

ORIGINAL ARTICLE

## 한국 농업의 에머지 평가

강대석\*

부경대학교 생태공학과

### Emergy Evaluation of Korean Agriculture

Daeseok Kang\*

Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

#### Abstract

Emergy methodology was used to analyze the biophysical basis of Korean agriculture and assess its sustainability. Total yearly emergy input into Korean agriculture was  $7.72 \times 10^{22}$  sej/yr in 2013. Purchased inputs were the dominant emergy source, accounting for 90.1% ( $6.95 \times 10^{22}$  sej/yr) of the annual input. This clearly indicates that the Korean agriculture is a modern, industrialized system that depends mostly on market goods and services derived from nonrenewable resources. The monetary equivalent of the total emergy input was 18.9 trillion ₩/yr, 1.5 times greater than the total production cost from farm expense surveys. Emergy return on investment of Korean agriculture was low, with an emergy yield ratio of 1.11. Korean agriculture appears to exert pressure on the environment as revealed by the high environmental loading ratio of 9.30. With very low emergy input from renewable sources (9.7%) and high environmental pressure, Korean agriculture is not sustainable, with an emergy sustainability index of 0.12. This study suggests that higher use efficiency of and lower dependence on nonrenewable purchased inputs need to be prioritized in an effort to enhance the sustainability of Korean agriculture.

**Key words** : Korean agriculture, Emergy, Biophysical base, Sustainability

#### 1. 서론

우리나라 농업의 2015년 기준 국내총생산액은 26.6조원(당해년 가격)으로 총부가가치에서 차지하는 비중은 1.9%에 불과하고 농가 인구가 전체 인구에서 차지하는 비율은 5%로 아주 낮지만(MAFRA, 2016), 농업은 모든 사회경제활동에 가장 기본적인 식량을 생산한다는 점에서 국가 경제의 근본 토대이다. 또한 최근에는 식량을 생산하는 공간으로서 뿐만 아니라 사람들에게 다양한 생태적, 경제적, 문화적 혜택을 제

공하는 생태계로서 농경지의 가치를 재평가하기 위한 연구가 진행되고 있다(Kim et al., 2014; Jeong et al., 2015; NIE, 2015; Sagong et al., 2015). 따라서 농경지는 단순히 식량을 생산하는 공간이 아니라 생태계가 제공하는 혜택의 지속가능한 이용을 확보하기 위한 전략적 공간으로 다룰 필요가 있다.

우리나라 농업은 국내외적으로 환경적, 경제적, 사회적 여건의 변화로 중대한 전환점에 서 있다(NIAST, 2007; MAFRA, 2013; KREI, 2016, 2017). 환경적으로는 지속적인 개발로 인한 농지 감소, 토양 및 수질

Received 15 August, 2017; Revised 25 August, 2017;  
Accepted 28 August, 2017

\*Corresponding author: Daeseok Kang, Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea  
Phone: +82-51-629-6542  
Email: dskang@pknu.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.  
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

오염, 기상 이변 등 국내 환경 변화가 농업 생산에 영향을 미치고 있으며, 기후 변화 등 지구적 차원의 환경 변화에도 노출되어 있다. 경제적 측면에서는 인구 감소로 인한 농산물 수요 감소 및 농산물 소비 패턴 변화, 농산물 시장 개방 확대 및 이에 따른 구조 조정, 에너지 가격 변동 등은 농업 경쟁력에 부정적 요인으로 작용하고 있다. 또한 사회적으로는 농가 인구의 급격한 감소 및 고령화, 수입 농산물의 안전성 문제, 식량 자급률 하락 등 국가 경제의 기본 토대인 농업 기반이 약화하고 있다.

우리나라 농업이 처한 여건의 복잡성과 다양한 요인사이의 상호작용을 고려할 때 농업 생산성과 지속가능성을 높이기 위한 국가 정책을 수립하려면 농업 생산의 환경적 조건과 사회경제적 여건을 통합적으로 평가하는 것이 시급하다. 그러나 기존의 농업 분석은 농업 생산의 두 가지 축인 자연(에너지 및 물질 등 생물리적 토대)과 경제(화폐로 표시되는 인간의 노력)를 통합적으로 고려하지 못한 한계가 있다. 농업의 경제성 분석 및 가치 평가(예를 들어 Kim et al., 2014; Jeong et al., 2015; MAFRA, 2016)는 시장에서 구입해 투입하는 재화와 용역의 화폐 가치에만 국한하여 농업 생산의 물질 및 에너지 조건을 고려하지 못하였다. 이에 비해 농업 환경 연구는 환경 조건, 생산성, 생태 특성 등 농업 관리에 필요한 필수 기초 정보(예를 들어 Lee et al., 2013; Hong et al., 2014; Yang et al., 2016)를 제공하지만 사회경제적 조건과 연계한 통합 분석은 미흡하였다.

시스템 평가 및 생태계 가치 평가에 에너지량, 물질량 등 생물리 자료뿐만 아니라 인건비, 재료비, 연료비 등 화폐량으로 표시되는 사람들의 노력까지 포함하는 에머지 평가법(emergy methodology)은 생태-경제시스템을 통합적으로 평가하기 위한 방법으로 개발되었다(Odum, 1996). 에머지 평가법은 생태-경제시스템의 유지와 생산에 기여하는 자연의 역할과 인간의 노력을 동일한 기준에서 평가하기 때문에 기존 시스템 분석 연구의 한계를 보완할 수 있는 방법이다. 에머지 평가법은 1990년대 중반 국내에 도입(Lee and Odum, 1994)된 이후 다양한 분야에 적용되었는데, 국가 경제 평가(Kang, 2015), 생태-경제시스템 분석 및 생태계 가치 평가(Kang, 2001; Kang, 2007; Kang, 2013;

Nam and Kang, 2016), 개발 사업의 비용-편익 분석(Kim, 2002; Kang and Park, 2002), 환경관리 대안 비교(Hong et al., 2015), 환경수용력 평가(Eum et al., 1996; Nam et al., 2010), 해양공간관리(Kang et al., 2015) 등을 포함한 다양한 분야에 적용되었다. 국내의 에머지 관련 연구는 주로 해양생태계를 대상으로 이루어졌다.

에머지 평가법을 농업에 적용한 국외 연구는 국가 또는 지방 차원의 농업 평가(Ghisellini et al., 2014; Park et al., 2016; Zhang et al., 2016), 특정 작물을 대상으로 한 평가(Cavalett et al., 2009; Wang et al., 2014; Yi and Xiang, 2016), 복합 농업 평가(Cavalett et al., 2006; Lu et al., 2006) 등을 들 수 있다. 이들 연구는 농업 생산의 생물리적 기반인 자연환경에너지, 토양, 연료, 재료, 농기계 등에 내재한 에너지와 물질의 중요성을 뚜렷하게 드러냈다. 또한 시간이 지남에 따라 제한된 농경지 면적에서 생산성을 높이기 위해 투입하는 화석연료 기반 에너지 및 물질 투입량이 증가(산업적 농업으로 전환)하면서 농업 생산이 환경에 미치는 영향은 커지고 지속가능성은 감소하고 있음을 보여주었다. 이러한 분석을 바탕으로 경작 방법의 개선, 재생불가능 자원의 이용효율성 제고, 에너지원 전환 등 농업의 지속가능성을 높이기 위한 정책 방향을 제시하였다.

지금까지 에머지 평가법을 농업에 적용한 국내 연구는 Lee et al.(2005)이 유일하지만, 에머지 평가법의 적용상 오류로 우리나라 농업 시스템의 특성을 적절히 파악하지 못하였다. 특히 바람의 에너지량 계산 오류로 재생가능 에너지가 농업 생산에 기여하는 바가 과대 평가되었고, 농업 생산에 필요한 에머지량의 합계 계산 과정에서 중복계산 문제를 고려하지 않았다. 이에 따라 우리나라 농업의 시스템 특성을 분석하기 위해 계산한 에머지 지수에 오류가 발생하여 농업시스템의 상태에 관한 합리적 평가가 이루어지지 못하였다.

에머지 평가법을 이용해 우리나라 농업의 생산성과 지속가능성을 높이기 위한 정책 방향을 체계적으로 제시하기 위해서는 농업시스템의 현재 상태 평가, 국가 경제에서 농업이 차지하는 역할 평가, 농업의 생물리적 기반 및 생산의 시계열 분석, 작물별 생산시스템

평가, 농업생태계가 제공하는 다양한 혜택의 가치 평가, 농업 생산이 주변 생태계에 미치는 영향 평가, 다양한 농업 정책 대안에 대한 비교 평가, 농경지의 이용 및 개발 대안에 대한 비용-편익 평가 등을 포함하는 통합적 연구를 진행할 필요가 있다. 이러한 통합적 연구의 출발점은 현재 우리나라 농업의 생물리적 조건, 환경영향 및 지속가능성을 시스템 관점에서 제대로 평가하는 것이다. 따라서 이 연구에서는 2013년을 평가 기준 연도로 하여 자연환경에너지, 토양, 농업 생산에 투입하는 재화와 용역 등 우리나라 농업(축산 제외)의 생물리적 기반을 분석하고, 농업 생산이 환경에 미치는 영향과 지속가능성을 평가하는 것을 목적으로 하였다. 또한 향후 에머지 평가법을 농업 평가에 적용하고자 하는 연구자들이 참고할 수 있는 표준화된 평가틀을 제공하고자 하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 에머지 개념 및 평가 절차

에머지 평가법은 미국의 시스템생태학자인 Howard T. Odum이 개발한 시스템 평가 수단으로, 생태-경제 시스템의 분석 및 생태계의 가치 평가에 에너지량, 물질량, 정보량, 화폐량 등과 같은 생물리 자료(Biophysical data)를 이용한다(Odum, 1996). 생태계와 경제시스템이 생산하는 모든 재화와 용역은 에너지, 물질, 기술, 노동력, 자본 등이 일정 기간 투입되어 나타나는 결과물이다. 따라서 이들 재화와 용역의 역할과 가치는 현재 남아 있는 에너지량, 물질량, 정보량 등이 아니라 이들이 만들어지는데 직간접으로 투입된 모든 요소의 생물리량을 더해야 제대로 판단할 수 있다는 것이 에머지 개념의 핵심이다. Odum(1996)은 에머지를 “한 가지 서비스나 생산물을 만드는 과정에 직접 그리고 간접으로 이미 소모한 한 종류의 이용 가능한 에너지”로 정의하였다. 에머지(energy)는 energy memory의 줄임말이다. 에머지 평가법은 재화와 용역이 만들어지는데 투입된 요소의 양을 토대로 역할과 가치를 판단한다는 점에서 생산 관점의 시스템 평가법이다(Odum, 1996).

에머지 평가법의 또 다른 핵심 개념은 에너지의 질(Energy quality)이다(Odum, 1996). 에너지의 질 개념

은 에너지의 종류가 다르면 일을 할 수 있는 능력(즉, 에너지의 질)이 다르기 때문에 joule, calorie 등 물리 단위로 나타낸 에너지량이 같더라도 단순하게 비교할 수 없다는 것이다. 이 개념은 에너지뿐만 아니라 물질, 정보 등 모든 생물리 자료에도 적용된다. 즉, 물질이나 정보의 종류가 다르면 질량 또는 정보량이 같더라도 수행할 수 있는 일의 성격과 특성이 다르기 때문에 단순히 질량이나 정보량만을 이용해 이들을 비교할 수 없다. 따라서 일을 할 수 있는 능력이 서로 다른 다양한 요소를 제대로 비교하려면 성격이 다른 모든 요소를 비교할 수 있는 기준(에머지의 정의에서 “한 종류의 이용 가능한 에너지”)을 선택하고, 모든 요소의 생물리 자료를 이 기준으로 환산한 다음 비교하거나 시스템 평가에 필요한 계산을 수행해야 한다. 에머지 평가법에서 비교의 기준으로 채택하고 있는 에너지는 태양에너지이다. 이에 따라 에머지를 태양에머지(Solar emergy)로 부르며, 단위는 solar emjoules(sej)을 이용한다.

전형적인 에머지 평가의 핵심은 평가 대상 항목의 성격과 자료 수집 방법에 따라 에너지량, 물질량, 정보량, 노동 투입량, 화폐량 등 다양한 형태로 존재하는 생물리 자료를 에머지량으로 바꾸는 것이다(Odum, 1996). 따라서 일을 할 수 있는 능력과 자료의 단위가 서로 다른 생물리 자료를 에머지량으로 변환하기 위한 환산인자가 반드시 필요하다. 평가 대상 항목의 생물리 자료와 각 자료에 적절한 환산인자를 곱하면 각 항목의 에머지량을 얻을 수 있다. 이들 환산인자를 에머지 원단위(Unit Emery Value, UEV)라고 부르는데, 생물리 자료의 단위에 따라 에너지변환도(transformity; 단위: sej/J), specific emergy(단위: sej/g), 에머지-화폐비율(Energy money ratio; 단위: sej/₩) 등으로 불리기도 한다.

에머지 평가의 일반적인 절차는 평가 대상 선정 및 평가 범위 설정, 에머지 평가 모델 작성, 기초 자료 수집, 에머지량 계산, 에머지량의 화폐량 환산, 에머지 지수 계산의 순서를 따른다(Odum, 1996). 구체적인 에머지 평가 절차는 에머지 평가와 관련한 가장 중요한 문헌인 Odum(1996)과 기존 연구(Kang and Nam, 2003; Kang, 2013; Kang, 2015)에 제시되어 있다.

생물리 자료와 UEV를 곱하여 계산한 에머지량은

대부분 값이 아주 크고 단위가 생소하기 때문에 일반인이나 정책결정자 등 에머지 평가법에 익숙하지 않은 사람들이 이해하기 쉽지 않은 자료이다(Nam and Kang, 2016). 에머지 평가법은 평가 결과의 활용성과 적용성을 높이기 위해 에머지량을 일상 생활에서 익숙한 화폐량으로 환산할 수 있는 방법을 포함하고 있다. 에머지량을 에머지-화폐비율(단위: sej/\$, sej/₩ 등)로 나누면 각 평가 대상 항목의 에머지량을 화폐 단위로 바꿀 수 있다(Odum, 1996). 에머지-화폐비율은 일반적으로 한 국가(또는 지역)의 연간 국내총생산(₩/yr)을 이 국가(또는 지역)가 일년 동안 사용한 총 에머지량(sej/yr)으로 나누어 구한다. 2013년 우리나라 경제의 에머지-화폐비율은  $4.08 \times 10^9$  sej/₩이었다(Kang, 2016).

## 2.2. 에머지 지수

우리나라 농업시스템의 상태를 평가하기 위해 에머지 산출비율(Energy Yield Ratio, EYR), 환경부하비율(Environmental Loading Ratio, ELR), 에머지 지속성지수(Energy Sustainability Index, ESI) 등의 에머지 지수를 계산하였다. 에머지 지수는 다양한 항목의 에머지량 자료를 통합하여 평가 대상 시스템의 특성에 관한 정보를 제공한다(Odum, 1996).

EYR은 사회경제활동이 생산한 최종 산물에 내재한 에머지량과 시장에서 구입하여 생산 과정에 투입한 에머지량 사이의 비율인데(Odum, 1996), 평가 대상 사회경제활동의 경쟁력 또는 투자효율을 나타낸다. EYR이 클수록 투입 비용(시장에서 구입하여 투입한 에머지량, 즉 외부구입 에머지량) 대비 성과가 크기 때문에 더 경쟁력 있는 시스템 또는 투자효율이 더 좋은 시스템으로 구분할 수 있다. EYR은 에머지 평가법의 정의상 최소값이 1인데, 이 경우 비용(외부구입 에머지량)과 성과(최종 산물에 내재한 에머지량)가 같아 경제에 새로이 기여하는 바가 없다는 것을 나타낸다. 최종 생산물의 에머지량에서 외부구입 에머지(즉, 생산 비용)가 차지하는 비중이 적을수록 더 경쟁력 있는 생산 활동이 된다.

ELR은 사회경제활동이 생태계에 미치는 영향을 평가하는데 이용하는 에머지 지수이다(Brown and Ulgiati, 2004). ELR은 사회경제활동에 투입한 재생

불가능 에머지량과 외부구입 에머지량의 합을 재생가능 에머지량으로 나누어 계산한다. ELR이 클수록 사회경제활동이 생태계에 미치는 부정적 영향은 큰 것으로 평가한다. 이 지수는 재생불가능 에머지와 외부구입 에머지(대부분 재생불가능 에머지에 기반한 재화)의 비중이 클수록 생태계의 자연적인 에너지 흐름과 물질 순환에 교란을 일으킬 가능성이 높아진다는 점에 근거해 사회경제활동의 영향을 판단하는 시스템 관점의 에머지 지수이다. Brown and Ulgiati(2004)는 ELR이 10보다 크면 사회경제활동이 환경에 미치는 부정적 영향이 아주 크고, 3~10이면 중간 정도의 영향, 3보다 작으면 영향이 작은 경우로 구분하였다.

ESI는 EYR을 ELR로 나누어 구하는데, 평가 대상 사회경제활동의 지속가능성을 판단하기 위한 목적으로 개발되었다(Brown and Ulgiati, 2004). Brown and Ulgiati(2004)는 ESI가 10보다 크면 장기적인 관점에서 지속가능하고, 1보다 작으면 지속가능하지 않은 시스템으로 구분한 바 있다.

## 2.3. 농업 에머지 평가 자료

이 연구는 식량작물, 채소류, 과실류, 특용작물 등 농작물 생산시스템을 평가 대상으로 하였으며, 축산업과 임업은 포함하지 않았다. 2013년 기준 농경지 면적(MAFRA, 2015)인 1,711,436 ha(논 963,876 ha, 밭 747,560 ha)를 평가의 공간적 범위로 설정하였다. 평가 기준 연도는 우리나라 에머지 평가가 완전하게 이루어진 최신 연도인 2013년(Kang, 2016)으로 하였다.

우리나라 농업의 에머지 평가에 필요한 자료는 기상청, 통계청, 농림축산식품부, 산업통상자원부가 발간하는 국가 통계와 정부 보고서 및 학술문헌을 이용하였다. 에머지 평가에 필요한 모든 자료는 연간 자료를 이용하였으며, 연간 자료를 직접 확보할 수 없는 경우 기초 자료를 이용해 연간 자료를 계산하였다.

농업의 에머지 평가에 필요한 평가 항목은 재생가능 에머지, 지역의 재생불가능 에머지, 외부구입 에머지로 구분해 수집하였다. 농업용수(유효우량 제외)는 농업용수 이용량이 연간 이용 가능한 수자원량(지하수 포함)을 초과하지 않는 것으로 판단하여 재생가능 에머지원에 포함했다. 농업용수 이용 과정에 투입하는 재화와 용역은 외부구입 에머지에 포함했다. 농업

활동에 투입하는 인간의 노력은 노동(labor)과 서비스(services)로 구분하였다. 노동은 농작물 재배에 직접 투입하는 인간의 노력을 의미하며, 서비스는 농작물 생산에 필요한 재료, 연료 등을 생산하는데 투입된 노동으로 간접 노력을 의미한다. 이 연구에서는 기존 연구(Ulgiati et al., 1994; Martin et al., 2006; Ghisellini et al., 2014)를 따라 노동과 서비스를 재생가능 부분과 재생불가능 부분으로 구분하였다. 2013년 기준 우리나라 경제의 총 에머지 사용량 가운데 재생가능 에머지가 차지하는 비율은 2.2%였다(Kang, 2016). 따라서 농작물 생산에 투입된 노동과 서비스 가운데 2.2%는 재생가능 에머지, 나머지 97.8%는 외부구입 에머지에 포함하였다.

우리나라 농작물 생산에 투입하는 요소의 에머지량을 계산하는데 필요한 UEV는 기존 문헌을 참고하였다. 이 연구에서 사용한 UEV는 지구 전체의 연간 재생가능 에머지 유입량이  $15.83 \times 10^{24}$  sej/yr(Odum et al., 2000)인 경우를 기준으로 계산한 값이며, 재생가능 에머지 유입량 기준이 다를 경우 UEV를  $15.83 \times 10^{24}$  sej/yr 기준값으로 환산하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 에머지 유입 특성

우리나라 농작물 생산에 필요한 연간 에머지 유입량(2013년 기준)은 Table 1의 에머지 평가표에서 계산하였다. 또한 연간 농작물 생산량과 에머지 유입량을 이용하여 전체 농작물의 평균 UEV를 계산하였다.

Table 1에 포함한 재생가능 에머지 공급원은 모두 7가지인데, 태양, 바람, 강수, 지열 등 자연환경에너지와, 농업용수, 인간의 노력(노동 및 서비스) 등 세 가지 유형으로 구분할 수 있다. 농경지로 직접 유입하는 자연환경에너지 중 연간 에머지 공급량이 가장 많은 항목은 강수(증발산량만 고려)의 화학에너지( $1.27 \times 10^{21}$  sej/yr)였으며, 지열, 바람, 태양에너지 순이었다. 2013년 일년 동안 이용한 농업용수(논용수와 밭용수의 합)를 통해  $5.33 \times 10^{21}$  sej/yr의 에머지가 농경지에 유입하였다. 또한 농작물 생산에 직·간접으로 투입한 인간의 노력인 노동과 서비스는 각각  $6.49 \times 10^{20}$  sej/yr,  $2.37 \times 10^{20}$  sej/yr의 에머지를 공급하였다. 2013년 농

작물 생산에 이용된 재생가능 에머지 총량은  $7.49 \times 10^{21}$  sej/yr이었는데, 이는 강수, 농업용수, 노동과 서비스의 에머지량을 더한 값이다. 태양, 바람, 강수, 지열의 경우 생물권의 에너지 흐름과 물질 순환 과정에서 아주 밀접하게 연결되어 상호작용하기 때문에 에머지 총량을 계산할 때 이들을 모두 포함하면 중복 계산을 초래한다(Odum et al., 2000). 이를 해결하기 위해 에머지 평가법에서는 중복 계산 우려가 있는 항목의 경우 에머지 기여량이 가장 큰 항목만 에머지 유입량 합계에 포함한다. 농업용수를 통해 공급된 에머지량은 재생가능 에머지 총량의 71.2%로, 가장 중요한 재생가능 에머지 공급원이었다. 강수의 화학에너지는 17.0%, 노동과 서비스는 11.8%의 에머지를 공급한 것으로 나타났다.

농작물 생산에 유입한 재생가능 에머지 총량을 화폐 단위로 환산하면 2013년 기준 1조 8,358억원/년이었다(Table 1). 농업 생태계를 유지하는 환경적 조건인 강수의 화학에너지와 농업용수가 공급한 에머지는 각각 3,112억원/년, 1조 3,074억원/년이었다. 이는 농경지와 주변의 자연환경이 농업 생산에 기여하는 역할의 가치를 나타낸다. 2013년 기준 농작물생산비 통계(KSO, 2014)와 농축산물소득자료(RDA, 2014)를 이용하여 추정된 연간 농업용수 관련 비용(Table 1의 외부구입 에머지 가운데 서비스에 포함)은 연간 약 147억원에 불과하였다. 농작물 생산 비용에 포함되는 노동과 서비스를 제외한 강수와 농업용수의 경우 이들을 이용하기 위해 투입하는 비용이 아니라 물질 자체에 내재한 에머지량을 이용해 계산한 값이기 때문에 농작물 생산의 경제성 분석에서는 다루지 않는 항목이다. 에머지 평가법의 경우 생물리 자료를 이용하기 때문에 사회경제활동에 투입하는 물질 자체의 가치, 즉 농작물의 시장가격에 포함되지 않는 요소의 가치를 평가할 수 있다.

지역의 재생불가능한 에머지 공급원은 토양 한 가지 항목만 포함하였다. 토양이 농작물 생산에 기여하는 바는 토양침식을 통해 유출하는 유기물의 에머지량을 이용해 계산했다. 2013년 기준 논과 밭의 토양 침식으로 손실된 에머지량은  $1.77 \times 10^{20}$  sej/yr이었다. 이를 화폐 단위로 환산하면 연간 433억원/년이었다. 이는 토양이 농작물 생산에 기여한 가치에 해당한다.

Table 1. Energy evaluation table for Korean agriculture

No.	Item	Raw data	Unit Energy Value (UEV) <sup>a</sup>	UEV Source <sup>b</sup>	Solar energy (sej/yr)	Emvalue <sup>c</sup> (2013 ₩/yr)
Renewable inputs						
1	Sunlight	6.84×10 <sup>19</sup> J/yr	1 sej/J	a	6.84×10 <sup>19</sup>	1.68×10 <sup>10</sup>
2	Wind	3.27×10 <sup>16</sup> J/yr	2450 sej/J	a	8.02×10 <sup>19</sup>	1.97×10 <sup>10</sup>
3	Rain	4.16×10 <sup>16</sup> J/yr	3.05×10 <sup>4</sup> sej/J	a	1.27×10 <sup>21</sup>	3.11×10 <sup>11</sup>
4	Earth cycle	3.24×10 <sup>16</sup> J/yr	1.20×10 <sup>4</sup> sej/J	a	3.89×10 <sup>20</sup>	9.52×10 <sup>10</sup>
5	Irrigation water	6.55×10 <sup>16</sup> J/yr	8.14×10 <sup>4</sup> sej/J	a	5.33×10 <sup>21</sup>	1.31×10 <sup>12</sup>
6	Services, renewable	1.59×10 <sup>11</sup> ₩/yr	4.08×10 <sup>9</sup> sej/₩	b	6.49×10 <sup>20</sup>	1.59×10 <sup>11</sup>
7	Labor, renewable	7.84×10 <sup>12</sup> J/yr	3.03×10 <sup>7</sup> sej/J	b	2.37×10 <sup>20</sup>	5.82×10 <sup>10</sup>
Local nonrenewable inputs						
8	Top soil loss	1.44×10 <sup>16</sup> J/yr	1.23×10 <sup>4</sup> sej/J	c	1.77×10 <sup>20</sup>	4.33×10 <sup>10</sup>
Purchased inputs						
9	Fuels	4.89×10 <sup>16</sup> J/yr	varies sej/J	d	8.69×10 <sup>21</sup>	2.13×10 <sup>12</sup>
10	Electricity	3.58×10 <sup>16</sup> J/yr	2.86×10 <sup>5</sup> sej/J	e	1.02×10 <sup>22</sup>	2.51×10 <sup>12</sup>
11	Lime	2.39×10 <sup>11</sup> g/yr	9.50×10 <sup>9</sup> sej/g	f	2.27×10 <sup>21</sup>	5.56×10 <sup>11</sup>
12	Plastic film	3.33×10 <sup>11</sup> g/yr	9.66×10 <sup>9</sup> sej/g	g	3.21×10 <sup>21</sup>	7.87×10 <sup>11</sup>
13	Fertilizer	3.90×10 <sup>11</sup> g/yr	varies sej/g	h	4.89×10 <sup>21</sup>	1.20×10 <sup>12</sup>
14	Pesticides	1.87×10 <sup>10</sup> g/yr	2.48×10 <sup>10</sup> sej/g	i	4.64×10 <sup>20</sup>	1.14×10 <sup>11</sup>
15	Machinery	1.46×10 <sup>10</sup> g/yr	2.22×10 <sup>10</sup> sej/g	j	3.25×10 <sup>20</sup>	7.96×10 <sup>10</sup>
16	Services, nonrenewable	7.07×10 <sup>12</sup> ₩/yr	4.08×10 <sup>9</sup> sej/₩	b	2.88×10 <sup>22</sup>	7.07×10 <sup>12</sup>
17	Labor, nonrenewable	3.48×10 <sup>14</sup> J/yr	3.03×10 <sup>7</sup> sej/J	b	1.06×10 <sup>22</sup>	2.59×10 <sup>12</sup>
Production						
18	Crop production	1.14×10 <sup>17</sup> J/yr			7.72×10 <sup>22</sup>	1.89×10 <sup>13</sup>
	UEV with services		6.80×10 <sup>5</sup> sej/J			
	UEV without services		4.20×10 <sup>5</sup> sej/J			

a) All unit energy values were adjusted to the global renewable energy baseline of 15.83×10<sup>24</sup> sej/yr

b) UEV sources: a) Odum et al.(2000), b) Kang(2016), c) Campbell and Brown(2012), d) Brown et al.(2011), e) Odum(1996), f) Odum(2000), g) Buranakarn(1998), h) Brandt-Williams(2001) & Odum(1996), i) Brown and Arding(1991), j) Cohen et al.(2007)

c) Emvalues were calculated with the energy-money ratio of the year 2013 for Korea

농작물 생산을 위해 외부에서 구입한 항목인 연료, 전기, 석회, 비닐, 비료, 농약, 농기계, 노동과 서비스(재생불가능 부분만 포함) 등 9가지 항목을 통해 유입한 총 에머지량은 6.95×10<sup>22</sup> sej/yr이었다. 외부구입 에머지 가운데 에머지 기여량이 가장 큰 항목은 간접 노동에 해당하는 서비스(즉, 농작물 생산에 필요한 재료, 에너지 및 기계 등의 생산 과정에 투입된 노동력)로, 연간 2.88×10<sup>22</sup> sej/yr(전체 외부구입 에머지의 41.5%)의 에머지를 공급하였다. 이외에도 노동력(15.2%), 전기(14.7%) 등도 에머지 공급량이 많은 항목이었다. 농작물 생산에 투입하는 재화 중 일부는 구체적인 자료의 부족으로 Table 1에 포함하지 못했는

데, 국외 사례를 볼 때 전체 에머지 투입량에서 차지하는 비중이 크지 않아 연구 결과에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

2013년 농작물 생산에 투입한 외부구입 에머지량을 화폐 단위로 환산하면 17조 329억원/년이었다. Table 1의 9~15번 항목은 연료, 전기, 재료 등의 물질이나 에너지에 내재한 에머지량을 계산하였기 때문에 농작물 생산 비용 통계에 포함되지 않는 항목으로, 이들이 농작물 생산에 기여한 가치는 연간 7조 3,757억원으로 평가되었다. 일반적으로 농작물 생산 비용에 포함되는 항목은 연료, 전기, 재료 및 노동력(재생가능 에머지에 포함한 것까지 포함)을 구입하는데 투입된

**Table 2.** Emergy indices for Korean agriculture

Emergy indices	Value
Renewable inputs, R	$7.49 \times 10^{21}$ sej/yr
Local nonrenewable inputs, N	$1.77 \times 10^{20}$ sej/yr
Purchased inputs, F	$6.95 \times 10^{22}$ sej/yr
Total emergy use, $U=R+N+F$	$7.72 \times 10^{22}$ sej/yr
Fraction of renewable emergy input, R/U	9.7%
Emergy yield ratio, $EYR=U/F$	1.11
Environmental loading ratio, $ELR=(N+F)/R$	9.30
Emergy sustainability index, $ESI=EYR/ELR$	0.12

돈으로, Table 1에 포함한 노동 및 서비스(감가상각비와 임차료는 제외한 값)에 해당한다.

이상의 결과를 정리하면 우리나라의 농작물 생산 과정에 유입한 에머지 총량(재생가능 에머지, 지역의 재생불가능 에머지, 외부구입 에머지의 합)은 2013년 기준  $7.72 \times 10^{22}$  sej/yr이었다. 세 가지 유형의 에머지 공급원 가운데 외부구입 에머지가 에머지 총량의 90.1%( $6.95 \times 10^{22}$  sej/yr)로 대부분을 차지했다. 재생가능 에머지가 차지하는 비중은 9.7%( $7.49 \times 10^{21}$  sej/yr)였으며, 지역의 재생불가능 에머지는 0.2%( $1.77 \times 10^{20}$  sej/yr)에 불과했다. 이는 우리나라 농작물 생산이 지역의 에머지 공급원(재생가능 및 재생불가능)이 아니라 시장에서 공급하는 다양한 재화와 용역(대부분 재생불가능 자원에 기반한 산물)에 의존하는 산업적 농업의 특성을 가지고 있음을 뚜렷이 나타낸다.

2013년 기준 1,785만톤/년(MAFRA, 2015)의 농작물을 생산하는데 투입된 에머지량( $7.72 \times 10^{22}$  sej/yr)을 화폐 단위로 환산하면 18조 9,120억원/년이었다. 에머지 관점에서 평가한 농작물 생산 비용은 작물별 경영비를 토대로 추정된 농작물 생산 비용보다 약 1.5배 더 많았다. 2013년 기준 작물별 경영비(RDA, 2014)를 토대로 추정된 농작물 생산 비용(감가상각비와 임차료 포함)은 12조 3,898억원/년이었다. 이러한 차이는 일반적인 농업 생산 비용 항목에 포함되지 않는 자연환경에너지(강수)의 역할 뿐만 아니라 농작물 생산에 투입되는 연료, 전기, 재료 등의 물질이나 에너지의 역할까지 에머지 평가에 포함하였기 때문이다.

농작물 생산에 유입하는 연간 총 에머지량( $7.72 \times 10^{22}$  sej/yr)을 각 농작물 생산량(MAFRA, 2015)과 단위중

량당 열량 자료(식품성분표)를 토대로 계산한 총 에너지량으로 나누어 전체 농작물의 평균 UEV를 Table 1에서 계산하였다. 서비스를 포함할 경우 농작물의 평균 UEV는  $6.80 \times 10^5$  sej/J, 서비스를 제외할 경우에는  $4.20 \times 10^5$  sej/J이었다. 이는 기존 국내 연구에서 이용한 평균 UEV( $1.75 \times 10^5$  sej/J; Kang, 2016)나 Lee et al.(2005)이 계산한 UEV(UEV 계산 기준의 차이를 고려해 보정한 값)보다 더 큰 값이었다. 이는 기존 국내 연구의 UEV를 사용한다면 농작물 생산과 이용을 포함하는 시스템 평가에서 농작물의 기여 가치를 과소 평가할 수밖에 없다는 것을 의미한다. 기존의 국내 연구는 국외 사례에서 제시된 UEV를 이용하여 국산 농작물의 평균 UEV를 계산한 한계가 있다. 그러나 이 연구에서 계산한 UEV는 전체 농작물의 평균 UEV이기 때문에 특정 작물의 UEV는 별도의 평가 과정을 거쳐 계산한 뒤 활용할 필요가 있다.

### 3.2. 농업의 지속가능성 평가

Table 1의 에머지 평가 결과를 이용하여 우리나라 농업의 시스템 특성을 분석하는데 유용한 에머지 지수를 Table 2에서 계산하였다. 농업 생산에 투입한 총 에머지량 가운데 재생가능 에머지 비율은 농업 활동의 지속성을 나타낼 수 있는 정보인데, 2013년의 경우 9.7%에 불과하였다. 일차 산업인 농업의 특성상 우리나라 전체 경제의 재생가능 에머지 비율(2.2%; Kang, 2016)보다는 높았지만, 대부분의 에머지를 외부구입 에머지에 의존하기 때문에 지속가능성이 아주 낮은 것으로 평가할 수 있다.

2013년 기준 우리나라 농작물 생산 시스템의 EYR은

**Table 3.** Comparison of emergy indices for Korean agriculture with those of other countries

Items	Korea	Japan <sup>a)</sup>	Denmark <sup>b)</sup>	Italy <sup>c)</sup>	China <sup>d)</sup>
Renewable fraction	0.10	0.07	0.07	0.12	0.27
Emergy yield ratio	1.11	1.09	1.09	1.15	2.08
Environmental loading ratio	9.30	13.83	13.83	7.05	2.72
Emergy sustainability index	0.12	0.08	0.08	0.16	0.77

a) Japan in 2005 (Gasparatos, 2011), b) Denmark in 1999 (Rydberg and Haden, 2006), c) Emilia Romagna region in Italy in 2010 (Ghisellini et al., 2014), and d) China in 2000 (Chen et al., 2006)

1.11이었다. 즉, 2013년 생산한 농작물에 내재한 총 에머지량은 시장에서 구입해 투입하는 에머지 비용(연료, 재료, 전기, 노동력 등)의 1.11배에 불과하여 투입 비용 대비 성과가 크지 않았다. 농작물 생산의 EYR은 우리나라 전체 경제의 EYR(1.21; Kang, 2016)보다 낮아 농작물 생산 활동의 경쟁력이 높지 않다는 것을 보여주었다.

농작물 생산 활동이 환경에 미치는 부정적 영향을 나타내는 ELR은 9.30이었다. 농작물 생산이 환경에 미치는 영향은 우리나라 전체 경제의 환경부하비율(44.26; Kang, 2016)에 비해 훨씬 낮았지만, Brown and Ulgiati(2004)의 기준에 따르면 환경에 미치는 영향이 상당히 큰 것으로 볼 수 있다. Brown and Ulgiati(2004)은 환경부하비율이 10보다 크면 환경에 미치는 영향이 아주 큰 것으로 분류한 바 있다.

우리나라 농작물 생산의 ESI는 0.12에 불과해 현재 상태의 농작물 생산 활동은 지속가능하지 않은 것으로 평가되었다. 우리나라 전체 경제의 ESI인 0.03(Kang, 2013)보다는 훨씬 높았지만, Brown and Ulgiati(2004)는 ESI가 1보다 작으면 지속가능하지 않은 시스템으로 분류한 바 있다.

Lee et al.(2005)의 에머지 평가표를 토대로 에머지 지수를 재계산하면 2003년 기준 우리나라 농업(농작물 생산만 평가)의 EYR은 1.15, ELR은 7.17, ESI는 0.16이었다. 비록 에머지 평가에 포함한 항목에 일부 차이가 있어 비교에 한계가 있지만 10년이 지난 2013년의 농업 생산은 2003년에 비해 투입 비용 대비 효율성이 감소하고 환경에 미치는 부정적 영향은 증가하였으며, 그 결과 우리나라 농업 활동의 지속가능성은 낮아졌다. 이는 농업 생산에서 차지하는 외부구입 에머지의 증가에 기인하는데, 외부구입 에머지 비중은

2003년 86.7%에서 2013년 90.1%로 증가하였다. 이러한 추세는 우리나라 전체 경제에서도 나타났는데, 우리나라의 ESI는 2003년 0.05에서 2013년 0.03으로 감소하였다(Kang, 2016).

향후 농업 정책은 농업 생산의 지속가능성을 높이기 위한 체계적 전략을 중심으로 수립할 필요가 있는데, 이 연구는 농업 생산에 투입되는 에머지의 대부분을 차지하는 외부구입 에머지의 감소와 효율적인 이용이 주된 목표가 되어야 한다는 것을 보여주었다. 외부구입 에머지 가운데 사람들의 노력에 해당하는 노동과 서비스를 제외하면 연료와 전기 등 농사용 에너지가 공급하는 에머지량이 외부구입 에머지의 약 27%(Table 1)로 큰 비중을 차지하고 있다. 따라서 농업 생산의 환경부하를 줄이고 지속가능성을 높이기 위해서는 일차적으로 화석연료 기반 에너지를 태양광, 풍력 등 재생가능 에너지로 전환할 필요가 있다. 또한 화학비료와 석회 등 토양 상태를 개선하고 식물 생산성을 높이기 위해 투입하는 물질의 에머지량(전체 외부구입 에머지의 약 10%)을 줄이고 농경지 생태계의 자연적 물질 순환을 충분히 활용할 수 있도록 농업 관행을 바꿀 필요가 있는 것으로 판단된다.

농업의 에머지 평가 범위, 평가 대상 항목의 종류와 유형 구분에 일부 차이가 있어 비교에 한계가 있지만 우리나라 농업의 에머지 지수는 선진국과 유사하였다(Table 3). 일본, 덴마크, 이탈리아 등 선진국의 농업 생산에서 재생가능 에머지가 차지하는 비율은 7~12%였으며, EYR은 1.09~1.15의 범위의 값을 보였다. 이들 나라의 농업이 환경에 미치는 영향 또한 컸는데, ELR은 6.83~13.83의 범위로 나타났다. 에머지 투입 비용 대비 성과가 크지 않고 환경에 미치는 부정적 영향이 커서 농업의 지속가능성(0.08~0.16)도 아주 낮았다.



이에 비해 개발도상국인 중국의 경우 아직까지 농업 생산에서 재생가능 에머지가 차지하는 비중이 더 높아 선진국에 비해 EYR이 더 크고 ELR은 훨씬 더 작았다. 그 결과 ESI는 우리나라를 비롯한 선진국에 비해 높았지만, 여전히 Brown and Ulgiati(2004)의 기준에 따르면 지속가능하지 않은 상태( $ESI < 1$ )로 볼 수 있다. 이는 단위면적당 생산량의 자연적 한계를 뛰어넘기 위해 비료, 농약, 농기계 등 다양한 화석연료 기반 에머지를 이용하는 현대 농업의 구조를 반영하는 결과로 볼 수 있다.

#### 4. 결론

시스템 평가방법인 에머지 평가법을 이용하여 우리나라 농업(농작물 생산만 고려)의 생물리적 기반(에머지 유입 특성)을 분석하고 에머지 지수를 계산해 농업 활동의 지속가능성을 평가하였다. 우리나라 농작물 생산에 유입하는 에머지 총량은 2013년 기준  $7.72 \times 10^{22}$  sej/yr이었는데, 외부구입 에머지가 에머지 총량의 90.1%( $6.95 \times 10^{22}$  sej/yr)로 대부분을 차지했다. 이는 우리나라 농작물 생산이 지역의 에머지 공급원(재생가능 및 재생불가능)이 아니라 시장에서 공급하는 다양한 재화와 용역(대부분 재생불가능 자원에 기반한 산물)에 의존하는 산업적 농업의 특성을 가지고 있음을 뚜렷이 나타낸다. 농작물을 생산하는데 투입된 에머지 총량을 화폐 단위로 환산하면 18조 9,120 억원/년이었다. 에머지 관점에서 평가한 농작물 생산 비용은 작물별 경영비를 토대로 추정된 농작물 생산 비용보다 약 1.5배 더 많았다.

에머지 지수 계산 결과 우리나라의 농작물 생산은 지속가능하지 않은 것으로 평가되었다. 농작물 생산에 투입한 총 에머지량 가운데 재생가능 에머지 비율은 2013년 기준 9.7%에 불과해 대부분의 에머지를 외부구입 에머지에 의존하였다. 2013년 생산한 농작물에 내재한 총 에머지량은 시장에서 구입해 투입하는 에머지 비용의 1.11배에 불과하여 투입 비용 대비 성과가 크지 않았으며, 농작물 생산이 환경에 미치는 영향이 상당히 컸다. 이에 따라 현재 상태의 농작물 생산 활동은 지속가능하지 않은 것으로 평가되었다. 이 연구는 농업 생산의 지속가능성을 높이려면 농업 생산

에 투입하는 에머지의 대부분을 차지하는 외부구입 에머지 투입량 감소와 효율적인 이용이 주된 목표가 되어야 한다는 것을 보여주었다.

#### 감사의 글

이 연구는 부경대학교 자율창의학술연구비(2015년)의 지원을 받아 수행하였습니다.

#### REFERENCES

- Brandt-Williams, S. L., 2001, Folio #4: Emergy of Florida agriculture, Handbook of emergy evaluation, Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, USA.
- Brown, M. T., Arding, J., 1991, Transformities working paper, Center for Wetlands, University of Florida, Gainesville, USA.
- Brown, M. T., Protano, G., Ulgiati, S., 2011, Assessing geobiosphere work of generating global reserves of coal, crude oil, and natural gas, *Ecol. Model.*, 222, 879-887.
- Brown, M. T., Ulgiati, S., 2004, Emergy analysis and environmental accounting, *Encyclopedia of Energy* 2, 329-354.
- Buranakarn, V., 1998, Evaluation of recycling and reuse of building materials using the emergy analysis method, Ph.D. Dissertation, University of Florida, Gainesville, FL, USA.
- Campbell, E. T., Brown, M. T., 2012, Environmental accounting of natural capital and ecosystem services for the US national forest system, *Environ. Dev. Sustain.*, 14, 691-724.
- Cavalett, O., de Queiroz, J. F., Ortega, E., 2006, Emergy assessment of integrated production systems of grains, pig and fish in small farms in the South Brazil, *Ecol. Model.*, 193, 205-224.
- Cavalett, O., Ortega, E., 2009, Emergy, nutrients balance, and economic assessment of soybean production and industrialization in Brazil, *J. of Clean. Prod.*, 17, 762-771.
- Chen, G. Q., Jiang, M. M., Chen, B., Yang, Z. F., Lin, C., 2006, Emergy analysis of Chinese agriculture, *Agr. Ecosyst. Environ.*, 115, 161-173.
- Cohen, M. J., Sweeney, S., Brown, M. T., 2007,

- Computing the unit emergy value of crustal elements, in Brown, M. T., Bardi, E., Campbell, D., Comar, V., Haung, S. H., Rydberg, T., Tilley, D., Ulgiati, S. (eds.), *Emergy synthesis 4: Theory and applications of the emergy methodology*, Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL, USA.
- Eum, K. H., Son, J. H., Cho, E. I., Lee, S. M., Park, C. K., 1996, The estimation of carrying capacity in Deukryang Bay by emergy analysis, *J. Korean Fish. Soc.*, 29, 629-636.
- Gasparatos, A., 2011, Resource consumption in Japanese agriculture and its link to food security, *Energ. Policy*, 39, 1101-1112.
- Ghisellini, P., Zucaro, A., Viglia, S., Ulgiati, S., 2014, Monitoring and evaluating the sustainability of Italian agricultural system: An Emergy decomposition analysis, *Ecol. Model.*, 271, 132-148.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory & Research Center), 2015, National greenhouse gas inventory report of Korea, GIR, Seoul.
- Hong, C. O., Noh, Y. D., Kim, S. Y., Kim, P. J., 2014, Determining effect of oyster shell on cadmium extractability and mechanism of immobilization in arable soil, *Korean J. Environ. Agric.*, 33, 245-253.
- Hong, S., Lee, J., Kang, D., 2015, Emergy evaluation of management measures for derelict fishing gears in Korea, *Ocean Sci. J.*, 50, 603-613.
- Jeong, H., Kim, C., Kim, J., 2015, Evaluating the economic value of environmentally sound functions of environment-friendly agriculture, *J. Rural Develop.*, 38, 61-82.
- Kang, D., 2001, Emergy evaluation perspective on the natural environment and economy of Seoul, *Bull. Korean Env. Sci. Soc.*, 10(S-1), 1-10.
- Kang, D., 2007, Emergy evaluation overview of the natural environment and economy of the Han River basin in Korea, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng.*, 10, 138-147.
- Kang, D., 2013, Emergy-based value of the contributions of the Youngsan River estuary ecosystem to the Korean economy, *The Sea*, 18, 13-20.
- Kang, D., 2015, Emergy evaluation of the Korean economy and environment: Implications for the valuation of marine ecosystem services, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 18, 102-115.
- Kang, D., 2016, Emergy evaluation database for Korea, Unpublished Manuscript.
- Kang, D., Nam, J., 2003, Emergy-based valuation of marine environmental resources and policy implications, Korea Maritime Institute, Seoul.
- Kang, D., Nam, J., Choi, H. W., Son, K., 2015, Spatial valuation map for Gyeonggi Bay in Korea based on emergy methodology, 8th International Ecosystem Services Partnership Conference 2015, 9-13 November, Stellenbosch, South Africa.
- Kang, D., Park, S. S., 2002, Emergy evaluation perspective of a multipurpose dam proposal in Korea, *J. Environ. Manage.*, 66, 293-306.
- K-eco, 2016, Survey on agricultural wastes, K-eco, Incheon, Korea.
- Kim, H. C., Lee, Y., 2007, Heat flow in the Republic of Korea, *J. Geophys. Res.*, 112, B05413.
- Kim, W. S., 2002, Development and application of strategic environmental assessment to the tideland reclamation project by the environmental accounting, MS Thesis, Pukyong National University, Busan, Korea.
- Kim, Y., Jeong, H., Heo, J., 2014, The economic evaluation of the public values of agriculture and rural area in Korea, *J. Korean Soc. Rural Plan.*, 20, 101-112.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2014, Annual climatological report, KMA, Seoul.
- KREI (Korea Rural Economic Institute), 2016, Agricultural outlook 2016, KREI, Naju, Korea.
- KREI, 2017, Agricultural outlook 2017(I), KREI, Naju, Korea.
- KSO (Korea Statistical Office), 2014, Korea statistical yearbook, KSO, Daejeon, Korea.
- Lee, H., Lee, W. K., Kim, J. G., 2005, Emergy analysis of Korean agriculture, *Korean J. Environ. Agric.*, 24, 169-179.
- Lee, K., Yoon, K., Choi, D., Jung, J., Choi, W., Lim, S., 2013, Agricultural soil carbon management considering water environment, *J. Environ. Impact Assess.*, 22, 1-17.
- Lee, S. M., Odum, H. T., 1994, Emergy analysis overview of Korea, *J. Korean Env. Sci. Soc.*, 3, 165-175.
- Lu, H. F., Campbell, D. E., Li, Z. A., Ren, H., 2006, Emergy synthesis of an agro-forest restoration system in lower subtropical China, *Ecol. Eng.*, 27, 175-192.

- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs), 2013, Development plan for agriculture, rural areas and food industry, MAFRA, Sejong, Korea.
- MAFRA, 2014, Agriculture, food and rural affairs statistics yearbook, MAFRA, Sejong, Korea.
- MAFRA, 2015, Agriculture, food and rural affairs statistics yearbook, MAFRA, Sejong, Korea.
- MAFRA, 2016, Agriculture, food and rural affairs statistics yearbook, MAFRA, Sejong, Korea.
- Martin, J. F., Diemont, S. A. W., Powell, E., Stanton, M., Levy-Tacher, S., 2006, Emergy evaluation of the performance and sustainability of three agricultural systems with different scales and management, *Agr. Ecosyst. Environ.*, 115, 128-140.
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2011, Long-term water management plan (2011~2020), MLTM, Seoul, Korea.
- MOTIE (Ministry of Trade, Industry and Energy), 2015, Energy consumption survey, MOTIE, Sejong, Korea.
- NAAS (National Academy of Agricultural Science), 2009, Monitoring project on agri-environment quality in Korea, NAAS, Suwon, Korea.
- NAAS, 2011, Food composition table, NAAS, Suwon, Korea.
- Nam, J., Chang, W., Kang, D., 2010, Carrying capacity of an uninhabited island off the southwestern coast of Korea, *Ecol. Model.*, 221, 2102-2107.
- Nam, J., Kang, D., 2016, Emergy valuation of tidal flat ecosystems in Korea: I. Characteristics of environmental emergy inputs, *The Sea*, 21, 134-143.
- NIAS (National Institute of Agricultural Science and Technology), 2005, Assessment of soil erosion potential in Korea, NIAS, Suwon, Korea.
- NIAS, 2007, Assessment of impacts and vulnerability of agriculture to climate change and adaptation strategies, NIAS, Suwon, Korea.
- NIE (National Institute of Ecology), 2015, National ecosystem assessment for the sustainable land management, NIE, Seochon, Korea.
- Odum, H. T., 1996, Environmental accounting: Emergy and environmental decision making, John Wiley & Sons, New York.
- Odum, H. T., 2000, Folio #2: Emergy of global processes, Handbook of emergy evaluation, Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, USA.
- Odum, H. T., Brown, M. T., Brandt-Williams, S., 2000, Folio #1: Introduction and global budget, Handbook of emergy evaluation, Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL, USA.
- Park, Y. S., Egilmez, G., Kucukvar, M., 2016, Emergy and end-point impact assessment of agricultural and food production in the United States: A Supply chain-linked ecologically-based life cycle assessment, *Ecol. Indic.*, 62, 117-137.
- RDA (Rural Development Administration), 2014, 2013 Income of agricultural and livestock products, RDA, Jeonju, Korea.
- Rydberg, T., Haden, A. C., 2005, Emergy evaluations of Denmark and Danish agriculture: Assessing the influence of changing resource availability on the organization of agriculture and society, *Agr. Ecosyst. Environ.*, 117, 145-158.
- Sagong, J. H., Jung, O. S., Yeo, H. B., 2015, Appraising the worth of ecosystem services of rice-fields in Chungcheongnam-do region, *J. Korean Soc. Rural Plan.*, 21, 1-17.
- Ugiati, S., Odum, H. T., Bastianoni, S., 1994, Emergy use, environmental loading and sustainability: An Emergy analysis of Italy, *Ecol. Model.*, 73, 215-268.
- Wang, Z., Chen, Y., Sui, P., Gao, W., Qin, F., Zhang, J., Wu, X., 2014, Emergy analysis of grain production systems on large-scale farms in the North China plain based on LCA, *Agr. Syst.*, 128, 66-78.
- Yang, D., Lee, E., Lee, J., Kim, M. S., Han, D., Kim, M. H., Cho, K. J., Oh, Y. J., Park, S., 2016, Occurrence patterns of C4 plants in agroecosystems (farming fields) in South Korea, *Korean J. Ecol. Environ.*, 49, 89-101.
- Yi, T., Ziang, P., 2016, Emergy analysis of paddy farming in Hunan province, China: A New perspective on sustainable development of agriculture, *J. Integr. Agr.*, 15, 2426-2436.
- Zhang, X. H., Zhang, R., Wu, J., Zhang, Y. Z., Lin, L. L., Deng, S. H., Li, L., Yang, G., Yu, X. Y., Qi, H., Peng, H., 2016, An Emergy evaluation of the sustainability of Chinese crop production system during 2000-2010, *Ecol. Indic.*, 60, 622-633.

## Appendix, Notes to Table 1.

## 1. Sunlight

Area =  $1.71 \times 10^{10} \text{ m}^2$  (MAFRA, 2015); Insolation =  $4.99 \times 10^9 \text{ J/m}^2/\text{yr}$  (KMA, 2014); Albedo = 0.2 (assumed)  
 Energy = (Area) × (Insolation) × (1 - Albedo) =  $6.84 \times 10^{19} \text{ J/yr}$

## 2. Wind

Average wind speed = 2.2 m/s (KMA, 2014); Geostrophic wind = (Average wind speed) × (10/6) = 3.67 m/s  
 Energy = (Area) × (1.23 kg/m<sup>3</sup>) × (0.001) × (Geostrophic wind)<sup>3</sup> × (3.1536 × 10<sup>7</sup> sec/yr) =  $3.27 \times 10^{16} \text{ J/yr}$

## 3. Rain, evapotranspiration

Rain = 1.17 m/yr (KMA, 2014); Evapotranspiration ratio = 0.42 (MLTM, 2011)  
 Energy = (Area) × (Rain) × (Evapotranspiration ratio) × (1000 kg/m<sup>3</sup>) × (4940 J/kg) =  $4.16 \times 10^{16} \text{ J/yr}$

## 4. Earth cycle

Heat flow = 60 mW/m<sup>2</sup> (Kim and Lee, 2007)  
 Energy = (Area) × (Heat flow) × (0.001 mW/W) × (3.1536 × 10<sup>7</sup> sec/yr) =  $3.24 \times 10^{16} \text{ J/yr}$

## 5. Services, renewable fraction

Annual cost =  $7.23 \times 10^{12} \text{ ₩/yr}$  (KSO, 2014); Renewable fraction = 0.022 (Kang, 2016)  
 Renewable service input =  $1.59 \times 10^{11} \text{ ₩/yr}$

## 6. Labor, renewable fraction

Total labor hours =  $8.18 \times 10^8 \text{ hrs/yr}$  (KSO, 2014)  
 Energy = (Total labor hours) × (104 kcal/hr) × (4186 J/kcal) =  $3.56 \times 10^{14} \text{ J/yr}$   
 Renewable fraction = 0.022 (Kang, 2016)  
 Renewable labor input =  $7.84 \times 10^{12} \text{ J/yr}$

## 7. Topsoil loss

Area of rice paddies =  $9.64 \times 10^5 \text{ ha}$  (MAFRA, 2015); Erosion rate = 1.0 MT/ha/yr (NIAS, 2005); Organic matter = 2.43% (NAAS, 2009)  
 Area of dry paddies =  $7.48 \times 10^5 \text{ ha}$  (MAFRA, 2015); Erosion rate = 37.7 MT/ha/yr (NIAS, 2005); Organic matter = 2.17% (NAAS, 2009)  
 Organic matter loss = (Area) × (Erosion rate) × (Organic matter fraction) =  $6.35 \times 10^5 \text{ MT/yr}$   
 Energy (J) = (Organic matter loss) × (1 × 10<sup>6</sup> g/MT) × (5.4 kcal/g) × (4186 J/kcal) =  $1.44 \times 10^{16} \text{ J/yr}$

## 8. Fuels

Coal use =  $1.56 \times 10^{12} \text{ kcal/yr} = 6.55 \times 10^{15} \text{ J/yr}$  (MOTIE, 2015)  
 UEV of coal =  $1.01 \times 10^5 \text{ sej/J}$  (Brown et al., 2011),  
 Emergy = Annual use × UEV =  $6.61 \times 10^{20} \text{ sej/yr}$   
 Gasoline use =  $7.77 \times 10^{11} \text{ kcal/yr} = 3.25 \times 10^{15} \text{ J/yr}$  (MOTIE, 2015)  
 UEV of gasoline =  $1.95 \times 10^5 \text{ sej/J}$  (Brown et al., 2011)  
 Emergy = Annual use × UEV =  $6.34 \times 10^{20} \text{ sej/yr}$   
 Kerosene use =  $1.15 \times 10^{12} \text{ kcal/yr} = 4.81 \times 10^{15} \text{ J/yr}$  (MOTIE, 2015)  
 UEV =  $1.92 \times 10^5 \text{ sej/J}$  (Brown et al., 2011)  
 Emergy = Annual use × UEV =  $9.24 \times 10^{20} \text{ sej/yr}$   
 Diesel use =  $8.06 \times 10^{12} \text{ kcal/yr} = 3.38 \times 10^{16} \text{ J/yr}$  (MOTIE, 2015)  
 UEV of diesel =  $1.89 \times 10^5 \text{ sej/J}$  (Brown et al., 2011)  
 Emergy = Annual use × UEV =  $6.38 \times 10^{21} \text{ sej/yr}$   
 Bunker use =  $9.22 \times 10^{10} \text{ kcal/yr} = 3.86 \times 10^{14} \text{ J/yr}$  (MOTIE, 2015)  
 UEV of bunker =  $1.80 \times 10^5 \text{ sej/J}$  (Brown et al., 2011)  
 Emergy = Annual use × UEV =  $6.95 \times 10^{19} \text{ sej/yr}$

LPG use =  $8.40 \times 10^9$  kg/yr =  $3.51 \times 10^{13}$  J/yr (MOTIE, 2015)  
 UEV of LPG =  $1.77 \times 10^5$  sej/J (Brown et al., 2011)  
 Emergy = Annual use  $\times$  UEV =  $6.22 \times 10^{18}$  sej/yr  
 Natural gas use =  $1.99 \times 10^{10}$  kcal/yr =  $8.31 \times 10^{13}$  J/yr (MOTIE, 2015)  
 UEV of natural gas =  $1.85 \times 10^5$  sej/J (Brown et al., 2011)  
 Emergy = Annual use  $\times$  UEV =  $1.54 \times 10^{19}$  sej/yr  
 Total fuel energy use =  $4.89 \times 10^{16}$  J/yr  
 Total emergy use =  $8.69 \times 10^{21}$  sej/yr

#### 9. Electricity

Consumption =  $8.55 \times 10^{12}$  kcal/yr =  $3.58 \times 10^{16}$  J/yr (MOTIE, 2015)

#### 10. Lime

Annual use =  $2.39 \times 10^{11}$  g/yr (GIR, 2015)

#### 11. Plastic film

Annual use =  $3.33 \times 10^{11}$  g/yr (K-eco, 2016)

#### 12. Fertilizer

Nitrogen use =  $2.59 \times 10^{11}$  gN/yr (MOTIE, 2015)  
 UEV =  $1.59 \times 10^{10}$  sej/gN (Brandt-Williams, 2001)  
 Emergy = Annual use  $\times$  UEV =  $4.12 \times 10^{21}$  sej/yr  
 Phosphate use =  $3.89 \times 10^{10}$  gP/yr (MOTIE, 2015)  
 UEV =  $1.30 \times 10^{10}$  sej/gP (Brandt-Williams, 2001)  
 Emergy = Annual use  $\times$  UEV =  $5.06 \times 10^{20}$  sej/yr  
 Potash use =  $9.17 \times 10^{10}$  gK/yr (MOTIE, 2015)  
 UEV =  $2.92 \times 10^9$  sej/gK (Odum, 1996)  
 Emergy = Annual use  $\times$  UEV =  $2.67 \times 10^{20}$  sej/yr  
 Total fertilizer use =  $3.90 \times 10^{11}$  g/yr  
 Total emergy use =  $4.89 \times 10^{21}$  sej/yr

#### 13. Pesticides

Annual use =  $1.87 \times 10^{10}$  g/yr (MOTIE, 2015)

#### 14. Machinery

Annual use =  $1.46 \times 10^{10}$  g/yr (calculated based on annual agricultural machinery use statistics (MAFRA, 2014))

#### 15. Services, nonrenewable fraction

Annual cost =  $7.23 \times 10^{12}$  ₩/yr (KSO, 2014); Nonrenewable fraction = 0.978 (Kang, 2016)  
 Nonrenewable service input =  $7.07 \times 10^{12}$  ₩/yr

#### 16. Labor, nonrenewable fraction

Total labor input =  $3.56 \times 10^{14}$  J/yr (KSO, 2014); Nonrenewable fraction = 0.978 (Kang, 2016)  
 Nonrenewable labor input =  $3.48 \times 10^{14}$  J/yr

#### 17. Crop production

Annual production =  $1.78 \times 10^{13}$  g/yr (MAFRA, 2015)  
 Energy =  $1.14 \times 10^{17}$  J/yr (calculated based on production (MOTIE, 2015) and unit energy content of each crop (NAAS, 2011))