

E3(Energy, Environment, and Economy)관점에서의 농촌 바이오매스 평가 - 벼 재배를 중심으로 -

이지민 · 김태곤* · 서교**

서울대학교 농업생명과학 연구원 · *미네소타대학교 환경연구소
**서울대학교 국제농업기술대학원, 서울대학교 그린바이오과학기술연구원

Assessment of Rice Cultivation in Rural Areas from E3 (Energy, Environment, and Economy) Perspectives

Lee, Jimin · Kim, Taegon* · Suh, Kyo**

Research Institute for Agriculture and Life Science, Seoul National University

**Institute on the Environment, University of Minnesota*

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

ABSTRACT : Population growth and increasing consumption of resources in the process of the industrial development has caused environmental pollution, climate change, and resource exhaustion. Therefore ‘sustainable development’ has become the important issue for the future. The sustainable development aims at effective resource use, less environmental impacts, and higher social security. Generally the rural area including agricultural fields and forest has various and plentiful natural resources which could make future development sustainable. To develop potential rural resources, the values for energy, environment and economy should be assessed considering the life-cycle of resources. The purposes of this study are to suggest the E3 (Energy, Environment, and Economy) assessment model for rural biomass considering life-cycle of resource and to apply the model to rice, the major agricultural product. As the results of this study, it turned out through E3 assessment that economic gain of rice cultivation is 578,374 won/10a, carbon absorption is 1,530 kgCO₂/10a, carbon emission is 926.65 kgCO₂/10a, and bio-energy potential of by-product is 394,028 kcal/10a. When E3 assessment was applied to by province, the results varied by regions because of the amount of input during cultivation. These results would be useful to realize the rural biomass and design regional resources plan in integrated E3 perspective.

Key words : Biomass, E3, Rice, Resources Assessment

1. 서 론

인구 증가와 산업 발달 과정에서의 자원의 소비 증가는 환경오염, 기후 변화, 자원 고갈 등의 문제를 야기하였으며, 미래 세대를 고려한 지속가능한 개발이 중시되고 있다. 지속가능발전은 1987년 UN이 구성한 세계환경개발위원회(World Committee on Environment and

Development)에서 제시된 개념으로 ‘미래세대의 필요를 충족시킬 수 있는 가능성을 손상시키지 않는 범위에서 현재 세대의 필요를 충족시키는 개발’로 정의된다(Doopedia). 지속가능발전의 주요 논의 테마로는 사람(인구, 인적자원), 농업(농업 및 식품 안전), 자연생태(생물 다양성, 생태계), 에너지, 물 등이 지속적으로 주목받아 왔다(Kates, 2011). 이러한 변화는 자원에 대한 인식을 바꾸었으며, 기존의 경제 논리에 의한 자원 개발에서 탈피하여, 환경을 고려한 지속가능한 자원 개발을 중요하게 되었다.

Corresponding author : Suh, Kyo
Tel : 033-339-5810
E-mail : kyosuh@snu.ac.kr

이러한 지속가능개발과 자원에 대한 인식 변화는 농촌 지역의 자원에도 해당한다. 2000년대 이후 농촌어메니티 및 농업의 다원적 기능이 강조되고 있다. 그러나 새로운 시각에 의한 자원의 파악 및 활용이 미흡하여 지역별 자원 현황에 따른 개발보다 농업·농촌의 공공재로서의 역할을 강조한 지원 정책에 머무르고 있는 실정이다. 따라서 농촌지역에 존재하는 다양한 자원을 지속가능개발에 활용하기 위해 에너지/환경 측면을 포함한 가치 평가가 필요하다.

기존 자원에 대한 평가는 주로 경제성 평가를 위주로 이루어져 왔으며, 환경적 가치 또한 지불의사 조사 등의 기법에 한정하여 경제적으로 환산되어 평가되어왔다. 또한 최근 자원에 대한 연구로는 신재생 에너지를 위주로 풍력(Kim, 2008; Kim et al., 2012), 태양열(Yun et al., 2010)의 경우 하나의 자원에 대해 전문화된 연구가 진행되었으며, 한국에너지연구원(Kang, 2006)은 신재생에너지 자원조사 및 통합관리시스템을 구축하여 자원 현황에 대한 자료를 제공하고 있다. 그러나 하나의 자원, 혹은 각 자원별 단편적인 현황 정보 제공만으로는 지역별 사업 추진 및 정책 수립 등에 활용되기 어려우며, 에너지 측면만을 고려하여 경제, 환경 측면에 대한 고려가 불가능한 한계를 가진다.

바이오매스란 에너지원과 자원으로서의 생물체량을 의미하는 것으로 구체적으로는 농작물과 부산물, 가축분뇨, 산림작업 부산물, 산업폐목재, 음식물쓰레기 등을 일컫는다(Park et al., 2007). 농촌 바이오매스와 관련된 연구로는 바이오에너지 부존량과 가스자원화 기술 연구(Hong et al., 2005; Suh et al., 2010; Park, 2013)와 전과정평가를 통한 탄소배출량 연구(Yoon et al., 2012; Ryu et al., 2012), 그리고 농업 에너지 소비에 대한 연구(Kim and Lee, 2009; Kim and Kim 2012)가 있어왔다. 그러나

이러한 연구는 잠재량, 에너지, 환경과 온실가스 각각의 연구로 진행된 한계를 가진다.

E3(Energy, Environment, and Economy) 관점의 적용은 국제화 사회 및 복잡화된 사회구조에서 기존의 경제, 환경을 별개로 취급하던 접근방법에서 탈피하고 에너지, 경제, 환경을 하나의 통합체로 취급하는 분석 방법 요구에 의해 제시된 것으로, 하나의 사안에 따라 부분적으로 접근하는 방식에서 벗어나 종합적으로 고려하는 방식이다(Song et al., 2006). 이러한 E3 관점은 벧짚을 이용한 바이오에탄올에 대해 공정에 관한 E3 평가(Xiao et al., 2009), 콩을 통한 바이오디젤을 일반디젤과 E3 측면에서 비교 평가한 연구(Hu et al., 2008)와 같이 바이오에너지에 대해 적용된 바 있다. 그러나 바이오매스에 대한 종합적인 평가 연구는 찾아보기 어려웠다.

본 연구에서는 농촌의 바이오매스의 E3평가를 위해 우리나라 대표 농작물인 벼를 대상으로 전과정을 고려하여 에너지, 환경, 경제 관점에서 평가하고자 한다. 지역별 E3 결과 비교를 통해 지역별 특성을 살펴보고자 한다.

II. 자료 및 연구방법

1. 자료

우리나라 경지이용 현황은 식량작물이 1,092천 ha를 차지하고 있으며, 이중 미곡이 883천 ha를 차지하고 있어 식량작물 중 81%, 농경지 면적대비 51%를 차지한다.

도별 논벼 재배면적을 살펴보면, 전라남도, 충청남도, 전라북도, 경상북도, 경기도, 경상남도 순으로 나타났으며, 특별시와 광역시 및 제주도는 이들 도에 비해 재배면적이 현저히 적은 것으로 나타났다. 또한 쌀 생산에

Table 1. Rice production in South Korea (Statistics Korea, 2013)

By-province	Area (ha)	Production (kg/10a)	Total cost (won/10a)	Income (won/10a)	Fertilizer (kg)	Labor (Hrs.)	Motor (Hrs.)
GG	90,753	607	694,410	997,649	409.42	11.89	10.25
GW	34,772	627	732,982	990,272	229.67	16.22	5.24
CB	43,245	666	678,351	981,388	127.26	14.44	3.97
CN	153,056	688	766,725	1,019,522	349.22	13.58	9.73
JB	130,260	654	747,018	971,812	191.41	13.16	2.55
JN	171,872	554	687,400	814,116	276.52	13.38	4.16
GB	111,459	685	689,001	1,026,781	127.25	14.10	4.59
GN	79,940	648	657,920	968,667	218.55	13.23	4.40

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

필요한 생산비 통계자료와 소득 통계자료, 투입 물질 및 시간 자료가 도별로 제공되고 있어 분석 범위를 제주도 를 제외한 도 지역으로 한정하였다(Table 1).

분석을 위한 자료에는 통계청에서 제공하는 ‘2012년 농산물생산비통계(Statistics Korea, 2013)’, ‘2012년 농축산물 소득자료집(Statistics Korea, 2013)’과 도별 논벼 주요 투입물질 및 시간을 이용하였으며, 특히 환경성 평가에는 2012년 농촌진흥청의 ‘농식품 부문 탄소이력추적 기반 구축 연구(Lee, 2012)’의 논벼 재배에 따른 탄소원단위 데이터를 이용하였다. 또한 논벼 부산물의 바이오매스 잠재에너지 평가에서는 환경부의 바이오매스 환산계수와 에너지원단위를 이용하였다(Ministry of Environment, 2012).

논벼의 재배과정은 육묘, 정식, 재배, 수확의 과정으로 구성되며, 이러한 재배과정동안 소요되는 물질 및 에너지는 자연자원, 투입물질, 투입에너지로 구분할 수 있다. 이러한 논벼 재배를 위한 투입은 Table 2과 같이 구성하였으며, 이를 기준으로 에너지, 환경, 경제적 영향을 분석하였다.

Table 2. Major inputs of rice cultivation (Statistics Korea(2013) and Lee et al.(2005) modified)

Item	Material and energy	Criteria
Natural Resources	Solar	Solar Radiation
	Wind	Wind power density
	Rain	Green water*
	Topsoil	Topsoil Erosion
Input material	Seed &Seedling	Seed &Seedling expense
	Fertilizer	Fertilizer
	Agricultural Chemicals	Pesticides
	Irrigation	Blue water*, Irrigation
	Other Materials	Other Materials
	Farm Implement /Farm Building &Facilities	Farm Implement, Farm Building &Facilities
Input energy	Labor	Labor hour, Labor
	Custom Work	Custom Work hour
	Fuels &Electricity	Energy consumption, Fuels &Electricity
Others	Other expenses	Other
	Production management	Production management cost
Indirect cost	Land Service	Land Service expense
	Capital Service	Capital Service expense
Products	Main Product	raw rice
	By-Products	Rice straw, rice husk

* Kim et al., 2013

2. 연구 방법

농촌 바이오매스의 환경, 경제, 에너지 측면을 통합적으로 살펴보기 위해 기초적으로 물질흐름분석을 이용하였다. 물질흐름 분석은 잘 정의된 시스템 내에서 물질의 흐름과 축적을 정량화하는 분석 방법으로, 인간 활동의 결과 평가에 중요한 방법론이다(Figure 1). 본 연구에서는 분석에 하향식 접근 방식을 기반으로 통계 및 연구 문헌 등을 통해 자료를 수집하였다.

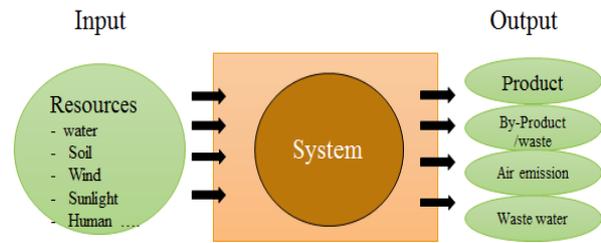


Figure 1. Material Flow analysis

이러한 물질흐름 분석법은 LCA(Life Cycle Analysis)와 에머지 분석법의 기초가 된다. 환경성 평가에 활용되는 LCA 분석은 원료 및 에너지의 소비, 오염물질과 폐기물의 발생 등 생산, 유통, 폐기의 전과정에 걸쳐 환경에 미치는 영향을 분석하는 것으로, 제품 혹은 자원의 전과정에 걸쳐 소모되고 배출되는 물질과 에너지의 양을 정량화하고 환경에 미치는 영향을 평가하여 환경개선을 모색하기 위한 평가방법이다. Lee(2012)은 농업분야 탄소이력추적 연구를 통해 LCI 구축 및 논벼작물에 대한 LCA 수행을 통해 온실가스별 배출량에 지구온난화 지수를 곱해 탄소원단위 산정하였다.

에머지 분석법은 재화와 용역의 생산에 필요한 에너지 측면의 가치를 과학적으로 측정하는 것으로, 각 에너지원별 동일한 단위로 나타내기 위해 태양열 에너지로 환산하여 계산하며, 태양 전환성 환산계수는 많은 학자에 의해 제공되고 있다(Ministry of Environment, 2003).

본 연구에서는 물질흐름분석을 바탕으로 농촌 바이오매스의 경제, 환경, 에너지 평가를 위해 Figure 2와 같은 과정을 통해 생산비 소득분석, 전과정 평가를 통한 탄소 배출량과 에머지 분석 및 바이오 에너지 잠재량을 산정하여 논벼의 E3 평가 결과를 살펴보았다.

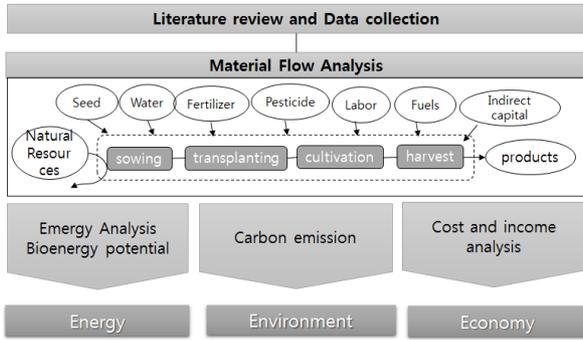


Figure 2. Research method diagram

III. 논벼 E3 평가

1. 논벼의 E3 평가

가. 에너지

논벼 산출물은 주산물인 쌀과 부산물로 벃짚과 왕겨 등이 존재한다. 최근 석유가격 상승 및 화석에너지 고갈로 곡물을 이용한 바이오에너지를 대체에너지로 개발하여 활용하고자 하는 노력이 진행되고 있다. 이러한 바이오에너지원으로써 논벼 산출물의 에너지를 평가하였다.

산출물 중 쌀의 경우 식량으로 이용되고 있으므로 식량과 에너지간의 경쟁관계를 배제하기 위해 이를 제외하고 부산물을 바이오에너지로 활용할 경우 잠재에너지량을 산정하였다. 논벼 부산물이 가지고 있는 에너지 잠재량은 바이오매스 환산계수, 수분함량보정, 에너지이용률, 발열량 환산계수를 적용하여 산정하였다(Table 3).

Table 3. Coefficients in calculating bioenergy potential (Park, 2013)

By-products	Biomass conversion factor	Dry matter rate	Heating value (Kcal/kg)	Use rate for energy
Straw	1.02	0.85	3418	0.146
Husks	0.177	0.85	3618	0.302

그 결과 쌀 부산물이 가지는 바이오에너지 잠재량은 10a 당 394,028 kcal(0.039TOE)으로 벃 재배로 인한 부산물 바이오에너지 잠재량이 총 3.467×10^5 TOE로 나타나 우리나라 에너지 총 사용량의 0.2%에 해당하며 바이오에너지로써 높은 효용 가치를 가진다고 볼 수 있다. 또한 에너지 사용률이 변화함에 따라 그 잠재량은 더 커질

수 있음을 알 수 있다.

이러한 잠재에너지 열량 뿐 만 아니라 실제 바이오에너지로 개발할 경우를 살펴보기 위해 바이오에탄올을 생산할 경우를 가정하였다. 벃짚 1kg은 바이오에탄올 450 ml 생산 가능하므로, 위와 동일한 에너지사용률 14.6%를 적용할 경우 10a 당 에탄올 생산 가능량은 37.42 리터를 생산할 수 있으며 에탄올 발열량을 적용하면 18.9 TOE에 해당한다. 왕겨의 경우, 당 생성을 55%, 에탄올 생성을 47%(Song, 2009), 에너지 활용을 30.2%를 적용할 경우 10a당 9.95리터의 바이오에탄올을 생산 가능하다. 발열량을 적용하면 5.02 TOE에 해당한다. 에탄올 생산에 따른 에너지량은 23.92 TOE로 잠재에너지 열량보다 감소함을 알 수 있다.

벃짚의 경우 열병합발전 및 바이오가스 생성에 관한 연구가 진행된 바 있으나, 열병합발전의 경우 불순물 처리 기술개발을 필요로 하며, 바이오가스는 실용화 단계에 이르지 못하여 바이오에너지 생산량을 추정하기 어려워 본 연구에서 비교 대상에서 제외하였다.

나. 환경

환경성 평가에서는 벃 재배에 의한 탄소배출량과 흡수량을 살펴보았다. 10a 당 논벼에서 배출되는 탄소발생량은 $926.65 \text{ kgCO}_2/10a$ 이며, 흡수량은 $1,530 \text{ kgCO}_2/10a$ 으로 10a 당 $603 \text{ kg}/10a$ 탄소 이득을 얻는 것으로 나타났다(Lee, 2012). 이는 전국 논벼를 기준으로 $5.3 \times 10^6 \text{ tonCO}_2/\text{year}$ 로 우리나라 총 탄소 배출량의 0.8%에 해당한다. 따라서 논벼 재배는 우리나라 탄소배출량 저감에 기여함을 알 수 있다.

다. 경제

논벼 10a 재배를 통한 총수입은 988,815원이며, 이중 생산비가 712,524원으로 순수익은 276,291원으로 나타났으며, 소득은 578,374원/10a으로 전국 면적으로 환산하면 4조 8,981억 원으로 나타났다. 이는 우리나라 GDP의 0.3%를 차지하는 금액이다. 이러한 경제적 가치는 시장에 의해 형성되므로 계속 변화하는 특징을 가진다.

주산물인 쌀은 정부정책에 의해 가격변화가 크지 않을 것이지만 부산물의 경우 그 활용도에 따라 경제적 가치가 변화될 것으로 판단된다.

현재 기준 부산물은 10a 당 30,829원의 경제적 가치를 가지고 있으나 이를 활용하여 바이오에탄올이 47.37리터/10a을 생산할 경우, 10a 당 35,230원¹⁾ 가치를 가지므로 나타났다. 그러나 이 값은 국제유가, 환율, 국제곡물가 등의 영향을 크게 받아 그 잠재적 경제 가치는 다를 것을 판단된다.

2. 논벼 재배과정의 E3 평가

논벼 생산에 따른 물질흐름분석을 살펴보면 주요 투입원은 자연자원, 투입물질, 투입에너지 및 간접자본으로 나타났으며, 산출물은 주산물인 쌀과 주요 부산물인 벧짚과 왕겨로 나타났다. 각 투입물질별로 경제성, 환경성, 에너지를 평가하기 위해 먼저 투입된 물질의 양 혹은 시간을 기준으로 두었으며, 물발자국 연구 결과를 활용하였다. 재배면적 10a 기준으로 시간 혹은 물질의 양에 따라 환산하여 계산하였다.

먼저 논벼의 재배과정 투입된 에너지 분석을 위해 재배과정 중 투입된 물질(Statistics Korea, 2013)을 이용하여 에너지 분석²⁾을 실시하였다. 투입 물질량과 각 물질별 태양에너지 전환 계수를 통해 투입에너지를 계산하였다. 에너지 분석 결과, 재배과정에서 총 1.23×10^{15} sej/10a 이 소비되는 것으로 나타났으며, 투입되는 물질과 에너지를 비교해 볼 때, 관개수와 동력 사용이 주요 투입 에너지로 나타났다(Figure 3).

논벼의 환경 분석은 Lee(2012)의 연구결과를 이용하여 이산화탄소 배출량을 기준으로 평가하였다. Lee(2012)은 그의 연구에서 논벼 생산에 들어간 자재 사용 시 배출되는 것 뿐 만 아니라 자재 재료 단계를 포함하여 전과정 평가를 기반으로 탄소배출량을 산정하였다. 본 연구에서

는 그 결과를 투입물질별로 합산하여 이용하였다. 온실가스 주요 배출 물질은 메탄발생이 $663.7 \text{ kgCO}_2/10\text{a}$ 로 주를 이루며, 재배 과정 중 탄소 배출이 가장 많은 단계는 비료사용에 의한 것으로 나타났다. 따라서 비료가 환경 영향에 중요한 요소로 논벼재배의 환경영향을 줄이기 위해서는 비료 사용량을 줄여야 할 것으로 나타났다.

벼의 경제성 분석은 재배 단계에 소요되는 생산비(Statistics Korea, 2013)를 통해 살펴보았다. 재배단계에서 가장 큰 비용이 소요되는 것은 토지간접자본과 노동비로 나타났다.

이러한 에너지, 환경, 경제 평가 결과를 살펴보면 재배단계에서 각 영역별 주요 요인이 다를 수 있다. 따라서 하나의 측면에서 정책이나 계획의 수립 시 다른 영역에서의 영향을 무시하게 되어 부영향이 발생할 수 있으므로, 정책이나 계획에서 E3 통합적 관점이 필요함을 알 수 있다.

3. 지역별 E3 통합 평가

앞서 우리나라 전국 평균적 논벼 재배에 따른 환경, 경제, 에너지 평가 결과를 살펴보았다. 그러나 도별 투입 물질 및 에너지에 차이가 존재하며, 단위면적 당 생산량 및 소득에도 편차가 존재한다. 따라서 이에 따른 E3 평

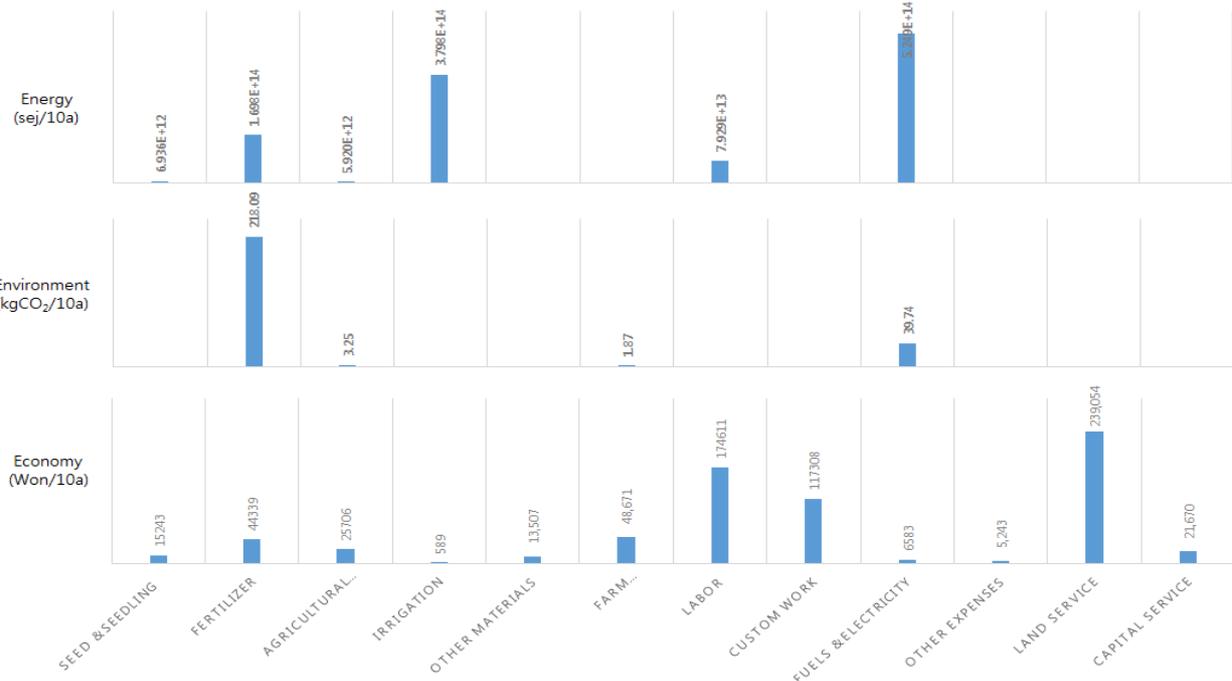


Figure 3. E3 results of each material for rice cultivation (organized with Statistics Korea(2013) data, Lee(2012)'s results and energy analysis results)

가결과도 지역별로 다른 특성을 보이므로 이를 분석하였다. 탄소배출량의 경우, 비료 및 동력사용에 비례하여 이산화탄소가 배출됨을 가정하여 산정하였으며, 재배과정에서의 투입 에너지를 평가한 에머지 분석 결과와 부산물의 바이오에너지량은 합쳐서 제시할 경우 그 의미가 사라지므로 각각 결과를 제시하였다.

도별 단위 면적당(10a) 벼 생산에 따른 환경, 경제, 에너지 평가 결과, 경상북도와 충청북도가 소득이 가장 높으며, 탄소배출량은 경기도와 충청남도가 가장 크게 나타났다(Figure 4, Table 4). 소득대비 탄소배출량은 전라남도가 가장 크게 나타나 경기도보다 높았다. 이는 전라남도의 경우 단위면적당 소득이 다른 지역에 비해 현저히 낮기 때문이다.

총 에머지 분석 결과를 살펴보면, 전라남도를 제외하고 큰 편차는 없었으나, 탄소배출량과 유사한 경향을 나타냈다. 이는 에머지 분석에서도 비료와 동력사용이 총 에머지의 57%를 차지하기 때문이다. 반면 바이오에너지 잠재량은 10a당 논벼 생산량에 비례하는 바이오매스량에 영향을 받아 경상북도와 충청남도 지역이 높게 나타났다.

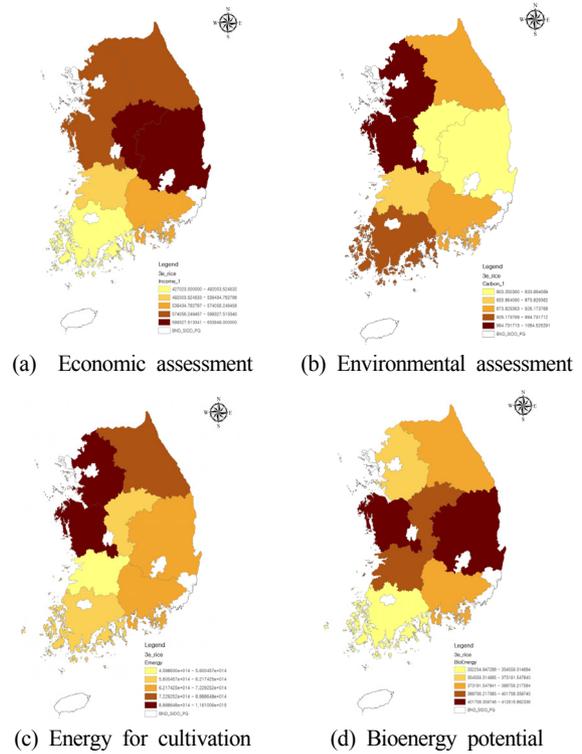


Figure 4. Maps for regional E3 results by province

Table 4. Regional E3 results by province

By province	Economic assessment	Environmental assessment	Energy assessment	
	Income (won/10a)	Carbon emission (kgCO ₂ /10a)	Energy for cultivation (E+12sej/10a)	Bioenergy potential (kcal/10a)
GG	589,308	1,085	1,655	364,041
GW	589,910	899	1,143	376,036
CB	599,946	803	959	399,426
CN	588,203	1,030	1,647	412,620
JB	522,214	848	852	392,229
JN	427,023	931	1,076	332,255
GB	633,949	808	1,037	410,821
GN	573,720	883	1,099	388,630

에너지, 환경, 경제 영역은 Figure 5와 같이 각각의 단위로 평가되며, 이를 하나의 단위로 치환하여 통합한다면 각각의 영향이 상쇄될 수 있어 각 지역이 가지는 3가지 측면의 값을 파악하고 효율적으로 비교할 수 있는 방안이 필요하다.

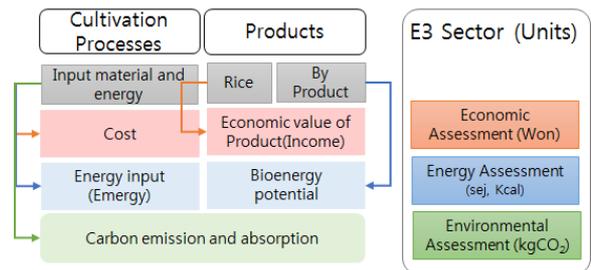


Figure 5. Different units in E3 assessment and results

먼저 각 평가 영역 간의 관계를 살펴보기 위해 상관성분석을 실시하였다. 그 결과 단위면적당 소득과 바이오에너지 잠재량이 상관성 계수 0.77로 높은 상관성을 보였으며, 총 에머지와 CO₂배출량간의 상관성계수가 0.88로 높은 상관성을 보였다(Table 5). 총 에머지량은 재배단계에 투입된 에너지량을 나타내므로 CO₂배출량과 함께 환경적 부담을 나타내고 있어 환경성 평가에는 CO₂배출량을 대푯값으로 가정하여 평가하였다.

Table 5. Correlation among regional results of sectors

Sector	CO ₂ emission	Bioenergy potential	Energy for cultivation
Income	-0.099	0.77	0.33
CO ₂ emission		-0.32	0.88
Bioenergy potential			0.047

각 영역별 값을 Z값으로 표준화하고 확률값을 좌표 상에 나타내었다. x축은 소득으로 경제성을 나타내고 y 축은 탄소배출량으로 환경부담 정도를 나타내었다. 좌표에 표시된 원의 면적이 지역별 바이오에너지 잠재량을 나타낸다(Figure 6).

탄소배출량이 적고 바이오에너지 잠재량 및 소득이 높을수록 논벼 재배의 E3 평가가 우수한 지역에 해당하므로, 평가 결과, 경상북도와 충청남도가 우수한 지역에 해당함을 알 수 있다. 경기도와 충청남도는 탄소배출량이 많아 환경적으로 좋지 못한 지역에 해당한다. 전라북도는 환경측면과 바이오에너지잠재량 측면에 우수하나 경제성에서 떨어지는 지역으로 나타났다.

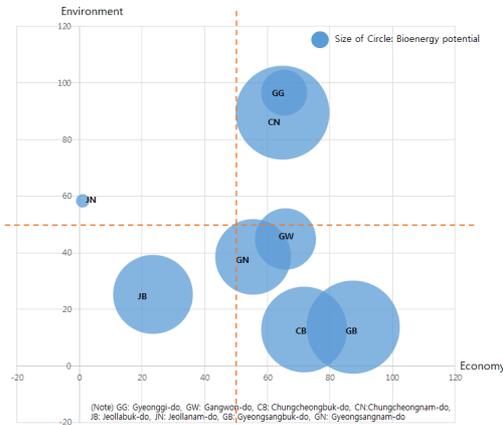


Figure 6. Comprehensive regional E3 results

V. 결론

본 연구에서는 농촌 바이오매스를 경제, 환경, 에너지 측면의 통합적 시각에서 파악하고 활용하기 위해 물질흐름분석을 토대로 우리나라 대표 농작물인 벼를 대상으로 E3(에너지, 환경, 경제) 영역을 평가하였다.

먼저 전국단위 논벼의 E3 평가를 통해 벼 재배로 인한 경제적 효과는 578,374원/10a(4조 8,981억 원)이며, 탄소흡수량은 1,530 kgCO₂/10a (12,957 천tonCO₂), 탄소배출

량은 926.65 kgCO₂/10a (7,847 천tonCO₂), 재배단계 에너지 소비량은 1.23×10¹⁵ sej/10a, 부산물로 인한 에너지 확보 잠재량은 394,028 kcal/10a (3.337×10¹² kcal)으로 나타났다. 또한 재배과정에서의 E3 평가를 통해 재배과정에서 각 영역에 가장 큰 영향을 주는 요소를 도출하였다.

도별 생산비 및 소득, 투입물질의 양 차이를 반영한 결과 경제성 분석에서는 경상북도와 충청북도가 높은 순위를 차지했으며, 환경성 분석에서는 경기도와 충청남도가 탄소배출량이 크게 나타났다. 에너지 분석에서는 경기도와 충청남도가 총에너지 소비가 큰 것으로 나타나 환경성 평가와 유사한 결과를 보였다. 반면 바이오에너지 잠재량은 산출물에 의해 발생하는 것으로 경상북도 및 충청남도 지역이 높게 나타났다. 이러한 분석은 단위 면적에 의한 결과로 지역별 재배면적에 따라 지역의 총량의 순위는 변화할 것으로 판단된다.

본 연구는 도 단위 광역지역별 논벼의 E3 특성을 비교하였으나 향후 지역별 재배 규모 등을 고려한 단위 농가당 연구가 필요할 것으로 판단되며, 부산물로 인한 바이오 에너지의 경우 이론적 잠재량이 아닌 생산 규모 및 경제성을 포함한 유효 발생량에 대해 향후 연구에서 검토할 예정이다.

주1) 휘발유가격 대비 가격 비율은 계속 변화하고 있으며 그 값이 0.67~1.49(2008년~2011년 기준, Sim, 2012)에 분포하여 평균적으로 1.1을 적용함. 또한 현재(2014년 8월) 국제 유가(676.1 원/l)를 기준으로 산정함

주2) 에너지 분석법은 어떤 물질이나 활동에 투입된 모든 에너지의 총합을 하나의 에너지 단위로 나타내는 방법이다. 직간접적으로 사용된 에너지를 산정하고 이를 태양에너지로 나타내기 위해 태양에너지 전환계수(Solar transformity)를 곱하여 계산

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

References

1. Doopedia, www.doopedia.co.kr (September, 2014)
2. Hong S. G., 2005, Production and effective use of fuel gas from agricultural biomass, Ministry of Agriculture, Food and Rural affairs
3. Hu, Z., Tan, P., Yan, X., & Lou, D.. 2008. Life cycle energy, environment and economic assessment of soybean-based biodiesel as an alternative

- automotive fuel in China. *Energy*, 33(11), 1654-1658.
4. Kang, Y. H., 2006, An Analysis of New and Renewable Energy Resources and the Establishment of the Integrated Management System, Korea Institute of Energy Research
 5. Kates, R. W., 2011. From the Unity of Nature to Sustainability Science: Ideas and Practice. CID Working Paper No. 218. Center for International Development, Harvard University. Cambridge, MA: Harvard University, March 2011.
 6. Kim, C. and Lee, H. G., 2009, CO₂ Emission Analysis of Energy Consumption in Agricultural Sector, *Journal of Rural Development* 32(1): 41-61
 7. Kim, H. G., Kim, K. H., and Kang, Y. H., 2012, Wind Resource Assessment for Green Island-Dokdo, *Journal of the Korean Solar Energy Society* 32(5): 94-101
 8. Kim, H. H. and Kim, J. K., 2012, The Determinants of the Changes in the Energy Consumption Patterns in Agriculture, Forestry and Fishery Sectors, *Journal of Rural Development* 35(1): 111-136
 9. Kim, Hyun-Goo, 2008, Preliminary Estimation of Wind Resource Potential in South Korea, *Journal of the Korean Solar Energy Society* 28(6): 1-7
 10. Kim, J., Kang, H., and 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. Lee, H. N., Lee, W. K., and Kim, J. G., 2005, Energy Analysis of Korean Agriculture, *Korean Journal of Environmental Agriculture* 24(2), 169-179.
 12. Lee, J. S., 2012, Development of carbon traceability systems for agricultural products in Korea, National Academy of Agricultural Science, RDA
 13. Ministry of Environment, 2003, Study on Development Calculation Model of Environmental Capacity and Environmental Indicators
 14. Ministry of Environment, 2012, Greenhouse Gas Environmental Assessment Guidelines
 15. Park, H. T., Kim Y. J., Lee, S. M., and Han H. S., 2007, Policy Issues and Strategies to Boost Biomass Utilization in Agricultural Sector: Problems and Issues in Korea, Korea Rural Economic Institute
 16. Park, W. K., 2013, Establishment and Assessment of Biomass Inventory for Bioenergy, Rural Development Administration
 17. Ryu, J. H., Kwon, Y. R., Kim, G. Y., Lee, J. S., Kim, K. H., and So, K. H., 2012, Life Cycle Assessment (LCA) on Rice Production Systems: Comparison of Greenhouse Gases (GHGs) Emission on Conventional, Without Agricultural Chemical and Organic Farming, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 45(6): 1157-1163
 18. Sim, S. W., 2012, Economical efficiency analysis of bioethanol for transportation, Master's thesis, Korea University
 19. Song, I., 2009, Bioethanol production based on lignocellulosic amterials, Gyeonggi Health and environment researcn institue
 20. Song, J. H., Jeong, S. J., Kim, K. S., and Park, J. W., 2006 System Dynamics Model for Analyzing and Forecasting the National Energy - Economy - Environment(3E) Changes under Levying of Carbon Tax, *Korean System Dynamics Review* 7(2): 149-170
 21. Statistics Korea, 2013, Agricultural Production Cost Survey Report
 22. Suh, K., Kim, T. and Lee, J. J., 2010, Evaluations of Potential Biofuels and Environmental Implications with Latent Biomass Resources in South Korea, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(4): 35-44
 23. Xiao, J., Shen, L., Zhang, Y., & Gu, J., 2009. Integrated analysis of energy, economic, and environmental performance of biomethanol from rice straw in China. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(22), 9999-10007.
 24. Yoon, S. Y., Kim, Y. R., Kim, T. H., Park, J. H., and Ahn, S. W., 2012, Study of Garlic's Carbon Footprint though LCA *Korean Journal of Organic Agriculture* 20(2): 161-172
 25. Yun, C. Y., Kim, K. D., Jo, D. K. and Kang, Y. H., 2010, Development of Solar Energy Resource Assessment System Using GIS, *Proceeding of Korean Solar Energy Society*
-
- Received 3 September 2014
 - First Revised 7 October 2014
 - Finally Revised 9 January 2015
 - Accepted 9 January 2015