton/ha, 최대값은 5.54 ton/ha로 나타났다. 증가와 감소의 뚜렷한 경향이 나타나지 않았기 때문에 본 연구에서는 해당기간 동안의 평균값인 5.05 ton/ha를 토지 생산성 값으로 적용하였다.

농경지에서의 탄소배출은 에너지사용에 의해 농기계에서의 배출뿐 아니라 작물에 의해 배출되는 탄소등을 모두 포함해야하지만, 본 연구에서는 에너지 사용에 따른 직간접적인 탄소배출량을 산정하고자 하였다. 직접적인 배출은 화석연료의 사용에 따른 직접적인 탄소배출을 의미하고, 간접적인 배출은 전력 생산에 따라 배출되는 탄소로서 논벼재배지역에서 전력을 사용할 경우 전력 생산설비에서 사용량만큼의 전력을

생산하기 위해 배출되는 탄소량을 의미한다. 따라서 간접적인 탄소배출은 전력 사용지역이 아닌 전력 생산지역에 배출되기 때문에 간접적인 배출로 고려된다. 본 연구에서는 국외 연구 자료들을 기반으로 에너지원별 탄소배출량을 인용하였고, 국내의 전력을 생산하기 위한 에너지원들의 구성 비율을 적용하여 1 kWh의 전력을 국내에서 생산할 경우 배출되는 탄소량을 산출, 적용하였다 (Table 3).

3. 자원간 연계성을 고려한 자원별 정량화 방법

식량자급을 변화에 따른 자원들의 이용량을 산정하기 위하여 식량 생산 및 소비와 연관된 요인들을 추출하고 그 관계를 정량적으로 나타내었다. 예를 들어 식량생산은 식량소비와 수출, 그리고 식량자급율에 의해 결정되고, 식량생산량은 수자원 및 에너지, 토지의 이용과 연결된다. 즉, 식량 안보에 의해 결정된 식량 생산량을 달성하기 위한 다양한 자원들의 필요량이 정량적으로 산정된다. 또한 식량 생산을 위한 수자원의 이용은 용수공급을 위한 에너지 사용과도 연계된다. 즉, 에너지 이용량은 식량 생산을 위해 투입된 에너지와 용수공급을 위해 사용되는 에너지의 합계를 의미하게 된다. 그리고 이러한 에너지 이용은 탄소배출과 직결된다. Fig. 2에서 나타난 식량자급율과 자원들 간의 관계를 수식으로 나타내면 아래와 식 (1)부터 식 (7)과 같다.

$$Prod_i = SSR_{target,i} \times Con_i \tag{1}$$

$$WU_i = Prod_i \times (WF_{green} + WF_{blue}) \tag{2}$$

$$LU_i = Prod_i \times LF \tag{3}$$

$$EU_{electricity,i} = LU_i \times (EEF_{water} + EEF_{field}) \tag{4}$$

Table 3 CO₂ emission for generating electricity in Korea

Sources	CO ₂ emission by electricity sources ¹ (ton of CO ₂ /10 ⁶ kWh)	Proportion of electricity sources ² (%)	CO ₂ emission for generating electricity (ton of CO ₂ /10 ⁶ kWh)
Coal	921.0	39%	360.1
Petroleum	731.0	30%	216.4
Natural gas	506.0	1%	3.5
Nuclear	30.0	27%	8.1
Renewable	63.5	2%	1.3
Hydro-electricity	27.0	2%	0.4
Total		100%	589.8

¹ Emissions, Greenhouse Gas

² Korea Electric Power Corporation

$$EU_{fuel,i} = LU_i \times EFF \quad (5)$$

$$Indirect CO_{2i} = EU_{electricity,i} \times \sum_j^n (r_j \times CF_{electricity,j}) \quad (6)$$

$$Direct CO_{2i} = EU_{fuel,i} \times CF_{fuel} \quad (7)$$

여기서 i 는 대상작물을 의미하고, $Prod(ton)$, $Con(ton)$ 은 각 생산량과 소비량, SSR 은 자급율을 의미한다. $WU(m^3)$ 는 수자원 이용량, $WFgreen(m^3/ton)$ 과 $WFblue(m^3/ton)$ 는 각각 녹색 및 청색 물발자국, $LU(ha)$ 는 토지 이용량, $LF(ha/ton)$ 는 단위 생산량 당 토지이용, $EU_{electricity}(kWh)$ 는 에너지 이용량, $EEFwater(kWh/ha)$, $EEFfield(kWh/ha)$ 는 각각 단위면적당 수자원 공급을 위해 사용되는 전력과 재배지역에서 사용되는 전력을 의미한다. $EU_{fuel}(GJ)$ 은 화석연료 사용량을 의미하고, $EFF(GJ/ha)$ 는 단위면적당 사용되는 화석연료를 의미한다. $Indirect CO_2(ton\ of\ CO_2)$ 와 $Direct CO_2(ton\ of\ CO_2)$ 는 각각 전력생산에 의해 발생하는 탄소와 화석연료를 사용함에 따라 발생하는 탄소를 의미하고, $CF_{electricity}(ton\ of\ CO_2/kWh)$ 와 $CF_{fuel}(ton\ of\ CO_2/GJ)$ 은 각각 단위전력 생산 및 단위화석연료 사용당 탄소배출량을 의미한다. 그리고 r 은 $1kWh$ 의 전력을 생산하기 위해 국내에서 이용되는 에너지원(j)들의 비율을 의미한다.

4. 최대이용가능량을 통한 자원별 이용가능지수 산정

자급율의 변화에 따라 동일한 양의 자원이용 및 절약이 발생할지라도 전체 자원에 미치는 영향은 달라질 수 있다. 즉, 수자원 이용량이 상당량 증가할지라도 충분한 가용수자원이 확보되어 있을 경우 해당 이용량의 증가가 수자원 관리에 미치는 영향은 크지 않을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 자원별 최대이용가능량을 이용하여 자원별 이용가능지수를 산출하여 자급율 변화의 영향을 분석하고자 하였다. 이에 따라 산정된 자원 이용량은 자원별 최대이용가능량과 연결되고, 이를 통하여 자원이용가능성을 판단하게 된다. 이때 특정 자급율을 최적값으로 제시하기 보다는 사용자가 설정하는 자급율을 달성하기 위해 필요한 자원량을 정량적으로 분석하고, 시나리오들을 지속가능성 관점에서 비교하는 것이 핵심 기능이다.

따라서 본 연구에서는 개별 자원별로 이용가능성 지수를 산출하였는데 이는 시나리오별 자원 이용량이 최대이용가능량에 도달하는 정도를 수치로 나타낸 것이다. 즉, 최대이용가능량이 적은 자원의 경우 자원이용량이 소폭 증가하더라도 자원 관리에 미치는 영향은 타 자원에 비교하여 클 수 있다.

본 연구의 자원별 이용가능성 지수는 아래와 식 (8)과 같이 산정된다.

$$RAI_r = \frac{Max_r - Sim_r}{Max_r} \quad (8)$$

RAI 는 자원(r)별 이용가능지수 (resource availability index)를 의미하고, Max 는 최대이용가능량, Sim 은 모의된 자원별 이용량을 의미한다.

자원이용가능량 지수가 0에 가까울수록 이용가능한 자원의 양이 줄어드는 것을 의미하므로 자원 안보에 위협성이 높아질 수 있다. 만약 이용가능성 지수가 0보다 작을 경우는 이미 최대이용가능량보다 많은 양을 사용하는 것을 의미하므로 자원 안보를 위한 긴급한 대책이 필요하다. 탄소배출의 경우 배출최대허용량이 최대이용가능량을 의미하게 되므로, 탄소의 배출이 적을수록 이용가능지수(탄소배출허용가능지수)는 1에 가까워지게 된다. 이용가능지수의 가장 중요한 요소는 최대이용가능량이고, 대상지역에 대한 자원별 최대이용 가능량에 대한 추정이 필요하며, 이는 정책적인 측면을 통하여 설정될 수 있고, 또는 지역적인 특징을 반영하여 설정될 수 있다.

본 연구에서는 국내 농업부분 수자원 및 에너지 이용량, 농업지역 면적, 농업부분 탄소배출량(Table 4)을 자원별 최대이용가능량으로 가정하였고, 이를 통하여 쌀 자급율 변화에 따른 자원별 이용가능지수를 산출하고자 하였다.

Table 4 Assumption of maximum (or target) capacity of resources

Variables	Maximum (or target) capacity	
Water (million m ³)	7,084	Annual water use in agriculture
Electricity (10 ⁶ kWh)	9,270	Annual electricity use in agriculture, forestry and fishery
Land (1000 ha)	1,679	Agricultural area in 2015
CO ₂ emission (1000 ton)	21,738	Annual CO ₂ emission in agriculture

III. 결과 및 고찰

1. 쌀 소비 및 재배면적의 시계열 변화를 통한 미래 쌀 수급 변화 분석

국내 인구 증가 추세를 살펴보면 2003년부터 지속적으로

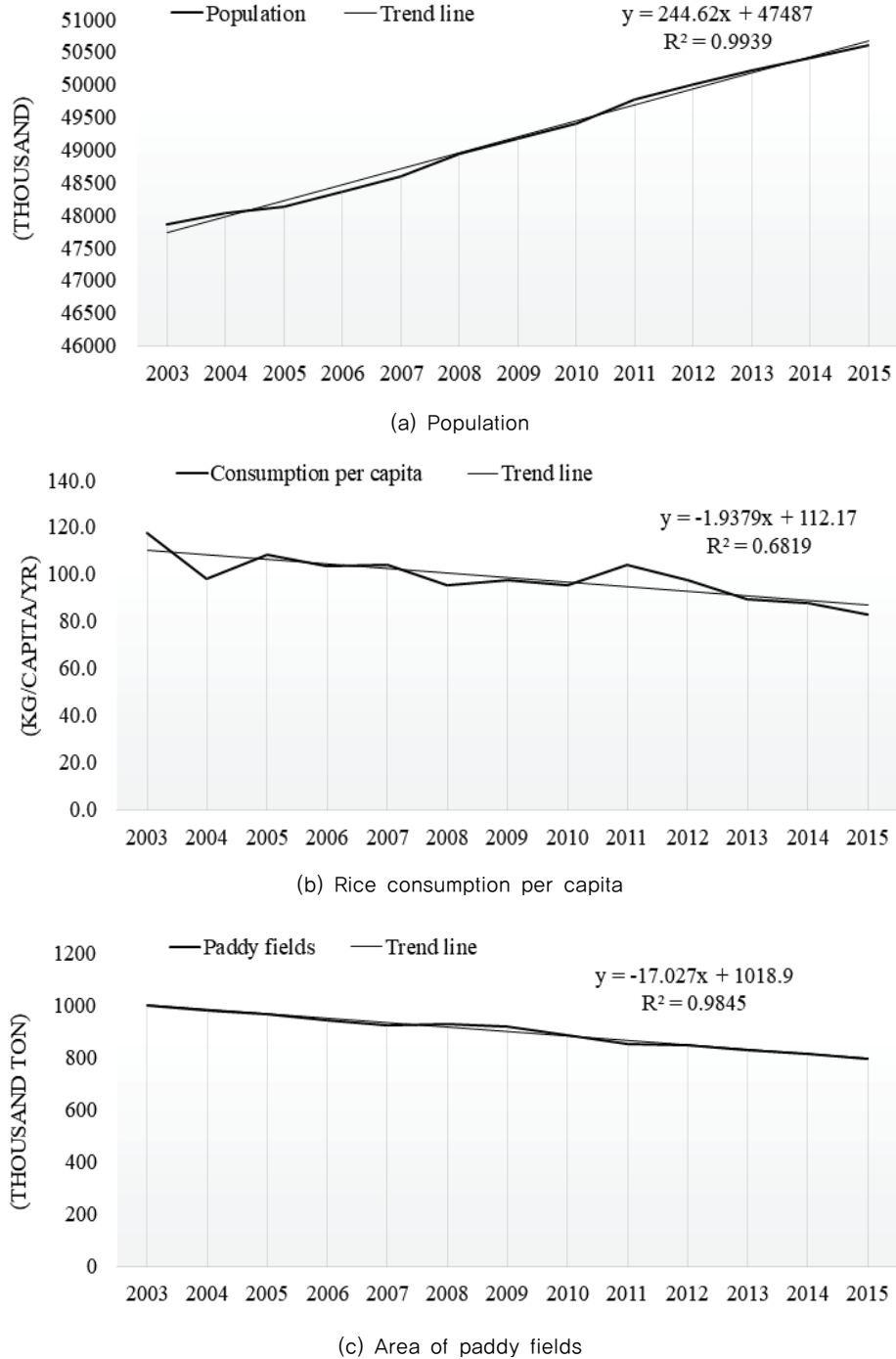


Fig. 2 Trends of variables about rice production and consumption from 2003 to 2015

인구가 증가하는 것으로 나타났고, 2015년에는 약 5천 60만에 이르렀다 (Fig. 2 (a)). 중요한 점은 이러한 증가추세가 미래에도 계속 이어질 것으로 분석되었고, 이는 결국 총 쌀 소비량에도 영향을 미칠 수 있다. 1인당 쌀 소비량은 2003년에는 117.6 kg 이었으나 2015년까지 지속적으로 감소하는 추세를 보여주고 있다 (Fig. 2 (b)). 2015년에 1인당 쌀 소비량은 83.0 kg까지

감소한 바 있다. 이와 같은 소비량의 감소는 오히려 식량안보를 증가시킬 수 있으나 쌀 생산에 의한 농가소득은 감소하는 부정적인 영향도 미칠 수 있다. Fig. 2 (c)를 보면 2003년 논벼 재배지역은 약 1.0 백만 ha 이었으나 2015년에는 0.78 백만 ha로 약 20% 이상 감소한 것으로 나타났다. 이러한 논 재배지역의 감소는 생산량 감소로 직결된다.

2. 쌀 수급 변화에 따른 물-에너지-토지 이용량 및 탄소배출량 산정결과

Table 5는 기준연도인 2015년과 목표연도인 2030년의 인구, 쌀 소비량, 생산량, 수입필요량 및 물과 에너지 사용량, 에너지 소비에 따른 탄소배출량 등의 정량적인 결과를 보여 준다. 2030년 인구는 54 백만 명으로 증가할 것으로 분석되었고, 1인당 쌀 소비량도 2015년 83 kg에서 2030년에는 58 kg까지 감소할 것으로 나타났다. 이에 따라 총 쌀 소비량은 약 3 백만톤으로 감소할 것으로 추정된다. 쌀 생산량 역시 지속적인 감소추세를 보이고 있는데 2015년 쌀 생산량은 4.2 백만톤이었으나 2030년에는 3.0 백만톤으로 약 30% 이상 감소하는 것으로 나타났다. 소비량의 감소보다는 증가량의 감소율이 더 크기 때문에 2030년 쌀 자급율은 87%로 낮아질 것으로 예상되었다. 따라서 쌀의 국내 수급에 대한 정책적인 지원이 없을 경우 식량안보 차원에 심각한 문제가 발생할 여지가 있으며 식량 안보 차원에서 쌀의 자급율을 상향 조정하는 정책이 필요할 수 있다.

Table 5 Simulation of variables in 2015 and target year (2030)

Year	2015	2030
Population (million)	51	54
Consumption per capita (kg/capita/yr)	83	58
Consumption (1000 ton)	4199	3147
Production (1000 ton)	4241	3005
Requirement of import (1000 ton)	394	909
Food self-sufficiency ratio (%)	101%	87%
Water use (million m ³)	4728	3350
Electricity use (10 ⁶ kWh)	1708	1161
Fuel use (1000 GJ)	7421	5042
Land use (1000 ha)	798	542
Indirect CO ₂ emission (1000 ton)	1008	684
Direct CO ₂ emission (1000 ton)	564	383

쌀의 생산량 감소는 식량안보의 위협을 초래할 수 있으나 다른 측면에서 살펴보면 줄어든 국내 생산량으로 인하여 쌀 생산에 필요한 물, 에너지가 절약되고, 논벼재배지역이 타 용도로의 토지이용으로 이용될 수 있는 상충효과가 나타날 수

있다. 2015년에 추정된 쌀 생산에 따른 물, 에너지 사용량을 살펴보면 약 4728 백만m³의 수자원이 사용되었고, 2030년에는 생산 감소에 의해서 약 3350 백만m³의 수자원만이 사용되는 것으로 나타났다. 따라서 약 1378 백만 m³의 수자원이 절약될 수 있다. 에너지의 경우 2015년에는 1708 백만kWh의 전력이 논벼 재배지역에서 사용되었으나 2030년에는 547 백만 kWh 감소한 1161 백만kWh의 전력이 사용될 것으로 추정되었다. 에너지 사용량의 감소에 따라 총 탄소배출량 역시 2015년 1572 천톤에서 2030년에 1067 천톤으로 감소하는 것으로 추정되었다. 또한 논벼재배지역이 2015년 798 천ha에서 2030년에는 542 천ha로 감소하였고 이에 따라 약 256,000 ha의 논벼재배지역이 타 용도로 전환이 가능할 것으로 나타났다.

3. 쌀 자급율에 따른 자원별 이용가능지수 변화 분석

Table 6은 각각의 목표자급율에 따른 자원들의 소비량을 정량적으로 추정된 결과이다. 2030년 쌀 자급율을 100%로 상향 조정할 경우 약 3,508 백만m³의 수자원이 사용되고, 이는 2030년 기준 약 158 백만m³의 수자원이 추가적으로 필요한 것을 의미한다. 전력 및 화석연료 사용 역시 증가하게 되는데 목표자급율 100% 달성을 위해 2030년 기준 약 1,334 백만 kWh의 전력에너지와 5,794 천 GJ의 화석연료 에너지가 필요한 것으로 추정되었다. 토지이용의 경우 2013년 대비 2030년에는 약 256 천ha의 논재배지역이 감소하였으나 자급율 100% 달성을 위해서는 추가적으로 81 천ha의 논재배지역이 필요한 것으로 나타났다. 따라서 목표자급율을 고려할 경우 논재배지역의 감소를 완화하는 정책적인 지원이 필요하며 그렇지 않을 경우 토지이용이 타 용도로 전환된 논 외에 추가적인 논 조성이 필요하게 된다. 탄소배출은 전력 및 화석연료 사용과 직접적으로 관련되기 때문에 목표자급율 100% 달성을 위해 에너지 사용이 증가함에 따라 직간접적인 탄소배출이 383 천톤에서 440 천톤으로 증가할 것으로 분석되었다.

그러나 목표자급율을 50%로 하향조정할 경우 물-에너지 자원 사용의 감소와 탄소배출의 감소 효과를 발생시킬 수 있다. 즉, 2030년 자급율을 50%로 조정할 경우 2030년 기준으로 약 1,596 백만m³의 수자원과, 494 백만kWh의 전력, 2,145 천GJ의 화석에너지를 절약할 수 있고, 291 천ha의 논재배지역의 타 용도 전환이 가능할 것으로 추정되었다. 탄소배출 역시 163 천톤 줄어드는 것으로 나타났다. 그러나 자급율이 50%로 낮아짐에 따라 추가적인 쌀 수입이 발생하고, 핵심 식량자원인 쌀의 수급에 어려움이 발생할 수 있다. 특히, 낮은 자급율을 다시 상향시키기 위해서는 앞서 제시한 바와 같이 자원들의 추가적인 사용을 수반하기 때문에 자급율 조정은 신중할 필요가 있으며 통합적인 관점에서 분석, 평가할

Table 6 Simulation of resources by scenarios about food self-sufficiency of rice in 2015 and target year (2030)

Scenarios	BAU	Scenario #1	Scenario #2	Scenario #3
Target year	2015	2030	2030	2030
Self-sufficiency ratio (%)	101 (simulated value)	87* (simulated value)	100** (Target value)	50** (Target value)
Water use (million m ³)	4728	3350	3508	1754
Electricity use (10 ⁶ kWh)	1708	1161	1334	667
Fuel use (1000 GJ)	7421	5042	5794	2897
Land use (1000 ha)	798	542	623	312
Indirect CO ₂ emission (1000 ton)	1008	684	787	393
Direct CO ₂ emission (1000 ton)	564	383	440	220

*The Self-sufficiency ratio calculated by projected production and consumption

**The target self-sufficiency for food security by user

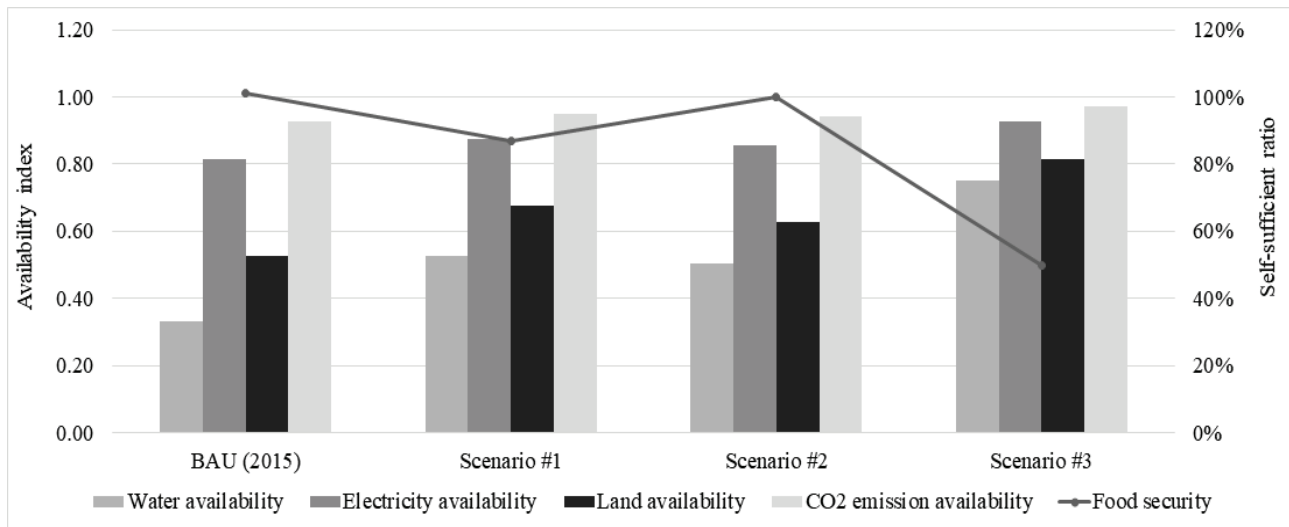


Fig. 3 Resource availability indices (RAI) by rice self-sufficiency scenarios

필요가 있다.

본 연구에서는 설정된 최대이용 가능량을 통하여 자원별 이용가능지수를 산출하게 된다. 이러한 경우 최대이용 가능량은 사용자 또는 정책에 관련된 최대이용 목표치의 개념으로 접근하게 된다. 즉, 특정 정책들에 의해 개별 자원의 한계 이용량을 설정하고, 설정된 값이 최대이용 가능량으로 적용될 수 있다. Fig. 3은 자원별 이용가능지수 결과를 나타낸 것으로서 2015년 BAU 시나리오에서 수자원 이용가능지수는 0.33이었으나 2030년에는 생산량 감소로 인하여 수자원 이용가능지수가 0.53로 증가하는 것으로 나타났다. 토지이용에 대한 이용가능지수 역시 0.52에서 0.68로 증가하였다. 이는 2030년은 식량안보 부분은 취약해질 수 있으나 수자원과 토지이용 부분에서 상당량의 지속가능한 관리가 가능할 것임을 의미한다. 전력 이용가능지수는 0.82에서 0.87로 증가하였

는데 생산량 감소가 전력부분에 미치는 영향력이 수자원 및 토지이용과 비교하여 작은 것으로 판단된다. 2030년 쌀 자급율을 100%로 조정할 경우, 생산량의 증가 때문에 자원별 이용가능지수는 감소하게 된다. 이때 수자원 이용지수는 0.50까지 감소하게 되지만 쌀 자급율 조정이 없는 2030년의 수자원이용가능지수 0.53과 비교할 때, 전체 수자원에 이용에 미치는 영향을 크지 않을 것으로 판단된다. 쌀 자급율을 50%로 조정할 경우 상당량의 자원절약이 발생하게 되는데 수자원과 토지이용지수는 각각 0.75와 0.81까지 증가하는 것을 확인할 수 있다. 탄소배출의 경우 쌀 자급율 변화에 의해 논벼 지역에서 발생하는 탄소배출량을 농업전체에서 발생하는 탄소배출량과 비교할 때 그 양이 상당히 적기 때문에 자급율 변화에 따른 탄소배출허용가능지수의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다.

IV. 결론

미래 기후변화에 따라 농업가뭄이 심화될 수 있고, 가용 수자원량 역시 감소하는 위험에 직면할 수 있다. 이에 따라 식량 생산량은 감소하고 식량 주 수입국인 한국의 경우 심각한 식량안보 위기에 직면할 수 있다. 따라서 식량 안보를 높이기 위한 대책으로서 정부는 식량자급을 상향 조정을 정책적 기조로 내세울 수 있다. 특히, 쌀의 경우 현재 100% 이상의 자급율을 보이고 있으나 미래에서는 자급율이 감소할 수 있으며 국내 최대 식량 작물인 만큼 식량안보에 미치는 영향력도 가장 크다고 볼 수 있다.

쌀과 같은 식량작물의 자급율 조정은 단순히 생산량, 소비량의 고려뿐 아니라 생산을 위해 소비되는 수자원, 토지자원, 에너지자원, 그리고 에너지 소비에 따른 탄소배출 등이 복합적으로 연결되어 있기 때문에 통합적인 영향을 평가할 수 있는 도구가 필요하며, 이에 따라 본 연구에서는 전 세계적으로 지속가능한 자원 관리를 위해 제시되고 있는 넥서스 개념을 적용하여 미래 시기의 목표자급율의 통합적인 영향을 평가하였다. 목표연도를 2030년으로 설정하고, 자급율 목표치에 따른 물, 에너지, 토지 이용 및 탄소배출을 정량적으로 분석하고, 자원별 최대 이용가능량을 적용하여 목표자급율 시나리오별 자원이용가능지수를 산출하였다. 이러한 통합적 접근은 자원 연계해석의 새로운 패러다임으로서 미래 기후변화에 따른 농업가뭄 대응 부분에서도 활용이 가능할 것으로 기대된다. 그러나 본 연구는 국가를 기준단위로 설정하였기 때문에 개별 지역에 적용하기에는 한계가 있다. 또한 자원들 간의 연계요소 중 물발자국 및 에너지 발자국 등은 타 연구 결과를 인용하여 적용하였기에 목표년도에도 동일한 값이 적용되는 한계점이 있다. 따라서 향후 연구에서는 자원 간 관계요소들의 미래시기 변화를 유동적으로 적용할 추정, 적용할 수 있는 서브모델이 추가적으로 구축될 필요가 있으며, 특정 지역의 지역적 특징을 반영할 수 있는 지역에 특화된 모델 역시 추가적인 구축이 필요할 것으로 사료된다.

그러나 이러한 한계점에도 불구하고 본 연구에서 개발된 넥서스 개념을 통한 쌀의 자급율 평가모형은 식량안보를 타 자원들의 안보와 환경적인 영향 평가라는 다각적인 측면에서 바라보게 해주는 역할을 수행할 수 있다. 또한 이론 위주의 넥서스 접근법을 식량 자급율에 대한 시나리오의 적용, 평가 가능한 모형으로 구체화하고, 통계자료를 적용하여 정량적인 결과를 도출하였다는데 본 연구의 의의가 있다. 물, 식량, 에너지, 토지자원들 간의 상쇄작용을 고려하여 개별 요소들의 변화에 따른 타 요소들의 변화를 분석하였기 때문에 본 연구 결과는 다양한 자원안보 정책들을 평가하는 정책적 의사결정 지원 시스템 구축 시 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업의 지원을 받아 연구되었음 (PJ013435, 과제명: 기후변화 대응 시나리오 기반의 물-에너지-식량 넥서스 통합기술 개발).

REFERENCES

1. Association of Agriculture, 1996. *Unit energy consumption at the main process in agricultural system* (in Japanese).
2. Dai, A., 2013. Increasing drought under global warming in observations and models, *Nature Climate Change* 3: 52-58. doi:10.1038/NCLIMATE1633.
3. Emissions, Greenhouse Gas. "Comparison of lifecycle greenhouse gas emissions of various electricity generation sources."
4. Ferroukhi, R., D. Nagpal, A. Lopez-Peña, T. Hodges, R. H. Mohtar, B. Daher, and M. Keulertz, 2015. *Renewable energy in the water, energy & food nexus*. The International Renewable Energy Agency.
5. Flammini, Alessandro, et al. *Walking the nexus talk: assessing the water-energy-food nexus in the context of the sustainable energy for all initiative*. FAO, 2017.
6. Lee, S. H., J. Y. Choi, and S. H. Yoo, 2015. Estimation of the virtual water consumption for food consumption and calorie supply. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(3): 77-86 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2015.57.3.077.
7. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), 2016 Major Statistics of food, agriculture, forestry and fisheries, 2016.
8. Mohtar, R., and B. Daher, 2012. Water, energy, and food: The ultimate nexus. In Heldman, D. R. and C. I. Moraru (Eds), *Encyclopedia of agricultural, food, and biological engineering*. CRC Press, Taylor and Francis Group. doi: 10.1081/E-EAFE2-120048376.
9. OECD/Food and Agriculture Organization of the United Nations (OECD-FAO), 2013. OECD-FAO Agricultural Outlook 2013, OECD Publishing.
10. Stockholm Environment Institute, 2013. Launching a New Analytical Platform to Explore the Water Energy Nexus, presented at a Workshop on Moving ahead to implement the nexus approach: lessons learned and discussion of next steps regarding integrated assessment of water-energy-food

- needs in a climate change context, FAO, Rome.
11. UN, 2014. *The United Nations World Water Development Report 2014*, UN Water, New York, unesdoc.unesco.org/images/0022/002257/225741E.pdf.
 12. World Economic Forum, *Global Risks 2015*, Geneva, Switzerland.
 13. Yoo, S. H., J. Y. Choi, S. H. Lee, and T. G. Kim, 2014. Estimating water footprint of paddy rice in Korea. *Paddy and Water Environment* 12(1): 43-54. doi:10.1007/s10333-015-0495-x.
 14. Yoo, S. H., S. H. Lee, J. Y. Choi, and J. B. Im, 2015. Estimation of potential water requirements using water footprint for the target of food self-sufficiency in South Korea. *Paddy and Water Environment* 14: 259-269. doi: 10.1007/s10333-015-0495-x.
 15. Yosida, S., 2011. Paddy field agriculture and energy problems. *Seneca 21st Topic* 39 (in Japanese).