

에머지 분석을 통한 논벼 생산의 자원적 가치 평가

이지민 · 김태곤* · 서교**

서울대학교 농업생명과학 연구원 · *서울대학교 그린바이오 과학기술연구원

**서울대학교 국제농업기술대학원, 서울대학교 그린바이오 과학기술연구원

Emergy Evaluation of Resource Values for Rice Paddy Production in South Korea

Lee, Jimin · Kim, Taegon · Suh, Kyo*

Research Institute for Agriculture and Life Science, Seoul National University

**Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University*

***Graduate School of International Agricultural Technology, Institute of Green Bio Science and Technology,
Seoul National University*

ABSTRACT : The purpose of this study is to analyze emergy flows of rice for evaluating the value of rice production and sustainability. Emergy analysis evaluates the sustainability of systems or processes considering all the inputs to make a product or a service. In this study, we analyzed the emergy flows and indices of rice production and compared the regional emergy values using statistical analysis: input materials, hours per unit area(10a), and production costs. As the results, we found that the rates of external investment (EIR= 18.87) and environmental loading (ELR=21.7) are significantly high during the rice cultivation. However, emergy yield ratio(EYR) shows that rice is a valuable resource because EYR is 5.12 and environmental Sustainability Index(SI) value is as low as 0.24 and it shows rice has low sustainability. This study also shows that Chungcheongnam-do has the highest SI value for rice production due to low environmental loading and abundant natural energy during rice cultivation. These results of rice emergy flows and sustainability assessments could provide a way of sustainable rice cultivation with decrease of environmental loading from fertilizer.

Key words : Emergy analysis, Sustainability, Rice cultivation, Regional comparison

1. 서 론

문순기후대인 우리나라는 쌀이 주식으로 논벼가 식량 자급 및 인구 증가에 중요한 역할을 해오고 있으나 식생활의 변화에 따른 쌀 소비의 감소로 인한 재고 증가와 세계화로 인한 쌀 시장 개방이라는 문제에 직면하고 있다. 현재 우리나라 경지 이용 현황은 식량 작물이 1,092천 ha를 차지하고 있으며, 이중 미곡이 883천 ha를 차지하고 있어 식량 작물 중 81%, 농경지 면적대비 51%를

차지한다. 또한 2012년 기준 사료용을 포함한 식량자급율은 23.6%에 그치는 반면 쌀의 식량자급율은 86.1%로 우리나라 식량 자급에 중요한 역할을 하고 있다. 따라서 농업이라고 하면 논농사를 떠올리게 될 정도로 논벼는 우리나라 농업의 대표작물이라 볼 수 있다. 그러나 식생활의 변화에 따른 쌀 소비의 감소로 인한 재고 증가와 세계화로 인한 쌀 시장 개방이라는 문제에 직면하고 있다.

논벼는 식량주권으로써의 사회적 가치, 농가경제 기반으로써의 경제적 가치, 자원 자체로써의 가치 및 환경적 가치 등을 가진다. 이 중 식량안보적 가치(Im and Han, 2003)나 시장외적 기능인 환경보전기능(Oh et al., 1997)을 포괄하는 다원적 기능에 대한 연구(Kim, 1996;

Corresponding author : Suh, Kyo

Tel : 033-339-5810

E-mail : kyosuh@snu.ac.kr

Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 1999; Kong et al., 2013)가 지속적으로 이루어왔다. 그러나 이러한 연구는 논벼가 자체적으로 갖는 가치를 제외하고 있어 가치가 적은 자원으로 인식될 수 있다. 또한 논벼 자체가 갖는 자원적 가치에 대해 다루는 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 논벼가 갖는 자원적 가치를 재조명하고자 에머지 기법을 이용하였다. 에머지 기법은 자연 환경과 경제 활동을 하나의 시스템으로 포괄하며, 인간과의 상호관계를 정량적으로 파악할 수 있는 가치평가 개념으로(Lee et al., 2005; Kim et al., 2008), 지불의사에 기반을 둔 시장 가격을 통한 가치 평가의 한계를 극복할 수 있다는 특징을 가진다(Kang, 2005).

에머지 분석 연구와 관련된 국내 연구로는 우리나라 농업을 대상으로 한 연구(Lee et al., 2005), 산림의 가치를 분석한 연구(Kim et al., 2008), 서울시 환경용량 평가(Lee, 1999)와 세종시 환경용량 평가(Rim, 2013) 등이 존재하며, 국외 연구로는 최근 유기농 오리 쌀의 에머지 분석(Xi and Qin, 2009), 바이오매스의 에머지 분석(Zhang and Long, 2010), 바이오에탄올과 석유의 에머지 분석 비교(Liu et al., 2012) 등이 이뤄졌다. 이와 같이 에머지 분석은 농업뿐 만 아니라 지역, 환경, 에너지를 포괄하여 다양한 대상을 분석할 수 있는 기법으로 알려져 있다.

우리나라 논벼가 갖는 자원적 가치를 살펴보기 위해 본 연구에서는 에머지 분석을 바탕으로 에너지 흐름을 통해 논벼가 가지는 가치와 환경적 지속가능성을 평가하고 논벼 생산이 가지는 가치의 현주소와 지역별 특성을 파악하고자 한다. 이를 위해 먼저 우리나라 논벼 생산에 대한 에머지 분석하고, 부산물의 바이오 에너지화에 따른 에머지 변화에 대해 살펴보고, 도별 분석 결과를 바탕으로 생산지역의 특성을 분석하고 비교하였다.

II. 자료 및 방법

1. 자료

분석을 위한 자료로는 통계청에서 제공하는 ‘2012년 농산물생산비통계(Statistics Korea, 2013)’와 도별 논벼 주요투입물량 및 시간을 이용하였으며, 도별 벼재배 물발자국 연구결과를 활용(Kim et al., 2013)하였다(Table 1). 또한 일조량 및 도별 풍속자료는 신재생에너지 데이터 센터 자료를 사용하였는데 이때 풍속은 해발고도 70m의 바람지도에서 자료를 분석하여 도별 평균값을 이용하였다(Figure 1, Table 1).

지역은 제주도를 제외한 도 단위로 분석하였으나 특별시, 광역시와 제주도의 경우 벼 생산량이 매우 적고, 도 단위 비료사용량, 노동력 및 동력 투입시간 통계자료가 제공되고 있지 않아 분석 대상에서 제외하였다. 통계자료, GIS 자료 및 관련 연구 결과 자료를 활용하여 논벼의 에머지 분석을 위한 데이터를 구축하였으며, 에머지 분석에 사용된 전국 평균 및 도별 자료는 Table 1과 같다.

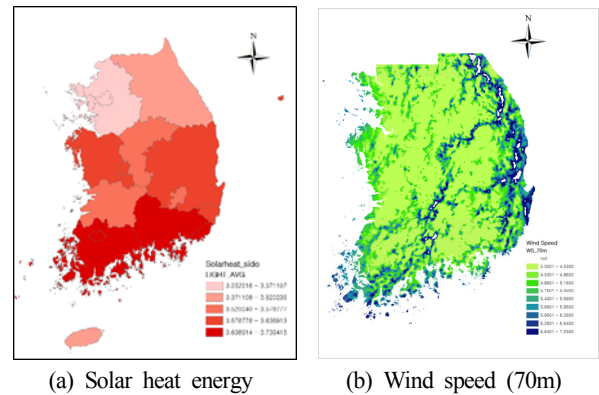


Figure 1. Natural Solar and Wind Resources in South Korea (from KIER)

2. 에머지 분석

에머지 분석 방법은 시스템 생태학자 H.T. Odum에 의해 제안된 방법으로 시스템의 에너지와 재화의 흐름을 하나의 가치 단위인 태양에너지로 평가하는 기법이다. 이러한 기법은 자연의 에너지와 물질을 모두 포함한다는 특성을 가지며 자연의 기여를 계산에 포함하지 못하는 일반 경제학과 차별화되며 인간 사회와 생태계를 포함한 시스템을 포괄적으로 분석하는 특성을 가진다.

에머지는 ‘Energy Memory’ 혹은 ‘Embedded Energy’의 줄인 말로 알려져 있으며, 어떤 물질이나 활동에 투입된 모든 에너지의 총합을 나타낸다. 즉, 재화나 용역에 들어간 직·간접적으로 투입된 모든 것을 하나의 에너지 단위로 나타낸 것을 말한다. 또한 에너지는 에너지가 전환되는 순환 과정에서 서로 다른 계층 구조를 가지므로 공통의 척도로서 태양에머지(Solar emergy)로 산정한다.

에머지 분석을 위해서 먼저 Figure 2와 같이 시스템 경계(system boundary)를 설정하고, 투입된 에너지원별로 에너지를 산정한다. 다음으로 직간접적으로 사용된 에너지를 산정하고 이를 태양에머지로 나타내기 위해 식(1)과 같이 태양에너지 전환계수(Solar transformity)를 곱하여 계산한다.

Table 1. State-level input data for Energy Analysis (per 10a)

Content	Energy	Unit	Country average	GG	GW	CB	CN	JB	JN	GB	GN	Remarks
Natural resource	solar*	kwh/m ² /day	3.76	3.37	3.52	3.58	3.62	3.55	3.74	3.60	3.72	Renewable
	wind*	m/s	3.78	2.86	4.22	4.30	4.59	4.67	5.35	5.03	4.65	
	rain	m ³	560.13	496.67	554.97	629.35	525.60	544.49	543.56	472.64	586.09	
	soil erosion	g/m ²	228.00	228.00	228.00	228.00	228.00	228.00	228.00	228.00	228.00	228.00
Materials	seed	kg	7.15	5.72	6.99	6.31	7.24	8.04	8.16	6.60	6.67	Goods and assets
	N	kg	15.53	21.46	12.93	9.57	20.36	14.00	18.17	5.74	13.09	
	P	kg	5.38	10.14	3.23	1.78	6.75	3.79	6.37	1.75	5.08	
	K	kg	2.33	4.43	1.51	0.78	2.88	1.69	2.69	0.80	2.18	
	pesticide	kg	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	
	irrigation water**	m ³	417.41	347.88	423.00	396.55	445.60	370.13	381.36	456.68	434.61	
Energy and labor	labor	hr	13.47	11.89	16.22	14.44	13.58	13.16	13.38	14.10	13.23	Applied energy and labor
	motor	hr	5.86	10.25	5.24	3.97	9.73	2.55	4.16	4.59	4.40	
Capital service	land	won	239,054	234,658	188,145	211,482	248,046	302,490	223,582	237,974	195,701	Capital service
	capital	won	21,670	19,992	24,175	19,162	23,912	21,300	20,136	22,375	21,328	
Output	rice(rough)	kg	657	607	627	666	688	654	554	685	648	Yield
	straw	kg	693	899	579	871	746	595	556	599	846	Yield

modified and calculated data based on data of Statistics Korea

* solar and wind energy are calculated on the basis of data from KIER

** irrigation water: Kim et al., 2013

*** GG: Gyeonggi-do, GW: Gangwon-do, CB: Chungcheongbuk-do, CN: Chungcheongnam-do, JB: Jeollabuk-do, JN: Jeollanam-do, GB: Gyeongsangbuk-do, GN: Gyeongsangnam-do

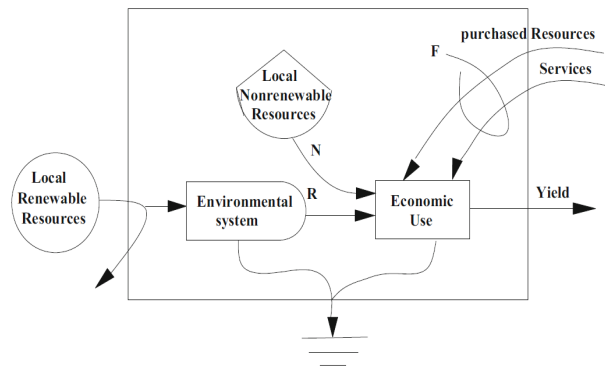


Figure 2. Diagram of the principles of energy analysis (Zhang, and Long, 2010)

$$Em_i = Tr_i E_i \quad (1)$$

Em_i : Solar energy flow of i material or asset

Tr_i : Solar Transformity

E_i : Energy flow of i material or asset

이렇게 계산된 에머지 값은 Table 2와 같은 에머지 지

표를 통해 대상의 가치 및 특성을 파악할 수 있다. 주요 에너지원을 자연 환경에서 얻은 재생가능한 에너지원 R, 재생 불가능한 에너지원 N, 외부로 유입된 재생 불가능한 에너지원 F로 구분하여 지표를 산정한다.

외부 투입된 에너지대비 산출물의 비율과 투입된 자연에너지 대비 외부투입 비율은 EYR(Energy yield ratio) EIR(Energy Investment Ratio)로 각각 정의된다. 또한 재생가능 에너지 대비 외부투입 및 재생 불가능한 에너지원의 비율을 통하여 환경 부하 정도를 나타내는 ELR(Environmental Loading Ratio)을 정의하며, 이러한 ELR 대비 EYR를 통해 환경부하 대비 산출정도 즉 자원 혹은 시스템의 지속가능성을 나타낼 수 있게 된다.

Table 2. Energy metrics and index

Name and abbreviation	Formula
Yield (Y)	Y
Renewable Energy flow (R)	R
Non-renewable energy flow (N)	N
Imported energy flow (F)	F
Energy yield ratio (EYR)	Y/F
Energy investment ratio (EIR)	F / (R+N)
Environmental loading ratio (ELR)	(F+N) / R
Environmental sustainability index (SI)	(EYR) / (ELR)

3. 연구 체계

본 연구에서는 에머지 분석법을 통해 논벼생산이 가지는 자원적 가치와 환경적 지속가능성에 대해 살펴보고자 하였으며, 이를 위해 먼저 통계 및 GIS 자료를 통한 자료 구축하고 전국단위 분석과 지역별 분석을 분리하여 수행하였다. 전국단위 분석에서는 현재 논벼생산의 전과정에 대한 태양에너지 흐름을 분석하고 그 가치와 환경적 지속가능성을 살펴보았으며, 향후 벼짚을 이용한 바이오에탄올을 도입할 경우 그 가치변화를 살펴보았다. 또한 도별로 서로 다른 생산과정에 따른 에너지 흐름의 차이를 비교하고 지역별 특성을 비교하였다.

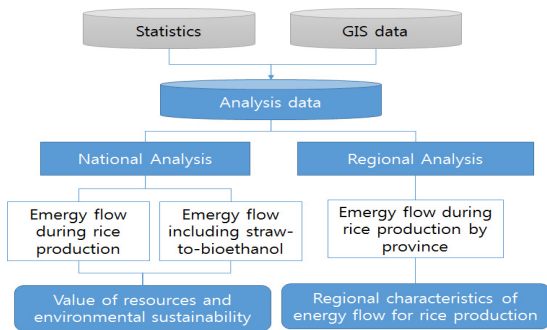


Figure 3. Research processes for energy analysis based on statistical and GIS data

III. 분석 결과

1. 전국 평균을 이용한 에머지 분석

에머지는 단위 면적 10a 당 투입물질 및 에너지와 산출물을 대상으로 분석하였다. 자연 자원의 경우 전국 평균 일조량과 풍속을 기준으로 하였으며 Choe et al.(2003)의 연구를 근거로 벼의 생육일수를 190일을 가정하였다. 또한 표토에너지는 논농사에 의한 표토 유실률과 평균 유기물 함량을 기준으로 산정하였다.

투입 물질 중 질소, 인, 칼륨과 같은 무기질 비료의 경우 통계 자료를 바탕으로 데이터를 작성하였으며, 유기질 비료의 경우 Yun et al.(2011)의 연구결과를 기준으로 함량비율에 따라 산정하였다. 또한 물의 경우, 비에너지는 Kim et al.(2013)의 물발자국 연구 결과 중 그린 워터를 바탕으로 산정하였고, 관개수의 경우에는 블루 워터 양을 토대로 쌀 생산량을 기준으로 산정하였다. 농약의 경우에는 통계 자료가 따로 존재하지 않아 Lee(2012)의 농촌진흥청 연구보고서를 바탕으로 역산하여 작성하였다. 노동력과 동력의 경우 투입시간 통계를 이용하여

에너지로 산정하였다. 노동력의 경우 하루 8시간 작업을 기준으로 산정하였으며, 동력의 경우 트랙터를 기준으로 소요된 경우 소비량을 기준으로 계산하였다.

Table 3은 투입물질별 전국 평균 자료값과 에머지 분석 결과를 에머지를 나타내는 태양에너지 기준 단위인 엠줄(sej: solar emjoules)로 나타내기 위해 사용한 전환계수와 출처를 제시하고 있다. 이 가운데 노동력의 경우 비전문 노동에 해당하는 계수를 적용하였으며, 에머지 분석 결과를 간접 자원을 포함한 경우와 포함하지 않고 투입 물질 및 에너지만을 대상으로 살펴보았을 경우를 구분하여 제시하였다.

논벼생산에 대한 에머지를 분석한 결과(Figure 4), 전체 에머지 중 간접자본이 24%를 차지하며, 투입물질이 35%, 노동력 및 동력이 38%를 각각 차지하였다. 전체 에머지의 73%를 차지하는 투입물질 및 에너지 가운데 가장 큰 값을 가지는 요소는 동력으로 나타났으며, 두 번째로는 간접자본, 세 번째 요소는 관개수인 것으로 분석되었다.

에머지 지표 중 외부에서 유입되는 에머지 비율을 나타내는 EIR은 18.87로 매우 높게 나타났다. 이는 농업의 경우 자연에서 얻은 에너지가 많음에도 불구하고 비료의 사용 및 기계화 진행으로 그 외부에서 투입되는 값이 크기 때문인 것으로 판단된다. 환경 부하율을 나타내는 ELR의 경우 인간 활동에 의한 높은 에머지 흐름을 가질 경우 높은 값을 가지는데 논벼의 경우 21.7(간접 자본 포함 시 40.9)로 1993년 자료를 바탕으로 산정한 이탈리아의 옥수수(3.0)나 과일(9.4)의 ELR 값과 비교해 볼 때(Ulgiati and Brown, 1998) 자연자원보다 외부에서 유입되는 투입에너지가 상대적으로 매우 높음을 의미한다.

시스템의 순 기여도를 나타내는 EYR(Emergy Yield Ratio)의 경우 투입된 에머지에 비해 그 산출물이 1이하의 값을 나타내는 경우 자원으로써 가치가 없는 시스템을 의미한다. 우리나라 논벼의 경우 5.12(간접자본 투입을 포함 시 2.7)로 자원으로써 가치가 있음을 나타내고 있다.

지속성지수(SI, environmental Sustainability Index)는 산출물이 재생자원과 환경에 대한 부하와 관련된다고 가정 한 지수로, 지속가능하기 위해서는 프로세스나 시스템이 높은 EYR을 가지고 낮은 ELR를 가져야 한다. 지속성지수의 값이 1이하의 경우 소비가 많음을 의미하고, 10보다 클 경우 개발이 덜 된 것으로 1과 10사이의 경우 개발이 진행중인 상태로 간주된다. 2005년 우리나라 농업의 경우 지속성 지수가 2.5로 현재개발 진행되는 상태였으나 1989년 이탈리아 농업은 0.17로 지속성이 떨어진다고 판단되었다(Lee et al., 2005). 이를 기준으로 볼 때 우

Table 3. Energy flow of input and output during rice paddy production

Item	Raw data	Unit	Transformity	Solar energy (sej)	Reference	
Renewable sources (R)						
Solar	2.13E+12	J	1.00E+00	sej/J	2.13E+12	Odum, 1996
Wind	1,152,619,852	J	1.50E+03	sej/J	1.73E+12	Odum, 1996
Rain	2,767,019,229	J	1.82E+04	sej/J	5.04E+13	Odum, 1996
Non-renewable sources (N)						
Soil erosion	103,076,064	J	7.40E+04	sej/J	7.63E+12	Odum, 1996
Goods and assets (F1)						
Seed	7.15	kg	9.70E+08	sej/g	6.94E+12	Bastianoni et al., 2001
N	15.53	kg	4.60E+09	sej/g	7.14E+13	Odum, 1996
P	5.38	kg	1.78E+10	sej/g	9.58E+13	Odum, 1996
K	2.33	kg	1.10E+09	sej/g	2.56E+12	Odum, 1996
Pesticide	0.40	kg	1.48E+10	sej/g	5.92E+12	Brandt-Williams, 2001
Irrigation water	417.41	m ³	9.10E+05	sej/g	3.80E+14	Buenfil, 2001
Applied energy and labor (F2)						
labor	17,620,444	J	4.50E+06	sej/J	7.93E+13	Campbell et al., 2005
motor	4,905,992,000	J	1.07E+05	sej/J	5.25E+14	Odum and Odum, 2000
Capital (F3)						
capital service	255.11	\$	1.50E+12	sej/\$	3.83E+14	Saga et al., 2007
Output (Y)						
rice (Y1)	657	kg	4.47E+09	sej/g	2.93E+15	Liu et al., 2012
rice straw (Y2)	693	kg	4.38E+09	sej/g	3.03E+15	Liu et al., 2012

리나라 논벼는 0.24의 값을 가지므로 높은 환경부하를 가지며 발전 상태를 벗어난 상태로 지속가능성이 낮다고 판단될 수 있다. 그러나 타이완을 대상으로 SI 변화를 살펴본 연구(Brown and Ugiati, 1997)에 의하면 과거에서 현재까지 지속적으로 SI가 감소하는 추세를 보이고 있어 현재 상태에서 타 자원과의 비교를 통하여 지속가능성을 보다 명확하게 판단할 수 있을 것으로 보인다.

2. 바이오에탄올을 고려한 에머지 분석

농업부산물인 볏짚은 현재 퇴비와 사료 등으로 활용

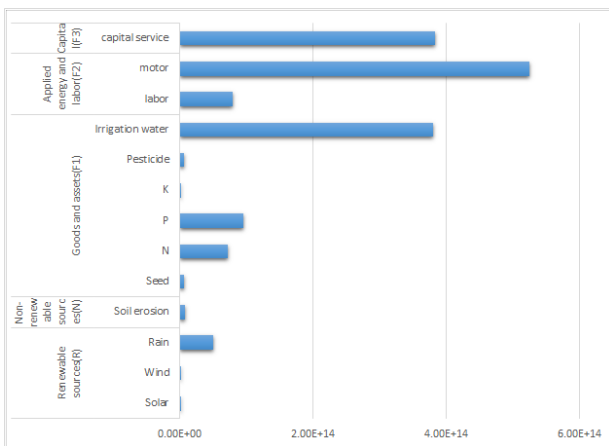


Figure 4. Energy flow of materials and assets

되고 있으나 화석에너지 고갈에 대비하여 신재생에너지인 바이오에탄올의 재료로 주목받고 있다. 따라서 볏짚을 이용하여 바이오에탄올을 생산할 경우 에머지 지수가 어떻게 변화하는지 살펴보고자 하였다. 볏짚을 이용한 바이오에탄올 생산을 고려하기 위해 Saga et al.(2007)의 연구결과에서 제시된 볏짚 단위중량당 바이오에탄올 생산량 및 에너지량과 전환계수를 사용하였다(Table 5).

바이오에탄올 생산 공정에 필요한 에너지는 Liu et al.(2012)의 연구 결과를 바탕으로 10a 단위면적에서 생산되는 볏짚을 바이오에탄올로 생산하기 위해 9.87E+14 sej/10a의 에머지가 필요하며, 바이오에탄올 생산으로

Table 4. Energy flow and indices (significant figure :3)

Item	Value	
	not including capital	including capital
Renewable Energy flow (R)	5.42E+13	
Non-renewable energy flow (N)	7.63E+12	
Imported energy flow (F)	1.17E+15	1.55E+15
Total Energy flow(R+N+F)	1.20E+15	1.61E+15
Energy indices		
Energy investment ratio (EIR)	18.9	25.1
Environmental loading ratio(ELR)	21.7	40.9
Energy yield ratio (EYR)	5.12	3.85
Sustainable index (SI)	0.236	0.094

1.47E+15 sej/10a의 에머지를 얻을 수 있는 것으로 산정하였다.

에머지의 지표 변화를 살펴보면 EYR은 5.12에서 34.8로 6.8배 증가하여 외부 투입대비 산출에너지가 매우 크게 증가하는 것으로 나타났으나, 바이오에탄올 생산 공정으로 인한 환경부하가 포함되기 때문에 이에 다른 ELR 지수 또한 높아져 지속성지수는 오히려 더 감소하는 것으로 나타났다(Table 6). 따라서 벧짚 기반의 바이오에탄올 생산의 지속가능성 확보를 위해서는 바이오에탄올 생산 공정에서의 물질 및 에너지 소비를 줄여야 함을 알 수 있다.

Table 5. Coefficients of rice straw-to-bioethanol yield

Item	Yield (kg/10a)	Bioethanol yield (L/kg)	Energy in Bioethanol (MJ/L)	Transformity (sej/J)
Rice straw	693	0.25	22.1	3.837E+05

Table 6. Emergy flow and indices including bioethanol from rice staw

Item	Value
Yield (Y)	7.44E+15
Renewable Emergy flow (R)	5.42E+13
Non-renewable emergy flow (N)	7.63E+12
Imported emergy flow (F)	2.15E+15
Emergy yield ratio (EYR)	3.48E+01
Emergy investment ratio (EIR)	3.99E+01
Environmental loading ratio (ELR)	3.45E+00
Environmental sustainability index (SI)	8.66E-02

3. 도별 에머지 분석 결과

도별 에머지 분석을 위해서 도별 평균 일조량, 풍속, 논벼 재배에 대한 물 발자국, 도별 비료 투입, 노동 시간 및 동력 사용 시간에 대한 통계 자료를 사용하였다. 논벼는 전국적으로 재배되는 작물이지만 도별로 서로 다른 특성을 가지며, 투입 에너지 및 물질 뿐 만 아니라 생산량에서도 상당한 차이가 존재한다.

따라서 도별 재배 특성 자료를 통해 에머지를 분석한 결과를 바탕으로 지역별 에머지 흐름을 비교해 볼 수 있었다. Figure 5와 같이 자연자원 에머지 흐름은 큰 차이를 보이지 않는 반면 노동력 및 동력 부분에서 지역별로 큰 편차를 가지고 있음을 알 수 있었으며, 경기도와 충청남도의 경우 다른 지역에 비해 상대적으로 큰 값을 나

타내고 있었다. 투입 물질 과 간접 자본에서도 지역별 최대 1.860E+14 sej/10a, 1.636E+14 sej/10a 의 상당한 편차를 보였으나 노동력 및 동력의 지역별 편차(6.823E+14 sej/10a)에 비해서는 차이가 그리 크지 않았다.

먼저 도별 자연 자원의 에머지 흐름을 분석한 결과를 그래프로 살펴보면 Figure 6와 같다. 투입된 자연 에너지의 경우 충청북도가 가장 많으며, 경기도가 가장 적은 자연에너지가 투입된 것을 볼 수 있다. 또한 경상북도는 경기도와 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다. 자연에너지 가운데 가장 큰 비중을 나타낸 것은 비에너지(rain)로 충청북도가 5.66E+13 sej/10a로 가장 많은 것으로 나타났으며, 그 다음으로 경상남도가 큰 5.27E+13 sej/10a 값을 가지는 것으로 나타났다.

투입된 물질과 에너지를 비교한 결과를 살펴보면 (Figure 7), 자연에너지 결과와 반대 경향을 나타내고 있는데 이는 논벼 재배에 필요한 총 에머지를 확보하는 과정에서 자연에너지 확보량이 큰 경우 투입에너지의 양이 상대적으로 적어지기 때문인 것으로 판단된다. 자연에너지 투입 에머지가 가장 컸던 충청북도가 투입 물질 및 에너지 투입량은 가장 적게 나타났으며, 자연에너지 투입 에머지가 가장 적었던 경기도가 투입물질 및 에너지에서는 가장 많은 에머지 투입을 갖는 것으로 나타났다. 경기도와 같이 투입 물질 및 에너지에서 많은 에머지 값을 나타낸 지역은 충청남도 지역으로, 동력 사용이 가장 큰 차이를 나타내고 있으나 비료 사용에 따른 질소와 인의 영향뿐 만 아니라 관개수에 따른 에머지 흐름이 크게 나타났다. 이에 반해 경기도의 경우 비료 사용에 의한 에머지 흐름이 크게 나타났으나 관개수의 양이 적어 두 번째로 적은 지역으로 나타났다.

도별 에머지 지표를 정리한 Table 7을 살펴보면, 환경부하는 경기도가 ELR 값이 33.99로 가장 높고 다음으로 충청남도가 30.43으로 평균(21.7)보다 매우 높은 값을 나타냈다. 시스템의 기여도를 나타내는 EYR의 경우 충청북도가 7.63으로 가장 높으며, 다음으로 전라북도가 높아 자원으로써 가치가 높게 나타났다. 간접자본 투입을 포함할 경우 그 값이 작아서 경상남도가 전라북도보다 높은 값을 보이는 것으로 분석되었다. 지속성 지수(SI)의 경우 간접자본을 포함하지 않았을 경우 충청북도가 0.52로 가장 높은 값을 가지고 그 다음으로 전라북도가 0.48로 지속성이 높은 것으로 나타났으나 간접자본을 포함할 경우 경상남도가 전라북도보다 더 높은 값을 가짐을 볼 수 있다. 따라서 전국 도별 비교에서 논벼의 지속가능성이 가장 높은 지역은 충청북도로 판단되며 이는 논벼에 투입되는 자연자원에너지가 외부투입에너지보다 많기 때문인 것으로 판단된다.

IV. 결론

논벼는 우리나라 주식으로 중요한 역할을 하고 있는 작물이지만 최근 시장개방 및 소비감소로 인해 어려움을 겪고 있다. 이러한 논벼는 식량 자립의 사회적 가치나 농가 수입에의 경제적 가치 뿐 만 아니라 생산시스템으로써의 자원적 가치와 환경적 가치를 가진다.

본 연구에서는 논벼에 투입되는 에너지의 흐름을 통해 자원적 가치와 환경적 지속가능성을 살펴보고자 하였으며, 연구 결과에 따르면 논벼는 자원으로써 가치를 충분히 가지고 있으나 시비법 및 농업 기술 진보로 발달된 농업의 형태로 발전 단계가 지난 것으로 나타났다. 그러나 이러한 지속가능성지수(SI)의 감소는 전 세계적 다른 자원에도 이뤄지고 있어 단순히 산정된 수치만으로 지속가능성이 적다고 판단하기는 어렵다고 생각된다.

또한 볏짚을 이용한 바이오에탄올 생산을 에머지 분석에 포함할 경우 자원으로써의 가치는 6.8배 증가하나 에탄올 생산 공정에 필요한 에머지 투입으로 인하여 지속가능성 지수는 더욱 낮아짐을 알 수 있었다. 그러나 이는 시스템 경계에 의한 결과로 재배 과정에 소비되는 화석연료의 사용을 대체하거나 타 시스템의 화석연료를 대체할 경우에 대한 반영을 추가적으로 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 도별 에머지 지표의 비교는 지역별 자연에너지의 양과 투입 물질의 양에 의해 결정되어 지역별 특성을 파악할 수 있었으며, 논벼생산에 있어서 환경 부하가 가장 적으면서 높은 자원적 가치를 가지는 지역은 충청북도와 전라북도인 것으로 나타났다.

본 연구는 생산 과정 이후 판매, 유통되는 농산물을 다루는 산업적 측면을 시스템 경계 내에 포함하지 않아 함께 다루지 못한 한계를 가지나, 에머지 분석이라는 기법을 적용하여 논벼생산과정의 에너지 흐름을 통하여 논벼가 가지는 자원적인 가치에 대해 평가함에 의미가 있다. 또한 지역별 비교를 통해 환경적 지속가능한 논벼생산 방법에 대해 새로운 문제를 제기할 수 있을 것으로 판단되며, 이와 같은 연구 결과가 국외 쌀 생산의 에머

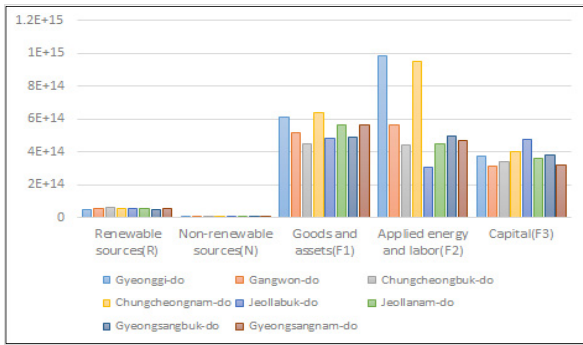


Figure 5. Regional energy flow of renewable sources(R), Non-renewable sources(N), Goods and assets(F1), Applied energy and labor(F2) and Capital(F3)

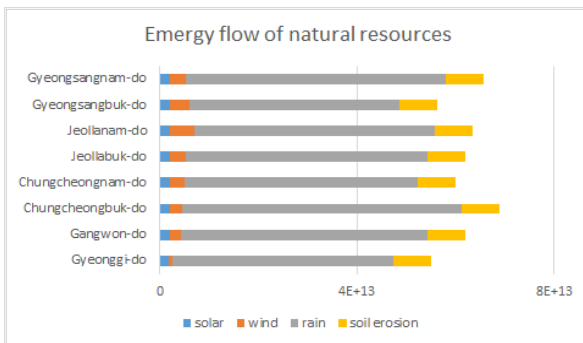


Figure 6. Energy flow of natural resources (solar, wind, rain, and soil erosion) by province during rice paddy production

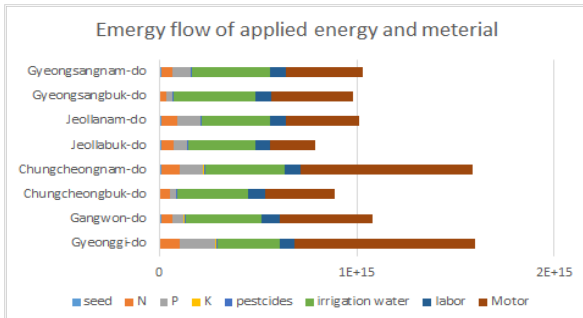


Figure 7. Energy flow of input material and applied energy by province during rice production

Table 7. Emery index by province

Contents		GG	GW	CB	CN	JB	JN	GB	GN
ELR	not including capital	33.99	20.05	14.68	30.43	14.71	18.25	20.33	17.93
	including capital	55.53	39.87	30.96	51.90	34.93	36.30	41.13	34.58
EYR	not including capital	4.15	4.93	7.63	3.99	6.99	4.85	5.79	6.39
	including capital	3.37	3.83	5.52	3.19	4.37	3.58	4.17	4.88
SI	not including capital	0.12	0.25	0.52	0.13	0.48	0.27	0.29	0.36
	including capital	0.06	0.10	0.18	0.06	0.13	0.10	0.10	0.14

* GG: Gyeonggi-do, GW: Gangwon-do, CB: Chungcheongbuk-do, CN: Chungcheongnam-do, JB: Jeollabuk-do, JN: Jeollanam-do, GB: Gyeongsangbuk-do, GN: Gyeongsangnam-do

지 흐름과 시장 개방에 의한 가격 변화 등을 함께 포함하여 살펴본다면 보다 다양한 측면에서 정책적 함의를 가질 것으로 판단된다.

본 연구는 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2013R1A1A3010432)

Reference

1. Bastianoni, S., Marchettini, N., Panziera, M., and Tiezzi, E. 2001. Sustainability assessment of a farm in the Chianti area (Italy). *Journal of Cleaner Production* 9, 365-373.
2. Brandt-Williams, S., 2001. Handbook of Emergy evaluation: A compendium of data for emergy computation issued in a series of folios. Folio# 4. *Emergy of Florida Agriculture*, 32611-6450.
3. Brown, M. T., and Ulgiati, S. 1997. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. *Ecological engineering*, 9(1), 51-69.
4. Brown, M. T., and Ulgiati, S. 2004. Energy quality, emergy, and transformity: HT Odum's contributions to quantifying and understanding systems. *Ecological Modelling*, 178(1), 201-213.
5. Buenfil, A. A., 2001. Emergy evaluation of water, Doctoral dissertation, University of Florida
6. Campbell D.E., Brandt-Williams, S.L., Meisch, M.E.A., 2005. Environmental accounting using emergy: evaluation of the state of West Virginia. USEPA Research Report, EPA/600/R-05/006
7. Choe, D. H., Kim, B. G., Sin, M. S., Nam, J. G., Jeong, J. I., Kim, G. Y., O, M. G., Ha, G. Y., Go, J. G., Lee, J. G., 2003, The Growth duration of rice cropping in unified Korea by analysis of daily mean air temperature characteristics, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 5(3), 185-190.
8. Im, J. B. and Han, D. B., 2003, The value of food security in Korea with self-will government model, *KOREAN JOURNAL OF AGRICULTURAL ECONOMICS* 44(4), 59-77.
9. Kang, D., 2005, Emergy concept and ecosystem valuation, *Korean society of civil engineers* 53(8), 37-41.
10. Kim J., Kang, H., Shin, S. M., 2013, A Study about regional water footprint of rice production in agriculture industry, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 35(11), 827-834.
11. Kim, K. S., 1996, Public function evaluation of rice paddy, *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* 38(4), 27-33.
12. Kim, N. K., Kim, J. L., Park D. G., and Lee, S. M., 2008, A Study on the quantification of forest land values using the emergy synthesis, *Journal of the environmental sciences* 17(3), 305-314.
13. Kong, K. S., Lee, C. L., and Lee M. H., 2013, Evaluating multifunctionality of rice-farming as regards climate change, *Korean Journal of Agricultural Management and Policy* 40(2), 352-380.
14. Lee, C. W., 1999, Study in Seoul environmental capacity assessment, The Seoul Institute Research Report
15. Lee, H. N., Lee, W. K., Kim, J. G., 2005, Emergy analysis of Korean agriculture, *Korean Journal of Environmental Agriculture* 24(2), 169-179.
16. Lee, J., 2012, Development of carbon traceability systems for agricultural products in Korea, Rural development administration
17. Liu, J. E., Lin, B. L. and Sagisaka, M., 2012. Sustainability assessment of bioethanol and petroleum fuel production in Japan based on emergy analysis. *Emergy Policy*, 44, 23-33.
18. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 1999, The multifunctionality of paddy farming
19. New and Renewable Energy Data Center, Korean Institute of Energy Research, <http://kredc.kier.re.kr/kier/>
20. Odum, H.T. and E.P. Odum. 2000. The energetic basis for valuation of ecosystem services. *Ecosystems* 3:21-23
21. Odum, H.T., 1996. Environmental accounting, emergy and decision making. J. Wiley, NY.
22. Oh, S. I., Park, H. T., and Kang, C. Y., 1997, Environmental valuation of rice farming by the alternative method, *Journal of Rural Development* 20(1), 71-85.

23. Rim, B. H., 2013, A study on the environmental capacity sustainability assessment of Sejong city by emergy analysis, Master's Thesis, Kongju University
24. Saga, K., Yokoyama, S., and Imou, K. 2007. Net energy analysis of bioethanol production system from rice cropping. *Journal of Japan Society of Energy and Resources*, 29(1), 30-34.
25. Statistics Korea, 2013, Agricultural production costs statistics 2012, Daejeon
26. Ulgiati, S., and Brown, M. T., 1998. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems. *Ecological Modelling* 108, 23-36.
27. Xi, Y. G., and Qin, P. 2009. Emergy evaluation of organic rice-duck mutualism system. *ecological engineering*, 35(11), 1677-1683.
28. Yun, H. B., Kaown, D. I., Lee, J. S., Lee, Y. J., Kim, M. S., Song, Y. S., Lee, Y. B.. 2011, The nitrogen, phosphate, and potassium contents in organic fertilizer, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 44(3), 498-501.
29. Zhang, G., and Long, W., 2010. A key review on energy analysis and assessment of biomass resources for a sustainable future. *Energy Policy*, 38(6), 2948-2955.

-
- Received 3 September 2014
 - First Revised 26 September 2014
 - Second Revise 10 October 2014
 - Finally Revised 29 October 2014
 - Accepted 29 October 2014