

사례분석을 통한 농촌형 저탄소 녹색마을 타당성 검토

A Study on the Validity of Rural Type Low Carbon Green Village Through Case Analysis

도인환 · 황은진 · 홍수열* · 배재근[†]
In-Hwan Do · Eun-Jin Hwang · Soo-Youl Hong* · Chae-Gun Phae[†]

서울과학기술대학교 환경공학과 · *자원순환사회연대
Graduate School of Environment, Seoul National University of Science & Technology
*Korea Zero Waste Movement Network

(2010년 1월 14일 접수, 2011년 12월 22일 채택)

Abstract : This study examined the overall feasibility of low carbon green village formed in rural area. The check method is analyzing its environmental and economic feasibility and energy self-reliance. The biomass of the villages was set as 28 ton/day of livestock feces and 2 ton/day of cut fruit tree branches which make up the total of 30 ton/day. The facility consisted of a bio gasification facility using wet (livestock feces) biomass and combined heat power generator, composting facility and wood boiler using dry (cut fruit tree branches) biomass. When operating the system, 540,540 kWh/yr of electricity and 1,762 Gcal/yr of heat energy was produced. The region's electricity energy and heat energy self-reliance rate will be 100%. The economic feasibility was found as a loss of 140 million won where the facility installation cost is 5.04 billion won, operation cost is 485.09 million won and profit is 337.12 million won. There will be a loss of about 2.2 billion won in 15 years but in the environmental analysis, it was found that crude replacement effect is about 178 million won, greenhouse gas reduction effect is about 92 million won making up the total environmental benefit of 270 million won. This means, there will be a yearly profit of about 130 million won. In terms of its environmental and economic feasibility and energy self-reliance, this project seemed to be a feasible project in overall even if it manages to get help from the government or local government.

Key Words : Green Village, Low Carbon, Rural Type, Biomass, Biogas

요약 : 본 연구는 저탄소 녹색마을을 Y군의 협조를 얻어 A, B, C마을에 설치한다는 전제에서 환경성, 경제성, 에너지자립도 등을 분석하여 종합적인 타당성을 검토하였다. 대상 바이오매스의 종류 및 양은 가축분뇨 28톤/일, 과수전정지 2톤/일로 하루 30톤 규모로 시설용량을 설정, 시설은 습식계(가축분뇨) 바이오매스를 이용한 바이오가스화 시설과 건식계(전정가지) 바이오매스를 이용한 화목보일러 시설, 열병합발전기, 퇴비화시설 등으로 구성하였다. 구성된 시스템을 운전하였을 때, 전기생산량은 540,540 kWh/년, 열에너지 생산량은 1,762 Gcal/년으로 분석되었다. 대상마을 가구(129가구)에서 기존에 사용하고 있는 전기에너지는 309,600 kWh/년으로 시설에서 생산된 전기에너지를 공급하면 대상지역의 전기에너지 자립률은 100%가 되며, 잉여전력은 230,940 kWh/년이었다. 또한 열에너지는 대상마을의 비닐하우스에서 소요되는 양을 산정하였으며, 기존 사용량 1,415 Gcal/년으로 열에너지 자립률 역시 100%가 되며, 잉여량은 347 Gcal/년이 되었다. 경제성은 시설설치비용 504,000만원, 운영비 48,509만원, 수익 33,712만원으로 연간 약 1억 4천만원 적자, 15년 동안 약 22억원의 적자이나, 환경성 분석에서 원유대체효과 약 178백만원, 온실가스감축효과 약 92백만원으로 연간 총 2억 7천만원의 환경적 편익이 발생되어, 종합적으로는 연간 약 1억 3천만원 정도의 편익이 발생되었다. 정부 및 지자체의 예산지원을 통하여 진행되더라도 경제성, 환경성, 에너지자립도를 종합하여 볼 때, 충분한 타당성이 있는 사업이라고 판단되었다.

주제어 : 녹색마을, 저탄소, 농촌형, 바이오매스, 바이오가스

1. 서론

최근에 국내외적으로 이슈화 되어 있는 환경문제는 기존 화석연료의 고갈로 인한 에너지자원 문제, 지구온난화로 인한 각국의 온실가스 감축의무 등의 지구온난화 문제, 유기성폐기물의 해양배출 금지 및 육상처리방안 등으로 인한 폐기물의 처리문제 등으로 크게 대별된다. 이러한 자원·환경 위기의 시대를 맞아 '저탄소 녹색성장'이 미래 국가경쟁력의 핵심으로 본격 대두되고 있으며¹⁾, 그 대책 중에 바이오매스가 포함되어 있다.²⁾

바이오매스의 종류에는 식물성폐기물, 하수슬러지, 축산

분뇨 등이 있는데 이들은 심한 악취물질로써 처리를 필요로 한다. 특히 음식물류 폐기물에서 발생하는 폐수와 하수슬러지의 경우, 지금까지는 처리비용이 비교적 저렴한 해양배출로 많이 처리하였으나, 런던협약과 96의정서로 2012년부터 해양배출이 단계적으로 강화 및 금지될 예정이다. 따라서 육상에서의 처리방안을 모색하여야 한다. 또한, 화석연료를 과도하게 사용하여 야기된 지구온난화를 막기 위해 기후변화협약을 체결하는 등 온실가스를 줄이기 위한 각국의 노력을 기울이고 있다. 특히, 2005년 2월 '교토의정서'가 발효됨에 따라 38개국의 선진국들은 2008년을 기점으로 온실가스 감축의무를 부여받았고, 우리나라도 2013년부터 이를 피하기

[†] Corresponding author E-mail: phae@seoultech.ac.kr Tel: 02-970-6617 Fax: 02-971-5776

는 어려워 보인다. 여기에서 최근에는 원유가격이 150달러에 이르는 등 사상초유의 고유가 시대를 맞고 있어, 국가 에너지 정책에도 영향을 미치고 있다. 특히 기후변화협약 및 고유가에 대처하기 위하여 EU, 일본, 미국 등의 선진국에서는 폐자원 및 바이오매스를 이용한 친환경적인 정책을 추진하고 있다.³⁾

일본의 경우 하수슬러지, 음식물쓰레기, 가축분뇨, 산림 및 농업부산물물을 이용하는 도·농 복합형 바이오타운을 조성하여 2010년까지 300개가 바이오매스타운 조성 계획이 수립되었으나, 2011년 초에 300개 지정되어 조성이 진행되고 있다. 또한, 독일의 경우는 음식물쓰레기, 농업부산물, 건초, 가축분뇨, 산림부산물물을 활용한 농촌형 바이오타운 건설·운영에 530만 유로가 사용되었다.⁴⁾

이러한 움직임 속에서 우리나라에서도 “저탄소 녹색성장”이라는 새로운 국가 정책기조를 제시하고, 세부 실천계획 등을 마련하고 있다. 특히 환경부에서는 “폐자원 및 바이오매스 에너지대책”을 수립하고 있으며, 다양한 대책 중에 2020년까지 “저탄소 녹색마을 600개 조성”을 실천과제로서 제시하고 있다. 해당지역에서 발생하는 폐자원 및 바이오매스를 순환이용, 에너지화하여 마을단위로 에너지자립도를 제고한다는 계획이다. 전국에 조성될 600개의 저탄소 녹색마을은 각 지역의 특성에 따라 유형별(도시형, 농촌형, 도농복합형, 산촌형, 어촌형 등)¹³⁾로 시범사업을 거쳐 조성될 예정이다.⁵⁾ 이 중에서 국내 각 지역의 수많은 농촌이 형성되어 있는 것으로부터 농촌형 모델개발에 따른 수요가 클 것으로 기대된다.

농촌형의 특징은 인구밀도가 낮아 음식물류폐기물의 발생량이 적고, 발생된 음식물류폐기물도 가축에게 먹이거나, 근처 논·농지에 뿌려 배출되는 양이 극히 적다. 또한, 농촌에서 발생하는 볏짚, 왕겨 등은 이미 유가로 거래되고 있어 처리에 있어서 문제가 되지 않는다. 따라서 농촌형에서 주로 이용가능한 바이오매스는 가축분뇨를 꼽을 수 있다. 가축분뇨를 이용한 바이오가스시설을 마을에 위치시켜 열·전기를 생산하고, 생산된 열·전기는 시설내 이용 및 마을 주민에게 공급한다. 폐열은 비닐하우스에 열공급용으로 이용하고, 탈수슬러지 및 탈리액은 퇴비화, 액비화하여 경종농가에 공급하도록 한다. 또한, 바이오가스화시설의 운영상 문제가 일어날 경우를 대비하여 보조수단으로 화목보일러를 함께 설치한다. 화목보일러의 원료는 산림바이오매스 및 농촌지역에 많이 분포되어 있는 과수원의 전정가지 등을 비축해 두었다가 필요시 운영하도록 하는 개념이다. 또한 연중 일기가 맑은 지역에는 태양열을 이용하고, 바람이 많은 지역에는 풍력, 저수지가 위치하는 지역에는 소수력을 이용하는 등 자연력을 이용하는 방안도 고려될 수 있다.

본 연구에서는 저탄소 녹색마을의 농촌형 모델로서 Y군을 선정하여 녹색마을의 적정위치, 폐자원 및 바이오매스량 조사, 처리규모 산정 등을 실시하였고, 경제성, 환경성, 에너지자립도 등의 분석을 통하여 타당성을 검토함으로써 향후 국내 저탄소 녹색마을 조성에 있어 기초자료를 제시하기 위하여 실시하였다.

2. 연구 방법

2.1. 농촌형 저탄소 녹색마을 조성방안

농촌형 저탄소 녹색마을은 농촌지역에서 미활용 또는 비효율적으로 낭비되고 있는 바이오매스 및 자연력을 통합적으로 활용하여 에너지로 이용함으로써 에너지자립도를 높이고자 하는 마을을 의미한다. 또한 1차 에너지를 대신해서 바이오매스에너지를 이용하여 저탄소 시스템으로 구성된 마을이다. 저탄소 녹색마을 조성에 있어서 검토해야 할 사항으로는 대상마을의 기본적인 현황을 바탕으로 바이오매스의 이용가능량, 시설입지장소 등에 대한 조사가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 Y군의 협조를 얻어 대상지역 조사 및 주민 설문조사, 통계자료, 문헌자료 조사 등을 실시하여 농촌형 저탄소 녹색마을을 조성하는 방안을 검토하였다.

2.2. 저탄소 녹색마을 타당성 검토방법

저탄소 녹색마을의 타당성 검토방법은 다음 Fig. 1의 흐름에 따라 연구를 진행하였다.

첫 번째, 녹색마을 대상지역의 바이오매스 양 조사를 실시하여, 두 번째로 대상지역을 선정하였다. 세 번째, 선정지역의 이용가능한 바이오매스 양을 산출하였고, 네 번째로 산출된 이용가능한 바이오매스를 이용하여 자원화시스템을 구성하고 에너지 생산량을 산출하였다. 에너지 생산량은 시설의 총 처리용량과 운전시간을 설정한 뒤 바이오가스 생산량을 산출하였다. 산출된 바이오가스 생산량 중 메탄가스 발생량으로 전기 생산량 및 열에너지 생산량을 산출하였다. Table 1에 바이오가스 생산량, 가스 중 메탄량, 전기생산량, 열생산량 구하는 식을 나타내었으며, 계산에 사용된 인자 값은 일반적으로 사용되는 값 및 조사 자료를 바탕으로 적용하였다. 메탄수율 60%, 전기효율 35%, 열효율 45%(바이오가스시설), 63%(화목보일러시설 - 관련업체 설문조사), 메탄열량 10,550 kcal/m³(국제에너지기구 TOE 환산표), 1 kWh의 열량 860 kcal/kWh 등을 적용하였다. 전정가지의 열량은 한국 농촌경제연구원(2006)⁶⁾의 목재칩 보일러 연료발열량인 2,800

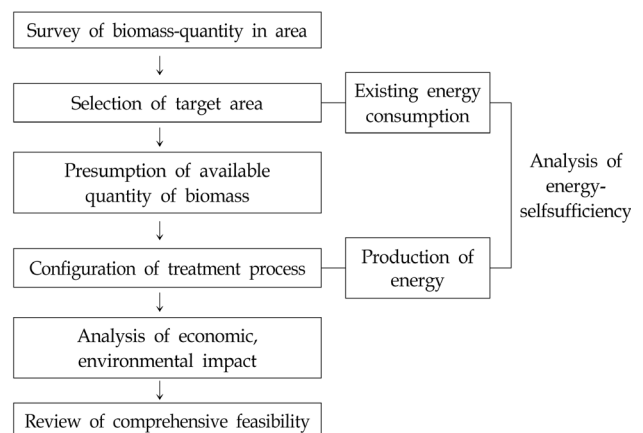


Fig. 1. Flowchart of study on the validity of rural low carbon green Village.

Table 1. Calculation method of energy yield

Item	Unit	Method
Total treatment quantity	ton/day	Estimate through field surveys
Production of Biogas	m ³ /day	$Biomass \frac{kg}{day} \times \frac{VS}{TS} \times \frac{0.5m^3 gas}{kg VS} \times TS$
CH ₄	m ³ /day	$Biogas \frac{m^3}{day} \times 60\%$
Production of Electronic	kWh/day	$Methane gas \frac{m^3}{day} \times \frac{10,550kcal}{m^3} \times \frac{kWh}{860kcal} \times 35\%$
Production of Heat-energy	kcal/day	$Methane gas \frac{m^3}{day} \times \frac{10,550kcal}{m^3} \times 45\%$ $Branch \frac{kg}{day} \times \frac{2,800kcal}{kg} \times 63\%$
Remark		- CH ₄ yield 60% - CH ₄ 10,550 kcal/m ³ (TOE of International Energy Agency) - Branch 2,800 kcal/kg ⁶⁾ - 1 kWh = 860 kcal - Electronic Efficiency 35% - Heat Efficiency 45%, 63% (wood)

kcal/kg을 적용하였다. 산출된 에너지 생산량을 이용하여 마을에서 기존에 사용하고 있는 에너지 대비 공정에서 생산된 에너지를 비교 후, 전기 에너지와 열에너지로 나누어 에너지 자립률을 산출하였다.

다섯 번째, 에너지 생산시스템 구성과 에너지 생산량을 바탕으로 경제성 분석을 검토하였다. 시설설치비와 운영비로 대별되며, 시설설치비는 바이오가스 시설(전처리, 혐기성 소화조, 기타설비), 발전설비 등 위에서 설정된 에너지화 시스템에 따라 산정되며, 2009년도 국고보조사업 신청지침⁷⁾에 근거하고, 업체설문을 통하여 평균값을 적용하였다. 운영비는 인건비, 전력비, 유류대, 톱밥투입비, 기타수선비, 이자, 기타 처리비 등으로 구성하여 나타내었다.⁸⁾ 환경성 분석은

2009년 7월에 정부합동으로 발간된 「폐자원 및 바이오매스 에너지 대책」 실행계획에서 산출한 방법을 적용하였다.⁵⁾ 실행계획에서는 ‘저탄소 녹색마을 조성’과 관련하여 원유대체 및 온실가스감축 효과를 나타내고 있으며, 다음 Table 2와 같은 식을 본 연구에 적용하여 환경성을 분석하였다. Table 2에 사용된 기초데이터는 원유의 석유환산톤(TOE) 환산인자, 원유열량, 메탄열량, 나무열량, IPCC의 원유 및 고체바이오매스 TonC/TOE 환산값, TCO₂와 TCH₄의 환산값 등이 사용되었고, 시장 상황에 따라 계속적으로 변동이 되는 국제유가 및 환율에 대해서는 연구가 이루어진 시점에서 적용된 값을 명시하였다. 본 기초데이터값의 변동에 따라서 본 연구 결과가 변동될 수 있음을 밝혀둔다. 기초데이터를 적용하여

Table 2. Analysis method of environmental impact

Item	Contents		
Base Data	- Crude Oil 1 bbl = 158.9 L = 0.136 TOE (10 ⁷ kcal/TOE) - Caloric Value · Oil 9,267 kcal/L (2007, Alternative energy supply statistics, MKE) · CH ₄ 10,550 kcal/m ³ , Wood 2,800 kcal/kg (Wood yield 0.7) - Oil Price : \$73.95/bbl (2007year, http://www.index.go.kr/) - exchange rate : 1,371 WON/\$ (2007year Average, A foreign exchange bank) - TonC/TOE of IPCC Crude Oil : 0.829 - TonC/TOE of Solid Biomass: 1.252 - CERs : 24 \$/TCO ₂ (2008Action Plan for Waste Energy Comprehensive Measures ,KEI) - 1 TCO ₂ = 21 TCH ₄		
Crude oil replacement effect	Quantity of Crude oil	Biogas	$m^3CH_4/day \times day/yr \times 10,550 kcal/m^3 \div 158,9 L/bbl \div 9,276 kcal/L = \underline{bbl/yr}$
		Wood	$ton/yr \times 2,800 kcal/kg \times 1000 kg/ton \times 0.7 = kcal/yr$ $\rightarrow kcal/yr \div 10^7 kcal/TOE = TOE/yr$ $\rightarrow TOE/yr \div 0.136 TOE/bbl = \underline{bbl/yr}$
	Crude replacement price	Biogas	$bbl/yr \times \$73.95/bbl \times 1,371 WON/\$ = \underline{WON/yr}$
		Wood	$bbl/yr \times \$73.95/bbl \times 1,371 WON/\$ = \underline{WON/yr}$
TOE (Biogas)		$bbl/yr \times 0.136 TOE/bbl = \underline{TOE/yr}$	
Reduction of Greenhouse Gas	Quantity of reduction	CO ₂	Biogas: $TOE/yr \times 0.829 TonC/TOE \times (44 CO_2/12 C) = \underline{A TCO_2/yr}$
		Wood	$TOE/yr \times 1.252 TonC/TOE \times (44 CO_2/12 C) = \underline{B TCO_2/yr}$
		CH ₄	$m^3CH_4/day \times day/yr \times 16,000 ton/kmol \div 22.4 m^3/kmol = TCH_4/yr \rightarrow TCH_4/yr \times 21 TCO_2/TCH_4 = \underline{C TCO_2/yr}$
	CERs		$(A + B + C)TCO_2/yr \times (24 \$/TCO_2 \times 1,371 WON/\$) = \underline{WON/yr}$

바이오가스 및 목재의 원유대체효과 및 연간 온실가스 감축량에 대하여 산출하였다.

여섯 번째, 바이오매스 이용가능량, 자원화시스템구성 및 에너지생산량 산출, 경제성 분석, 환경성 분석, 에너지자립도 분석을 실시하여 종합적인 타당성을 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 대상지역 및 바이오매스 이용가능량

대상지역을 선정하기 위하여 Y군의 협조를 얻어 지역의 바이오매스 발생현황을 조사하였다. 조사 중점사항으로는 첫째, 이용 가능한 바이오매스 자원이 발생되고 있는 지역, 둘째, 발생된 바이오매스의 효율적인 이용이 이루어지고 있지 않는 지역, 셋째, 생산된 에너지의 적절한 수요인구 등이다.

조사결과, C면의 A, B마을에서 돼지사육 5,000두, 젖소사육 70두를 하고 있었고⁹⁾, 퇴비화시설이 가동 중에 있었지만, 악취로 인한 심미적 불쾌감으로 처리방법의 변경을 고려하고 있었다. 인구는 49가구, 118명이 거주하고 있고, 과수면적은 19.72 ha이다. A, B마을과 약 2 km 떨어진 거리에 위치한 C마을에는 과수면적이 52.17 ha로 전정가지가 발생되고 있었다. 인구는 80가구, 165명이 거주하고 있으며, 기타시설로 비닐하우스 약 17,000 m² 위치하고 있다(Fig. 2). A, B, C마을의 과수면적은 총 71.89 ha로 여기서 발생하는 전정가지의 약 15%는 딸감으로 사용되고, 약 85%는 방치 및 소각 처리되고 있는 것으로 설문조사결과 나타났다. 대상지역 선정에 있어서 첫째조건, 이용가능한 바이오매스 자원으로는

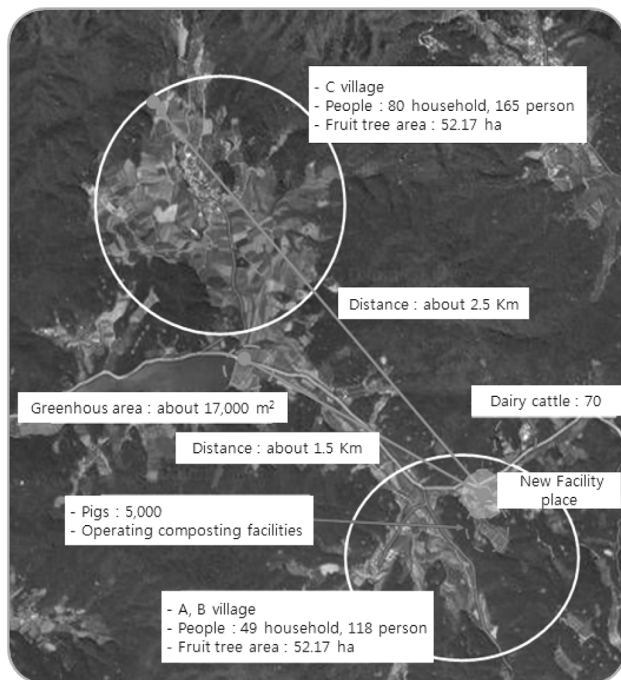


Fig. 2. Mapping of target area as low carbon green village.

Table 3. Available quantity of biomass energy source from Y district's green village

Item	Unit	livestock excretions	Branch	Sum
Quantity of Biomass	ton/day	28	4	32
Available Quantity of Biomass Energy	ton/day	28 (100%)	2 (50%)	30

가축분뇨 및 과수전정가지가 대상이 되었고, 둘째조건, 이 두 가지 바이오매스 모두 효율적으로 이용되고 있지 않고 있었다. 셋째조건, 농촌마을 특성상 100가구 이상 되는 마을은 드물지만, 연구대상지역은 생산된 에너지를 약 130여 가구에 공급할 수 있었다. 따라서 A, B, C마을을 대상지역으로 선정하였다.

다음은 바이오매스 이용가능량에 대한 조사이다. C면의 자료조사결과, A, B, C마을은 주로 사과 26.31 ha, 복숭아 12.53 ha, 포도 33.05 ha 등의 과수작물을 재배하고 있으며, 과수전정가지 발생량 원단위(사과 1,899 kg/10a, 복숭아 521 kg/10a, 포도 2,686 kg/10a)⁴⁾를 이용하여 산출한 결과, 연간 1,452톤(약 4톤/일)의 전정가지가 발생하는 것으로 산출되었다. 설문조사에서 전정가지의 15%는 마을의 딸감 및 기타 용도로 사용되고 있었고, 이용 가능한 85% 중에 나무의 수집운반 및 보관특성상 사용 못하게 되는 양을 35%로 가정하였을 때, 발생량 중 50%를 이용가능량으로 산정하였다. A, B마을에서 사육되고 있는 가축은 돼지 5,000두, 젖소 70두이다. 가축분뇨의 발생량 원단위(돼지 5.1 L/두·일, 젖소 37.7 L/두·일)¹⁰⁾를 적용하여 산출한 결과, 연간 10,256톤(약 28톤/일)의 가축분뇨가 발생하는 것으로 산출되었다. 가축분뇨는 전량 수거가 가능하다는 점에서 100% 이용가능량으로 산정하였다. 따라서, 대상지역의 이용가능한 바이오매스 양은 가축분뇨 28톤/일, 전정가지 2톤/일로 총 30톤/일로 산정하였다(Table 3).

3.2. 자원화 시스템 구성 및 에너지 생산량

조사된 이용가능한 바이오매스는 습식계인 가축분뇨와 건식계인 과수전정가지이다. 이를 이용하여 자원화 시스템을 구성하였다. 먼저 가축분뇨는 에너지를 생산할 수 있는 방법 중 최근 많이 이용되고 있는 혐기성소화를 통한 바이오가스화시설을 적용하였다. 바이오가스를 이용하여 전기 및 열에너지를 생산하고, 이것으로 마을 내 가정 및 비닐하우스, 가축난방용으로 사용하도록 한다. 소화액은 탈수 후 고체분은 퇴비화하여 농가에서 사용되고, 액체분은 근처의 하수처리장과 연계 처리하는 것으로 검토하였다. 또한 과수전정가지는 화목보일러를 이용한 열에너지 생산으로 주변 비닐하우스 등에 열을 공급하고, 바이오가스화시설 정비기간이나 정지 시에도 열 공급이 가능하도록 검토하였다(Fig. 3).

Fig. 4에 자원화시스템의 공정도를 나타내었다. 시설에 가축분뇨가 투입이 되면 스크린선별기에서 혐잡물을 제거하고 혐기성 소화조로 투입이 된다. 소화조에서 발생된 가스는 탈

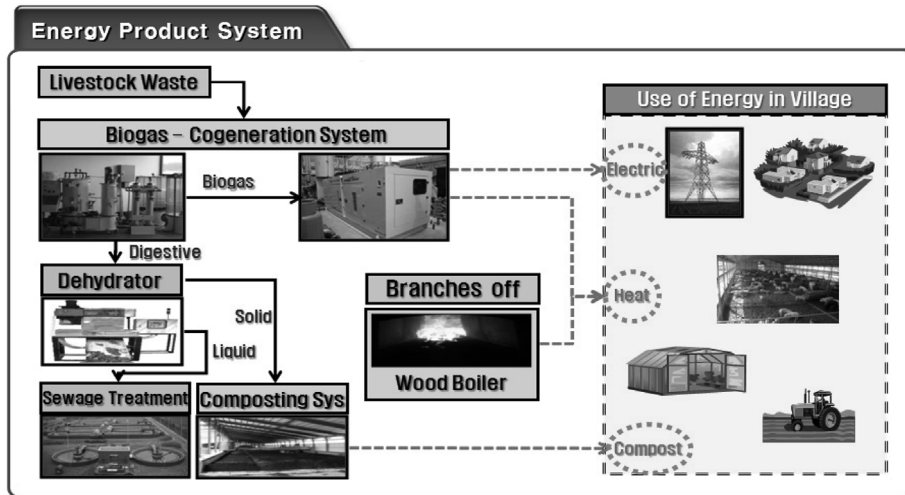


Fig. 3. Energy system of Y district's low carbon green village.

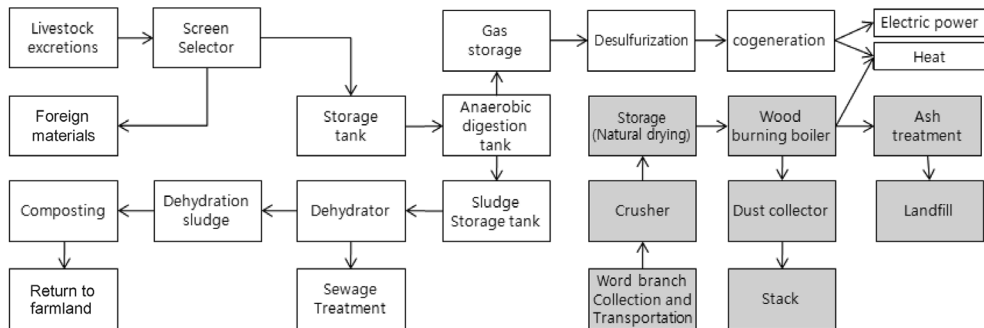


Fig. 4. Process of the energy production system in Y district's low carbon green village.

항시설을 거쳐 열병합발전기에서 전기와 열을 생산한다. 소화된 슬러지는 탈수기를 통하여 고액 분리되고 액체는 하수 연계처리, 고체는 퇴비화 하여 농지에 환원되는 시스템이다. 또한, 전정가지는 수집·운반되어 파쇄 후 저장시설에서 자연건조된다. 건조된 전정가지는 목재소각 보일러를 이용하여 열에너지를 생산하게 된다. Ash는 매립 처리하는 것으로 검토하였다.

자원화 시스템을 통하여 산출된 에너지 생산량은 Table 4와 같다. 시설용량은 이용가능한 바이오매스 양에서 산출된

총 30톤/일이며, 운전 가동시간은 1년을 기준으로 정비기간 또는 고장으로 인한 운행정지일을 고려하여 330일로 가정하였다. 바이오가스화 시설은 소화조에서 미생물의 분해 작용으로 이루어지는 공정이므로 하루 가동시간은 24시간으로 하였고, 화목보일러는 인력이 동원되어야 하므로 하루 8시간 가동하는 것으로 가정하였다. 바이오가스 생산량 계산은 Table 1의 식을 이용하였으며, 사용된 인자 값은 기존 참고문헌의 경험값(TS 6.5%, VS/TS 0.73, 0.5 m³가스/kgVS, 메탄 60%)⁸⁾을 적용하여 산출하였다. 바이오가스 생산량은

Table 4. Energy yield of Y district's green village

Item	Unit	Target Biomass		Remark
		Livestock excretions	Word branch	
Total treatment quantity	ton/day	28	2	Total 30 ton/day
Running time	day/yr (hr/day)	330 (24)	330 (8)	-
Production of Biogas	m ³ /day	636	-	- TS 6.5%, VS/TS 0.73
	m ³ /yr	209,880	-	- 0.5 m ³ gas/kgVS
CH ₄	m ³ /day	382	-	- CH ₄ 60%
	m ³ /yr	126,060	-	
Production of Electronic	kWh/day	1,638	-	- Electronic Efficiency 35%
	kWh/yr	540,540	-	- CH ₄ 10,550 kcal/m ³
Production of Heat-energy	Mcal/day	1,811	3,528	- Branch 2,800 kcal/kg
	Mcal/yr	597,630	1,164,240	- Heat Efficiency 45%, 63% (wood)

하루 636 m³이고, 메탄 발생량 382 m³/일, 전기 생산량 1,638 kWh/일, 열에너지 생산량 1,811 Mcal/일로 산출되었다. 화목 보일러의 열에너지는 열량 2,800 kcal/kg, 열효율 63%(화목 보일러 업체문의)를 적용하여 3,528 Mcal/일로 산출되었다.

3.3. 경제성 분석

경제성 분석은 시설설치비, 운영비, 판매수익으로 구성되어 분석을 실시하였다. Table 5의 시설설치비는 바이오가스 시설 용량 28톤/일과 화목보일러 용량 2톤/일을 합한 30톤/일에 대한 비용을 적용하였다. 바이오가스화시설은 기본적으로 환경부의 2009년도 국고보조사업 신청지침⁷⁾을 참고하였고, 관련업체 조사를 통하여 환경부 지침에 포함되어 있지 않는 시설(Table 5의 ④번 기타시설과 발전시설; 퇴비화설비, 탈황장치, 열병합발전기, 기타설비 등)비용 등을 추가로 포함시켰다. 전처리 시설 6억원, 혐기성 소화시설 15억원, 기타시설 15억원, 열병합발전기 6억원을 합하여, 약 42 억원의 비용이 발생되었다. 또한, 화목보일러시설은 1, 2차 연소로, 스팀보일러, 집진기, 반응탑 및 연돌 등에 대하여 관련업체 설문조사를 통하여 일식으로 약 8억 4천만원의 비용이 발생하는 것으로 조사되었다. 따라서, 총 시설설치비용은 50억 4천만원으로 산출되었다.

시설의 운영비용은 인건비, 전력비, 유류대, 톱밥투입비, 기타수선비, 이자, 목재원료 반입비, 목재 소각재 처리비, 폐수의 하수연계처리비 등의 항목으로 분석하여 Table 6에 나타내었다. 인건비는 음식물 혐기성소화시설의 30톤 기준 적정인원인 5명¹¹⁾을 적용하여 1인당 200만원씩 연간 12,000만원이 발생되었다. 전력비, 유류대, 톱밥투입비, 기타수선비, 이자 등은 한국농촌경제연구원⁸⁾의 바이오가스시설 및 퇴비화시설에 대하여 돼지 5,000두 기준의 규모로 검토된 운영비를 적용하였다. 여기서 제시된 단위체적당 발생비용에다가 본 시스템의 용량 30톤을 곱하여 연간 소비되는 비용을 산출한 결과, 연간 총 33,450만원 발생되었다. 화목보일러에 사용되는 목재원료의 반입비용은 한국농촌경제연구원⁸⁾에서 우드칩 거래가격이 160원/kg으로 조사되어 있지만, 본 연구에서는 나무의 자체공급 및 운반이 가능하다는 점에서, 파쇄비용으로 약 50원/kg을 적용하여 비용을 산출하였다. 하루 2톤씩 연간(330일) 660톤 반입으로 하였을 때, 연간 3,300만원 발생되었다. 화목보일러에서 소각 후 발생하는 소각잔재물은 관련업체의 설문 조사 결과 약 2.7%로 본 연구에 적용하면 연간 약 108 kg 발생된다. 소각 잔재물은 매립 처리하는 것으로 설정하여, 수도권매립지의 톤당 반입가격 16,320원(목재소각 잔재물 반입비에 대한 전화설문조사 결

Table 5. Approximate installation cost of the energy production system in Y district's green village

Item		Cost (10,000 won)	Remark
① Biogas facility		360,000	1.2 billion won/ (ton/day) ⁷⁾ Prices of Pretreatment, Anaerobic digesters, Other facilities (Except : Cogeneration, Wastewater treatment facility)
② Pretreatment	Meter, Screen, Mixing tank	60,000	0.2 billion won/ (ton/day)*
③ Anaerobic digesters	Methane fermentation tank, Sludge storage tank, Gas storage tank	150,000	0.5 billion won/ (ton/day)*
④ Other facilities	Dehydrator, Composting, other cost	150,000	④ = ① - ② - ③
Generator	Desulfurization, Cogeneration	60,000	0.2 billion won/ (ton/day)*
Wood facilities	1,2 Incinerator, Steam boiler, Dust collector, Stack	84,000	Wood Boiler company survey (2 ton/day based)
Total		504,000	-

* Related companies survey : Approximate average

Table 6. Approximate operation cost of the energy production system in Y district's green village

Item	Cost (10,000 won/yr)	Remark	
Labor cost	12,000	200 million won/ person 5 person (anaerobic digestion facilities (30 t) : 5 person) ¹¹⁾	
Power cost	1,477	30 ton apply	1,492.7 won/m ³
Fuel cost	2,347		2,370.8 won/m ³
Sawdust	14,504		14,651.2 won/m ³
Repairs	2,914		2,943.6 won/m ³
Interest	3,843		3882.8 won/m ³
Wood raw materials	3,300		- 660 ton/yr - Wood chip cost : 50 won/kg (Related companies survey)
Wood ash treatment cost	29	- Ash 2.7% (Related companies survey) (Sudokwon Landfill site management corporation : 16,320 won/ton)	
Wastewater treatment cost (Sewage connection treatment)	8,095	- Dehydration liquid 78% (11,232 won/ton) ¹²⁾	
Total	48,509	-	

Table 7. Sales profit of the energy production system in Y district's green village

Item	Cost (10,000 won/yr)	Remark
livestock feces treatment cost	13,860	28 ton/day (15,000 won/ton)*
Power cost	6,540	1,638 kWh/day (KPX : Average unit price of SMP (2008) : 121 won/kWh)
Compost cost	11,550	28 ton/day × 10% (125 won/kg)*
Heat cost	1,762	5,339 Gcal/day (10,000 won/Gcal)**
Total	33,712	

* Existing treatment cost
 ** Related companies survey

과)을 적용하면, 연간 약 29만원의 비용이 발생되었다. 바이오가스 발전 후 발생하는 폐수는 하수연계처리하는 것으로 설정하여 검토하였다. 처리비용은 음식물류폐기물 처리비용 산정 지침¹²⁾의 하수연계처리비용을 참고하여 톤당 11,232원에 폐수발생량 78%를 적용시켜, 연간 약 8,095만원으로 산출되었다. 따라서, 검토된 총 시설운영비용은 연간 약 48,509만원 발생되었다.

시설 운영에 따른 수익은 축산분뇨처리, 매전, 퇴비, 열 공급 등으로 구분하여 Table 7에 산출하였다. 축산분뇨처리 및 퇴비의 비용은 마을에서 기존에 지불하고 있는 비용과 동일하게 적용하였다. 축산분뇨 기존 처리비용 15,000원/톤에 발생량 28톤/일을 곱하여 연간 13,860만원의 수익이 발생되었다. 퇴비는 축분 투입량의 10%를 퇴비 발생량으로 적용하고, 기존 처리비용 125원/kg을 적용하여 연간 11,550만원의 수익이 발생되었다. 또한, 매전비용은 한국전력거래소의 2008년 평균가격인 SMP 121원/kWh과 Table 4에서 산출된 전력량 1,638 kWh/일을 곱하여 연간 6,540만원의 수익이 발생되었다. 열 공급 비용은 소각폐열에너지를 공급하고 있는 업체에 문의한 결과 10,000원/Gcal으로 조사되어 이 값을 적용하여 연간 1,762만원의 수익이 발생되었다. 적용된 각 항목을 종합한 결과, 시설 운영에 따른 총 수익은 연간 약 33,712만원으로 산출되었다.

시설설치비, 운영비, 수익 등을 종합한 결과 시설운영비용은 연간 48,509만원, 판매수익은 33,712만원으로 시설의 연간 수익은 -14,797만원 적자인 것으로 산출되었다. 정부의 지원 금액 없이는 적자를 해소하지 못하여 경제성이 전혀 없는 것으로 나타났으며, 시설가동을 15년으로 가정하였을 때 약 22억원의 적자로 분석되었다(Table 8).

Table 8. Economic analysis of Y district's green village energy system

Item	Cost
Construction cost	504,000 ten thousand WON
Operating cost	48,509 ten thousand WON/yr
Sale profit	33,712 ten thousand WON/yr
One year profit	- 14,797 ten thousand WON/yr
Period of Deficit dissolution	National support 0 WON
	Deficit
	National support (15year)
	221,955 ten thousand WON Support

경제성을 단순히 금액적인 측면에서 보면 적자로 예측되지만, 효과발생여부 측면에서 편익적인 요소도 고려해야 할 것이다. 이 지역에서는 기존에 가축분뇨를 단순 퇴비화 처리 중이었다. 하지만 자원화시스템을 도입함으로써, 바이오가스화를 통한 전기 및 열에너지를 추가로 얻을 수 있는 효과가 발생되었다. 전정가치의 경우 기존에 처리를 하지 않고 방치 중이었지만, 본 시스템을 적용하여 열에너지를 공급할 수 있는 효과가 발생되었다. 또한, 3.4. 환경성 분석에 원유대체 효과 및 온실가스 감축효과와 편익까지 고려하였을 때, 금액 적으로도 충분한 경제성이 있는 것으로 분석되었다.

3.4. 환경성 분석

환경성 분석은 원유대체 효과와 온실가스 감축효과로 나누어 검토하였으며, 2009년 7월에 정부합동으로 발표한 ‘폐자원 및 바이오매스 에너지 대책 실행계획’에서 계산된 근거를 바탕으로 산출하였다. 계산에 사용된 인자 값은 위의 Table 2에서 설명하였고, 계산 값은 Table 9에 나타내었다. 먼저 원유대체효과에 대한 비용 산출을 위하여 바이오가스 및 목재에 대해서 각각의 발생량과 열량, 환산인자를 곱하였다. 연간 환산된 바이오가스에 대한 원유량은 901 배럴, 목재에 대한 원유량은 856 배럴인 것으로 산출되었다. 산출된 원유량에 환율 1,371원/\$ (외환은행 2007년 평균 환율)을 적용시키면, 바이오가스와 목재에 대한 대체원유가격은 각각 91,369,136원/년, 86,785,945원/년으로 산출된다. 다음으로 온실가스감축량은 석유환산톤(TOE)과 TCO₂의 환산 값을 곱하여 나타내었다. 위에서 구한 원유량에 TOE 환산 값을 곱하면 연간 TOE양이 산출되고, 여기에 TCO₂ (IPCC의 TonC/TOE 환산값)의 환산 값을 곱한다. 탄소배출량을 CO₂ 배출량으로 전환할 때, CO₂와 탄소간의 질량비를 탄소량에 곱하여 CO₂ 배출량을 구할 수 있다. 화학적으로 CO₂와 탄소간의 질량비는 44/12이다. 이를 계산하면 이산화탄소와 메탄의 온실가스감축량은 각각 373톤CO₂/년, 535톤CO₂/년, 1,889톤CO₂/년으로 총 2,797톤CO₂/년으로 산출된다. 이것을 탄소배출권(CERs)에 적용하여 금액으로 환산하면 연간 약 92백만원으로 산출된다. 즉, 환경성을 통하여 얻어지는 이익은 원유대체효과 약 178백만원과 온실가스감축량 약 92백만원을 합하여 연간 약 2억 7천만원인 것으로 분석되었다.

Table 9. Environmental impact analysis of Y district's green village energy system

Item		Contents	
Crude oil replacement effect	Quantity of Crude oil	Biogas	$382 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{day} \times 330 \text{ day/yr} \times 10,550 \text{ kcal/m}^3 \div 158.9 \text{ L/bbl} \div 9,276 \text{ kcal/L} = 901 \text{ bbl/yr}$
		Wood	$594 \text{ ton/yr} \times 2,800 \text{ kcal/kg} \times 1000 \text{ kg/ton} \times 0.7 = 116,424 \times 10^7 \text{ kcal/yr}$ $\rightarrow 116,424 \times 10^7 \text{ kcal/yr} \div 10^7 \text{ kcal/TOE} = 116,424 \text{ TOE/yr}$ $\rightarrow 116,424 \text{ TOE/yr} \div 0.136 \text{ TOE/bbl} = 856 \text{ bbl/yr}$
	Crude replacement price	Biogas	$901 \text{ bbl/yr} \times \$73.95/\text{bbl} \times 1,371 \text{ WON/\$} = 91,369,136 \text{ WON/yr}$
		Wood	$856 \text{ bbl/yr} \times \$73.95/\text{bbl} \times 1,371 \text{ WON/\$} = 86,785,945 \text{ WON/yr}$
	TOE (Biogas)		$901 \text{ bbl/yr} \times 0.136 \text{ TOE/bbl} = 123 \text{ TOE/yr}$
Reduction of Greenhouse Gas	Quantity of reduction	CO ₂	Biogas: $123 \text{ TOE/yr} \times 0.829 \text{ TonC/TOE} \times (44 \text{ CO}_2 \div 12 \text{ C}) = 373 \text{ TCO}_2/\text{yr}$ Wood: $116,424 \text{ TOE/yr} \times 1,252 \text{ TonC/TOE} \times (44 \text{ CO}_2 \div 12 \text{ C}) = 535 \text{ TCO}_2/\text{yr}$
		CH ₄	Biogas: $382 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{day} \times 330 \text{ day/yr} \times 16,000 \text{ ton/kmol} \div 22.4 \text{ m}^3/\text{kmol} = 90 \text{ TCH}_4/\text{yr} \rightarrow 90 \text{ TCH}_4/\text{yr} \times 21 \text{ TCO}_2/\text{TCH}_4 = 1,889 \text{ TCO}_2/\text{yr}$
	CERs		$(373 + 535 + 1,889) \text{ TCO}_2/\text{yr} \times (24 \text{ \$/TCO}_2 \times 1,371 \text{ WON/\$}) = 92,032,488 \text{ WON/yr}$

앞에서 검토된 경제성 분석은 운영비가 약 1억 4천만원 씩 15년 동안 약 22억원의 적자로 지원금 없는 경제성이 어려운 것으로 검토되었지만, 환경적 편익이 발생하는 것을 적용시키면, 연간 약 1억 3천만원 정도 이익이 발생하는 것으로 산출되었다. 따라서, 정부 및 지자체의 예산지원을 통하여 진행하더라도 국익에 도움이 되어 충분히 사업 타당성이 있는 것으로 평가되었다.

3.5. 에너지자립도 분석

에너지자립률이란, 외부로부터 공급되는 에너지를 제외한 마을 자체에서 충당 가능한 에너지의 양을 나타내는 수치이다. 본 연구에서는 마을에서 기존에 사용 중인 전기 및 열에너지와, 본 연구에서 제시된 자원화시스템에서 생산된 에너지를 비교하여 얼마나 충당이 가능한지 검토하였다(Table 10).

첫 번째, 전기에너지는 기존에 가구당 월평균 200 kWh (Y군 한국전력지사 방문확인)를 소비하고 있었고, 129가구가 거주하고 있어, 연간 약 309,600 kWh의 전력이 소비되고 있었다. Table 4의 자원화시스템에서 생산된 전기에너지는 연간 약 540,540 kWh로 전기에너지의 자립률은 100%가 되고, 잉여전력은 연간 230,940 kWh로 산출되었다.

두 번째, 열에너지는 마을에 설치되어있는 비닐하우스에

사용된 열에너지를 대상으로 비교하였다. 비닐하우스 한 개동에 소요되는 에너지 비용은 농민을 대상으로 한 설문조사 결과 약 12만원/월인 것으로 조사되었다. 이 금액을 농업용 전력으로 Y군 한국전력지사에 문의한 결과 약 3,267 kWh/월로 환산되었고, 이것을 열량단위로 환산하여, 이 지역의 42개동 비닐하우스에 소요되는 열량은 연간 약 1,415 Gcal인 것으로 산출되었다. Table 4의 자원화시스템에서 생산된 열에너지는 연간 약 1,762 Gcal로 연간 소요량 1,415 Gcal보다 많아 열에너지 자립률 역시 100%를 나타내었다. 잉여 열에너지는 347 Gcal/년으로 산출되었다.

4. 결론

본 연구는 농촌형 저탄소 녹색마을 조성에 대한 타당성 검토를 위하여 Y군의 A, B, C마을을 대상으로 조사 및 분석을 실시하였으며, 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 대상마을의 바이오매스는 가축분뇨 28톤과 과수전정가지 2톤을 이용하였으며, 가축분뇨를 이용한 바이오가스화시설과 과수전정가지를 이용한 화목보일러시설로 구성하였다.

Table 10. Energy-selfsufficiency of Y district's green village

Item		Contents	Remark
Electronic energy	- Electronic power (kWh/Month/house)	200	- Average electric power of household
	- The number of household	129	
	- Electronic power (kWh/year)	309,600	- power consumption of village
	- Production of Total Electronic power (kWh/year)	540,540	- Leftover Electronic power (230,940 kWh/year)
	- Independence ratio of Electronic power (%)	100	
Heat-energy	- Vinyl House (EA)	42	
	- Calory of Vinyl House (Gcal/year)	33,7	- Use 12 ten thousand WON/month (charge of electronic) $\rightarrow 3,267 \text{ kWh/month}$ $\rightarrow 39,204 \text{ kWh/year} \times 860 \text{ kcal/kWh}$
	- Total Calory (Gcal/year)	1,415	- $33,7 \text{ Gcal/year} \times 42$
	- Production of heat-energy (Gcal/yr)	1,762	
	- Independence ratio of heater-energy (%)	100	- Leftover heat-energy (347 Gcal/yr)

시설에서 연간 생산되는 전기에너지는 540,540 kWh이고, 열에너지는 1,762 Gcal인 것으로 산출되었다.

2) 마을에서 기존에 사용하는 전기에너지는 연간 309,600 kWh이고, 자원화시스템 가동시 생산되는 총 전기에너지는 연간 540,540 kWh로 전기에너지의 자립률은 100%가 되고, 잉여전력은 연간 230,940 kWh가 되었다. 또한, 열에너지는 마을의 비닐하우스에서 사용되는 열량을 검토하였으며, 연간 생산되는 열에너지는 1,762 Gcal로 기존의 연간 소요량 1,415 Gcal보다 많아, 열에너지 자립률 역시 100%를 나타내었다. 잉여 열에너지는 347 Gcal/년으로 산출되었다.

3) 경제성은 시설설치비용 504,000만원, 운영비 48,509만원, 수익 33,712만원으로 연간 약 1억 4천만원 적자인 것으로 나타나, 정부의 지원 금액 없이는 적자를 해소하지 못하는 것으로 산출되었다. 시설이 운영되는 15년간 약 22억원의 지원이 필요한 것으로 검토되어 경제성 부분의 대책이 필요할 것으로 나타났다.

4) 하지만, 환경성 분석에서 원유대체효과 약 178백만원, 온실가스감축효과 약 92백만원으로 연간 총 2억 7천만원의 환경적 편익이 발생하는 것으로 검토되어, 이를 감안하면 연간 약 1억 3천만원 정도의 편익이 발생하는 것으로 산출되었다. 따라서, 정부 및 지자체의 예산지원을 통하여 진행하더라도 국익을 가져올 수 있을 것으로 평가되었고, 경제성, 환경성, 에너지자립도를 종합하여 볼 때, 충분히 타당성 있는 사업이라고 판단되었다.

5) 아울러, 향후 농촌형 저탄소 녹색마을의 원활한 조성을 위해서는 녹색마을에 대한 충분한 사전설명으로 마을 주민의 적극적인 참여의식 고취 및 시설에 대한 인식개선문제 등을 해결해야 할 것으로 판단되었다. 또한, 바이오매스관련 제도적, 정책적 재정비를 통하여 선진국 수준의 인프라가 구축된다면 경제적인 측면에서도 충분히 경쟁력이 있을 것으로 판단되었다.

KSEE

참고문헌

1. 윤순진, “저탄소 녹색성장의 이념적 기초와 실재,” 한국환경사회학회, 환경사회학연구 ECO, **13**(1), 219~266(2009.6)
2. 홍기철, “유기성폐기물 자원화를 통한 자원순환형의 녹색마을 조성,” 유기성자원학회, 유기성자원학회 학술발표대회 논문집 유기성자원학회 2008년 추계 심포지엄, pp. 52~72 (2008.11)
3. 홍승모, “고농도 유기성 바이오매스의 바이오가스 발전 및 자원화 동향 및 전망,” 지반환경, **7**(1), 61~67(2006.3)
4. 환경관리공단, 저탄소 녹색마을 시범모델 개발연구, pp. 3~4, pp. 166~170(2009)
5. 교육과학기술부, 행정안전부, 농림수산식품부, 지식경제부, 환경부, 국토해양부, 산림청, 『저탄소에너지 생산·보급을 위한 폐자원 및 바이오매스 에너지 대책 실행계획』, pp. 144~172, pp. 273~274(2009)
6. 한국농촌경제연구원, 농업부문 바이오매스의 이용활성화를 위한 정책방향과 전략(1차), p. 23(2006)
7. 환경부, 2009년도 국고보조사업 신청지침, pp. 225~230(2008)
8. 한국농촌경제연구원, 농업부문 바이오매스의 이용활성화를 위한 정책방향과 전략(2차), pp. 136~140(2007)
9. 영동군 통계연보(2008)
10. 환경부, 수생태보전과-867(가축분뇨 배설량 산출 원단위)(2008. 12.23)
11. 환경부, 음식물류폐기물 처리비용 산정 지침(2005)
12. 박찬희, ‘음식물류폐기물 처리비용 산정 지침’ 유기성자원학회지, **13**(4), 51~58(2005)
13. Kazuhiko Takeuchi, Yutaka Namikib and Hiroyasu Tanaka, “Designing eco-villages for revitalizing Japanese rural areas,” *Ecol. Eng.*, **11**, 177~197(1998)