

청정에너지농업시스템 개발에 따른 실증단지의 온실가스배출량 분석*

김태훈** · 윤성이***

Analysis of Greenhouse Gas Emission associated with Clean Energy Agriculture System Development

Kim, Tae-Hoon · Yoon, Sung-Yee

This study presents detailed emission of greenhouse gases of using Clean Energy Agriculture System according to a cradle-to-gate life-cycle assessment, including emission from energy use and leak of Biogas. Calculations were done with the PASS software and the covered gases are CH₄, N₂O and CO₂, Total GHG fluxes of amount to 1719.03 kgCO₂/day, 39.63 kgCO₂/day (2.31%) are from facility house process, 0.19 kgCO₂/day (0.01%) are from transport process, 696.72 kgCO₂/day (40.53%) are from Anaerobic digestion process, 846.61 kgCO₂/day (49.25%) are from Heating and cooling system, 135.88 kgCO₂/day (7.90%) are from Fertigation production process. The results suggest that for effective reduction of GHG emissions from Facility house using clean energy. Reduction targets should address both the production process as defined by IPCC sectors and the consumption process. An LCA assessment as presented here could be a basis for such efforts.

Key words : *life cycle assessment, greenhouse gases, agriculture, clean energy*

* 이 논문은 농림부 “지역단위 농산부산물을 활용한 바이오매스 청정에너지 농업시스템 개발 및 실증”에 의하여 이루어졌음.

** 동국대학교 식품산업관리학과 식품산업클러스터연구소

*** Corresponding author, 동국대학교 식품산업관리학과 식품클러스터연구소(sysoon@dongguk.edu)

I. 서 론

전과정평가(Life Cycle Assessment)는 제품의 원료 생산 및 제품 생산, 수송 및 유통, 사용, 폐기 등의 전 과정에서 자원투입량과 오염물질의 배출량을 정량화하고 이들이 환경에 미치는 잠재적 영향을 체계적으로 평가하는 환경성 평가 도구이다. 전과정평가는 산업제품 및 공정과정에 응용되고 있지만, 농업부분에서의 활용도 점차 늘어가는 추세이다(Shin et al., 2003). 또한, 농업활동의 다양한 원료와 에너지의 사용은 천연자원 고갈과 환경오염 및 기후변화에 중요한 영향을 끼친다(Kramer et al., 1999; Nonhebel, 2004). 이러한 관점에서 청정에너지 농업은 지속가능한 농업의 개념을 에너지의 관점에서 해석하는 에너지 측면에서 지속가능한 농업을 의미하며 이를 위해서는 기존 농업에서 에너지의 효율화 및 절감을 통해 화석연료의 사용량을 줄이고, 청정재생에너지를 이용하여 화석연료를 대체하여 온실가스배출량을 저감하자는 이론이다.

지금까지 한국에서는 청정에너지농업기술이라 하면 다겹보온커튼, 부직포 등을 활용한 시설재배온실 에너지 절감기술이 있었으며, 화석연료 대체기술로는 지열, 태양열, 공기열, 목질계 바이오매스를 이용하는 청정에너지 농업기술이 보급되고 있었다. 하지만 가축분뇨 혐기소화와 같이 농업분야에서 폐기물계 바이오매스를 이용하는 사례가 많지 않은 반면, 가축분뇨가 한국에서 임산 바이오매스 다음으로 큰 잠재 에너지량을 지니는 바이오매스라는 점에서 앞으로 한국농촌에서 농업용 에너지 대체를 위한 주요한 바이오매스자원으로서 가축분뇨의 다양한 활용 체계를 모색할 필요가 있다(Heo et al., 2002). 또한 가축분뇨를 활용하여 바이오가스화 할 경우 1 m³의 바이오가스가 21 MJ의 에너지를 가지고 있으며, 35%의 발전효율을 고려하면 2.04 kWh의 전기를 생산할 수 있다. 또한 1 m³의 바이오가스 당 이산화탄소 4.043 kg CO₂를 감축할 수 있는 것으로 분석되고 있다(Murphy et al., 2004).

최근 우리나라 전체 에너지 최종 소비량은 2000년부터 2011년까지 연평균 3.2% 증가하였다. 반면 같은 기간 농림어업 분야의 에너지 최종 소비량은 같은 기간에 2.7% 감소하였다. 농업부문에서 에너지 소비가 감소한 것은 국제유가 상승이 농가의 경영수지 악화로 이어져 농업생산 활동이 감소하였기 때문이다. 따라서 농업생산에 있어서 석유류 중심의 에너지 소비에서 비석유 에너지로 대체하고 에너지를 절감할 수 있는 맞춤형 시스템 및 기술 체계의 확립이 필요한 시점이다(KREI, 2013).

본 논문에서는 전과정평가 방법을 이용하여 화석연료를 사용하는 시설오이농가에 가축분뇨를 활용한 청정에너지농업시스템을 도입하여 바이오가스를 생산하고, 농사용 에너지로 활용하여 시설하우스의 화석연료 대체에 따른 온실가스 배출량 및 감축량을 분석하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상

아래의 Table 1은 청정에너지농업시스템을 도입하는 농가의 데이터를 나타낸 표이다. 실증단지는 경기도 안성시 보개면에 위치해 있으며, 해당 시설하우스에서는 오이를 재배하고 있으며, 하절기에는 축성재배, 동절기에는 억제재배를 하고 있다. 시설에 투입되는 원료물질은 지역의 돼지농가에서 발생하는 가축분뇨 14 m³/d, 김치가공장에서 발생하는 농산부산물 3 m³/d 그리고 지역에서 발생하는 음식물쓰레기 3 m³/d로 총 20 m³/d이 수거된다. 지역에서 수거된 원료물질을 혐기소화공정에 투입하여 바이오가스화 하여 실증단지의 냉난방시스템의 에너지원으로 공급된다. 시설하우스의 면적은 시설하우스 1동이며 크기는 L94.0 m×W7.0 m이고, 온실표면적은 약 658 m²(6.6a)이다. 청정에너지농업시스템을 도입하기 위한 초기 투자비용중 설치비용은 총 17억원이며 이중 국가보조 60%, 지방비 20%를 제외한 자부담 20%인 3억 4천만원이 초기투자비용으로 투입된다. 시설의 온실표면적을 기준으로 시스템에 도입되는 시설의 크기를 산정하였으며 혐기소화조 및 냉난방시스템의 크기는 시설하우스에서 필요한 동절기 최대 가온량인 82 Mcal/h을 기준으로 시설의 크기를 산정하였다. 가스흡수식 냉온수기에서는 혐기소화공정에서 생산된 바이오가스를 하절기 냉방과 동절기 난방에너지로 공급하여 시설하우스에서 냉난방을 통한 작물의 생육환경을 조절한다. 본 연구에서는 청정에너지농업시스템을 도입한 시설하우스에서 원료운송, 혐기소화공정, 냉난방시스템, 비료생산 4개의 공정과 시설하우스의 투입되는 비료의 양을 토대로 청정에너지농업시스템의 전과정에서 발생하는 온실가스배출량을 분석하고자 한다.

Table 1. Data of Clean energy agriculture system

Classify	Data		
Zone	Bogae-myeon, Anseong-si, Gyeonggi-do		
Crop and method of cultivation	Summer season (February~August)	Cucumber (Forcing culture)	
	Winter season (September~December)	Cucumber (Late raising)	
Raw material	Main material	Livestock(pig)	14 m ³ /day
		Kimchi processing by-product	3 m ³ /day
	Adjunct material	Food waste	3 m ³ /day

Classify		Data	
Facility capacity	Facility house	Area	L94.0 m×W7.0 m, 658 m ² (6.6a)
		Volume	2,349 m ³
	Anaerobic digestion process	20.0 m ³ /day	
	Heating and cooling system	Cooling capacity	429 Mcal/h
		Heating capacity	294 Mcal/h
	Fertigation production	1 m ³ /day	
Production of biogas	CH ₄	555.39 kg	
	CO ₂	317.3 kg	

Source : Establishment of clean energy farming system using the agricultural waste biomass report (2015).

- Main material : Pig slurry(Content of water is at least 93%, slurry phase), Kimchi processing by-product (Content of water is not more than 90%, Solid phase).
- Adjunct material : Food waste(Content of water is not more than 75%, slurry phase).

2. 청정에너지농업시스템(CEAS, Clean Energy Agriculture System)¹⁾

청정에너지농업(이하 CEAS)은 지속가능한 농업의 개념을 에너지의 관점에서 해석하는 에너지 측면에서의 지속가능한 농업을 의미하며, 이를 위해서는 기존 농업에서 에너지의 효율화 및 절감을 통해 화석연료의 사용량을 줄이고, 청정에너지를 이용하여 화석연료 및 화학비료를 대체 하여 온실가스 배출량을 저감하자는 이론이다. 본 연구에서의 CEAS는 바이오가스플랜트를 통하여 청정에너지인 바이오가스를 통해 실증단지 내에 화석연료 및 화학비료를 대체하고 나아가 하절기 냉방, 동절기 난방을 통해 연중 작물생산을 가능하게 하는 시스템이다. 기존의 농업방식에서는 농산물의 이산화탄소 농도를 조절하기 힘들지만, 바이오가스를 정제하는 과정에서 발생하는 이산화탄소 중 일부는 시설하우스에 투입하여 작물의 생육을 증진시킬 수 있으며, 바이오가스를 생산하고 남은 퇴액은 비료생산공정을 통해 시설하우스에 투입하여 지속가능하고 에너지를 절감시킬 수 있는 농업을 실현하는 에너지순환 농업시스템을 의미한다(지역단위 농산부산물을 활용한 바이오매스 청정에너지 농업시스템 개발 및 실증 1차년도 보고서).

3. LCA(Life Cycle Assessment)

전과정평가(LCA)는 제품의 원료 생산 및 제품 생산, 수송 및 유통, 사용, 폐기 등의 전

1) 농림부 “지역단위 농산부산물을 활용한 바이오매스 청정에너지 농업시스템 개발 및 실증” 사업의 보고서에서 이와 같이 정의하고 있음.

과정에서 자원투입량과 오염물질의 배출량을 정량화하고 이들이 환경에 미치는 잠재적 영향을 체계적으로 평가하는 환경성 평가 도구이다. 또한 전과정평가의 평가대상은 생산자의 관점에서 모든 제품과 서비스가 포함되기 때문에 매우 광범위하며 목적 및 범위정의, 전과정목록분석, 전과정영향평가 및 해석으로 이루어진다(ISO-14040s). 본 연구에서는 CEAS를 통해 시설하우스에서 연중 작물생산을 통해 발생하는 온실가스 배출량을 정량적으로 평가하는 것이 목적이다. 더 나아가 CEAS를 통해 전과정에서 발생하는 온실가스 감축량을 분석하고자 한다.

4. 시스템 경계

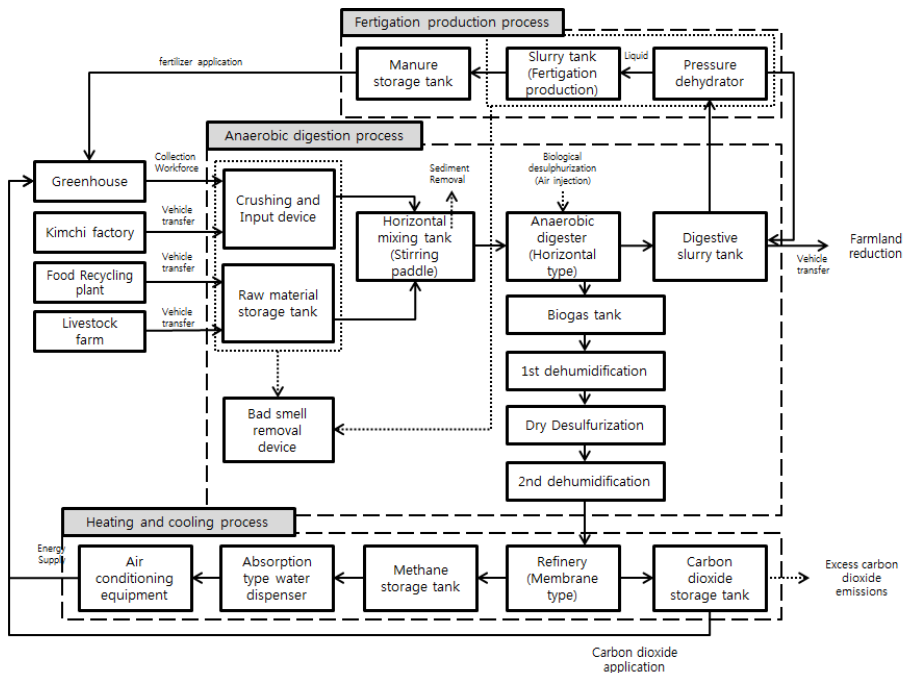


Fig. 1 System boundary of CEAS(Clean Energy Agriculture System).

본 연구에서는 돈분뇨와 음식물쓰레기 및 농산물 잔사를 이용하여 바이오가스를 생산하고, 생산된 바이오가스는 시설의 냉난방에너지를 공급하며, 혐기소화 후 남은 혐기소화액(폐액)은 액비로 사용하는 것을 범위로 한다. 동절기의 최대 난방부하량에 따라 바이오가스 플랜트의 크기가 선정되었기 때문에 평균적으로 시설하우스에서 냉난방에너지로 사용하는 바이오가스의 양은 바이오가스플랜트에서 생산되는 바이오가스의 25.85%만을 사용하게 된다. 바이오가스의 사용 및 처리방법에 따라 온실가스 배출량이 달라지고, CEAS의 온실가스 배출량을 분석하는 것이 주요 목적인 것을 감안하여 사용하고 남은 74.15%의 바이오가

스는 실증농가에서 사용하지 않고 전량 판매하는 것으로 가정하였다. 따라서 시스템 내에서 사용되어진 25.85%의 바이오가스는 온실가스배출량으로 산정하였으며, 판매된 74.15%의 바이오가스량의 사용에 따른 온실가스배출량은 본 연구의 배출량경계에 포함하지 않았다. 또한 혐기소화 공정을 통해 바이오가스를 생산하고 배출되는 액비 중 1 m³/day는 시설에서 사용하며 이 외의 액비는 지역의 농경지에 환원하는 것으로 가정하였으며, 액비의 비료가치는 본 연구의 시스템 경계에 포함하지 않았다.

전과정평가는 실제 제품의 제조부터 폐기까지의 과정을 포함하지만 본 연구에서는 하나의 농업시스템을 분석하는 것이기 때문에 시스템 하에서 에너지의 생산 및 사용과정에서 배출되는 온실가스를 분석하고자 한다. 따라서 본 연구의 시스템 경계는 공정과정의 원료 공급에서부터 농지환원에 이르는 과정까지를 포함하며, 이는 Fig. 1에 자세히 나타나 있다. CEAS가 도입되기 이전에는 안성시에서 발생하는 가축분뇨 중 93.7%가 퇴비화공정을 거쳐 농지로 환원되었다(2012년 안성시 축산과). 본 연구의 시스템경계에서는 농지환원까지 시스템 경계에 포함되지만 본 시스템이 도입되기 이전에도 퇴비화되어 농지로 환원되어 왔기 때문에 농지환원에 따른 퇴액비의 온실가스 배출량은 시스템 경계에 포함시키지 않았다. 혐기소화조에서 생산된 바이오가스는 냉난방시스템의 에너지로 공급되며, 바이오가스를 생산하고 남은 퇴액비의 경우 시설하우스에서 필요한 양 만큼 비료생산시스템을 통해 비료로 생산하고 남은 퇴액비는 농지로 환원한다. 비료생산공정을 통해 생산된 비료는 시설하우스에 투입하여 요소비료를 대체하게 된다. 이 모든 과정이 본 연구의 시스템 경계이며 이 과정에서 발생하는 온실가스배출량의 분석을 통해 공정별로 온실가스 배출량을 평가하였으며, 더불어 시스템경계 내에서 발생하는 온실가스감축량을 분석하였다.

5. 온실가스배출량 평가 방법

CEAS는 시스템 하에서 투입된 원료물질로 바이오가스를 생산하며, 생산한 바이오가스를 통해 시설하우스의 냉난방에너지를 공급하여 연중 작물재배가 가능한 시스템이다. 따라서 CEAS의 운영에 따른 각 설비들의 소요 에너지량을 정량적으로 파악하여 사용량에 따른 온실가스배출량을 산정하여야 한다. CEAS에서 가동되는 설비들은 크게 원료수송, 혐기소화공정, 냉난방시스템 그리고 비료생산시스템으로 총 4가지로 나누어지며 이 설비들의 에너지사용에 따른 계산방법은 아래의 수식과 같다.

1) 원료 수송

원료의 운송은 해당 시설에서 배출되는 양에 따라 5 t, 8 t, 15 t의 용량을 적재할 수 있는 트럭의 용량에 따라 계산하였다. 환경부의 LCI D/B에는 트럭의 용량별 수송 작업 시 온실가스배출량을 산정하고 있는데, 이 자료를 이용하여 각 수집·생산과정에서의 산물량(t)을

해당 시설에서 실증단지까지의 실제 운반 거리만큼 온실가스배출량을 산출하였다. 실제 운반 작업에서는 트럭 1대가 하루에 2회 이상 왕복 운행을 할 수 있지만 본 연구에서의 운송에 따른 온실가스배출량은 트럭의 운행거리의 비례하여 산출되므로 운행 횟수는 고려하지 않았다. 각 원료별 운송에 따른 온실가스 배출량은 운송거리와 탄소배출 계수에 의해서 계산된다(수식 1).

$$T_{i-transpotation} = \sum_i (D_i \times C_i \times E_i) \tag{1}$$

$T_{i-transpotation}$: 원료물질 i의 운송에 따른 온실가스 배출량(kgCO₂)

D_i : 원료물질 i의 운송거리(km)

C_i : 원료물질 i의 단위환산계수(kg/km)

E_i : 원료물질 i의 트럭용량에 따른 탄소 배출계수(kgCO₂/kg)

2) 혐기소화 공정

(1) 에너지 사용

혐기소화조에서 원료물질을 에너지화 하기 위해서는 원료물질을 35℃±2로 가온이 필요하지만 한국의 계절적인 영향, 혐기성 소화공정의 온도조건 등을 바탕으로 하여 40℃ 조건으로 산정하였다. 원료물질의 가온을 위해서는 혐기소화조도 같이 가온이 되어야 하므로 결과적으로 원료물질과 혐기소화조의 가온에 필요한 에너지를 계산하여야 한다. 따라서 혐기소화공정에서의 에너지사용에 따른 온실가스배출량은 혐기소화공정의 설비별 수요전력량, 대수 그리고 가동시간을 조사하여 계산하였다(수식 2).

$$AD_{anaerobicdigestion} = \sum_i (ET_i \times C_i \times T_i \times E_i) \tag{2}$$

$AD_{anaerobicdigestion}$: 혐기소화시설 I의 온실가스 배출량(kgCO₂)

ET_i : 혐기소화시설 i의 설비별 수요전력량

C_i : 혐기소화시설 i의 설비별 대수

T_i : 혐기소화시설 i의 설비별 가동시간

E_i : 전력사용에 따른 탄소배출계수(kgCO₂/kg)

(2) 에너지 누출

Table 2에서와 같이 혐기소화공정을 통해 생산된 바이오가스를 고질화²⁾장치에서 정제하는 과정을 거치면 메탄과 이산화탄소가 각각 99%, 95%가 회수되게 된다. 즉, 정제과정에서 CH₄는 1%, CO₂는 5%의 누출이 발생하는 것을 의미한다. 이는 소량이지만 공기 중으로 누출되는 바이오가스의 양을 규정하고 온실가스 배출량으로 산정할 필요성이 있기 때문에 온실가스배출량으로 산정하였다.

Table 2. Design criteria of CEAS(Clean Energy Agriculture system)

Classification	Design criteria	Remark
Anaerobic digestion	- Organic (VS) decomposition 75% - CH ₄ production potential 0.67 Nm ³ /kg-VS _{removed}	
Biogas purification	- CH ₄ recovery rate 99% - CO ₂ recovery rate 95%	

Source : Establishment of clean energy farming system using the agricultural waste biomass report (2015).

3) 냉난방시스템

CEAS에서 사용되는 냉난방시스템은 냉난방에 사용되는 전기나 화석연료 대신 바이오가스를 사용하므로 농가의 에너지 사용에 따른 비용의 부담을 줄일 수 있는 시스템으로 기존의 프레온가스 등의 환경유해 물질이 아닌 물을 냉매로 사용하는 냉동기를 이용하여 환경 부하가 발생하지 않는다.

(1) 난방부하량

시설하우스가 위치한 경기도 안성시의 겨울철 연도별 최저기온을 난방부하 산정의 기준으로 하기 위하여 1972년도에서 2013년 1월까지의 기상관측자료를 분석하였다. 그 결과 연중 평균 최저기온은 -19℃이며 이는 시설하우스에서 오이의 축성재배를 위한 최대 난방부하 산정기준으로 설정하였다. 난방을 하는 온실에서 열손실은 주로 피복자재를 통과하는 관류열량, 틈새를 통해서 손실되는 환기전열량 그리고 토양의 열교환에 의한 지표전열량으로 나누어진다. 따라서 실제 설치대상인 시설하우스의 면적과 피복에 의한 열에너지 절감률 등의 인자와 실내기온, 설계외기온도를 고려하여 최대 난방부하를 산출하였다.³⁾(수식 3)

2) 바이오가스를 에너지로 전환하는 단계에 필수적으로 H₂S를 제거하는 정제기술이 필요하다. 또한 공연비 유지, 효율 증대, 대기 오염물 감소, 시스템의 안정성 보장을 위해서는 단위체적당 열량을 일정하게 공급할 수 있도록 CH₄를 일정한 수준으로 유지시킬 수 있게 만드는 것이 고질화기술이다(Hwang, 2014).

$$E_{i,DHED} = E_{YHED} \times \frac{T_0 - T_i}{\sum_{i=1}^n (T_0 - T_i)} \quad (3)$$

$E_{i,DHED}$: 냉난방시스템에서의 가열시작에 따른 일일 난방부하량(Mcal 10a⁻¹ day⁻¹)

T_i : 제어 재배 기간 동안 일평균 기온(°C)

i : 제어 재배 기간 동안의 난방일수(-)

n : 평균 대기 온도 10°C 이하 일수(-)

T_0 : 제어 재배의 가열을 위한 표준 대기 온도(°C)

Table 3. The maximum heating load calculation factor

Factor	Measurement
Greenhouse surface (A_g)	658 m ²
Setting temperature of facility (T_{in})	15°C
Design temperature of outdoor (T_{out})	-19°C
Heating load factor (U)	5.7 kcal/m ² · hr°C
Reducing heat rate by covering for heat insulation (f_i)	0.35

Source : Establishment of clean energy farming system using the agricultural waste biomass report (2015).

(2) 에너지사용

시설하우스에서 하절기 냉방과 동절기 난방에너지의 사용에 따른 냉난방시스템의 온실가스 배출량을 나타내기 위해서는 냉난방시스템에서 사용하는 에너지의 사용량과 설비들의 가동시간의 데이터가 필요하다. 냉난방시스템의 가동에 따른 온실가스배출량은 다음의 수식과 같다(수식 4).

$$N_{i-system} = (Me_i \times T_i \times H_i \times C_i) + \left(\sum_i (E_i \times C_{i-electricity}) \right) \quad (4)$$

$N_{i-system}$: 냉난방시스템 i의 온실가스배출량

Me_i : 냉난방시스템 i의 메탄사용량(Nm³/h)

T_i : 일 가동시간(h)

3) 시설 채소 하우스 일별 난방부하량 도출 공식(한국산업기술시험원)

H_i : 가스흡수식냉난방기 효율(kcal/Nm³)

C_i : 메탄의 탄소배출계수(kgCO₂/kcal)

E_i : 냉난방시스템 i의 시설별 전기사용량(kWh)

$C_{i-electricity}$: 냉난방시스템 I의 전력에 따른 탄소배출계수(KgCO₂/kWh)

4) 비료생산시스템

비료생산시스템 바이오가스플랜트에서 혐기소화 공정을 마친 퇴액비를 응집교반조에 응집시킨 뒤 고압필터프레스공정을 거쳐 액비화조에서 비료를 생산하는 시스템이다. 비료생산시스템의 온실가스배출량을 산정하기 위해서는 시스템 내의 시설별 상용용량과 수요율을 구하여 시설의 수요전력을 구한다음에 가동시간을 곱하여 주면 된다(수식 5).

$$G_{system} = \sum_i (C_i \times E_{unit} \times T_i \times E_i) \quad (5)$$

G_{system} : 비료생산시스템 i의 온실가스배출량(kgCO₂)

C_i : 비료생산시스템 i의 시설별 상용용량(kVA)

E_{unit} : 비료생산시스템 i의 수요율(%)

T_i : 비료생산시스템 i의 시설별 운전시간(h)

E_i : 전력사용에 따른 탄소배출계수(kgCO₂/kVA)

Ⅲ. 전과정평가

1. 전과정 목록분석

CEAS의 전과정평가를 하기 위해서는 각 공정별 투입물과 산출물 그리고 생산물에 대한 데이터가 필요하다. 각 공정별 투입되는 데이터는 지역에서 수거된 원료물질(20 m³)에 따른 각 설비별 하루의 가동시간에 따른 에너지사용량을 산출하였고 청정에너지 시스템에서 배출되는 온실가스의 방식은 설비의 가동에 따른 직접배출, 공정 중 누출되는 바이오가스의 양으로 산정하였다.

Table 4. Input and Output data of CEAS

Classify	Input/Output	unit	amount/day	Remark
	Input			
Facility house	CO ₂	kg	6.6	Amount of Carbon dioxide fertilization
	Fertigation	m ³	1	Input of production fertigation
Transportation of raw material	Diesel	L	11.25	Based on a cargo truck (5 t, 8 t, 15 t) transport distance
Anaerobic digestion process	Livestock	m ³	14	Based on 20 t/day scale facility
	Kimchi processing by-product	m ³	3	
	Food waste	m ³	3	
	Electronic	kWh	706.30	
Heating and cooling system	CH ₄	Nm ³	225.6	Heating system 17.0 Nm ³ /h
	Electronic	kWh	1044.00	Cooling system 11.2 Nm ³ /h
Fertigation production	Electronic	kWh	169.70	Based on 1 m ³ /day scale facility
	Output			
Direct Emissions	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	kg	1007.56	<ul style="list-style-type: none"> • Greenhouse gas generated from the energy used by Process • Leak biogas under system • CO₂ emissions into the air from Storage buffer tank
Production (Biogas)	CH ₄ , CO ₂	kg	872.69	

2. 전과정 영향분석

CEAS의 LCA의 분석을 위해 한국인정원에서 개발한 전과정평가 소프트웨어인 PASS 소프트웨어를 이용하여 분석을 진행하였다. 전기, 수송, 경유 등 국내에서 이용 가능한 전과정목록(Life Cycle Inventory)이 존재하는 경우에는 국내의 LCI D/B를 사용하였고, D/B가 존재하지 않은 경우에는 수식에 따라 온실가스배출량을 계산하였다.

1. 온실가스배출량 분석

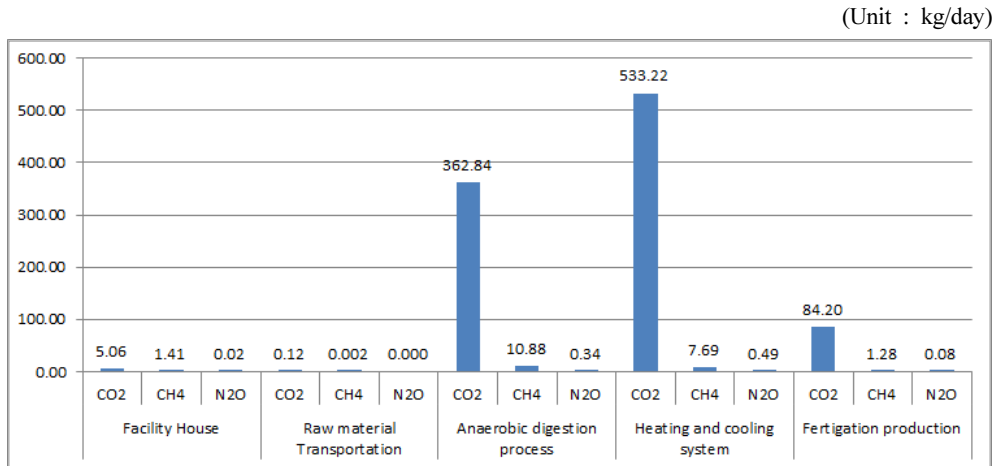


Fig. 2. Greenhouse gas emissions of processing in CEAS.

CEAS의 공정별 온실가스 배출량은 위의 Fig. 2와 같다. 시설하우스에서는 비료사용에 따른 온실가스 배출량을 산정하였다. 원료수송 부분은 지역에서 수거한 원료물질들을 시설하우스까지 운송하는 과정에서 발생하는 온실가스 배출량을 나타내며 모든 공정 중에서 가장 낮은 배출량을 나타냈다. 혐기소화공정에서는 원료물질을 통해 바이오가스를 생산하는 공정에서 사용된 에너지와 저장 및 고질화장치에서 누출된 바이오가스에 따른 온실가스배출량을 산정하였다. 냉난방공정에서는 냉난방공정의 가동에 필요한 전기사용에 따른 온실가스 배출량과 정제장치에서 멤브레인공정을 통해 배출된 이산화탄소의 양에 따른 온실가스 배출량을 산정하였다. 마지막으로 비료생산공정에서는 비료 1 m³/d의 생산에 따른 시설별 전기사용량에 따른 온실가스 배출량을 산정하였다. 모든 공정의 온실가스 배출량을 살펴보면 CO₂의 배출량이 985.43 kg으로 가장 많으며 비율로 살펴보면 CO₂ 97.7%, CH₄ 2.1%, N₂O 0.09%로 대부분의 배출가스가 CO₂인 것으로 나타났다. 보통 가축분뇨를 활용하여 에너지로 사용할 경우 CH₄의 비율이 높은 것에 반하여 CO₂의 비율이 높게 나타난 것은 생산된 메탄가스의 25.85%만 냉난방공정에 사용되었고 나머지 74.15%의 바이오가스는 시스템 내에서 사용하지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

2. 온실가스 감축효과분석

본 연구에서는 CEAS가 도입됨에 따라 가축분뇨의 에너지화, 화석연료 대체, 화학비료 대체효과를 통한 온실가스를 감축량을 산정하고 분석하였다. 기존의 시설하우스에서는 화석연료와 화학비료를 사용하여 작물을 생육하였지만, CEAS를 도입한 후에는 혐기소화공

정을 통해 생산된 바이오가스와 액비로 이를 대체할 수 있게 된다.

실증단지가 위치한 안성시에서는 보통 발생된 가축분뇨를 수거하여 대부분 퇴비화(93.7%)하여 퇴비로 사용하는 것으로 나타난다(2012년 안성시 축산과). 하지만 가축분뇨를 퇴비화하는 것보다 바이오가스화 하여 처리할 경우 268 kgCO₂-eq/ton의 온실가스를 더 감축할 수 있다(Nam et al., 2008). 따라서 CEAS를 통해 가축분뇨를 바이오가스화 할 경우 기존의 퇴비화방식보다 많은 온실가스를 감축시킬 수 있게 된다. 또한 생산된 바이오가스를 시설 내의 냉난방시스템에 공급하여 화석연료를 대체하며, 비료생산시스템을 통해 시설하우스의 요소비료를 대체하여 이산화탄소의 발생량을 감축시킬 수 있다. 각 온실가스의 감축량은 지구온난화계수(Global Warming Potential, GWP)를 적용하여 이산화탄소 상당량(CO₂-eq)으로 환산하였다. GWP는 온실가스가 100년 동안에 미친 온난화 효과를 이산화탄소의 효과를 1로 하였을 때 환산한 값으로 메탄은 21, 아산화질소는 310을 적용하였다(IPCC, 2001).

Table 24. Annual GHG reduction of CEAS

Classify		GHG Reductin	%	Unit	Remark
Production of Biogas		1,956	89.32	t-CO ₂	Based on 20 t/day scale facility
Fossil fuel substitution effect	Heating	81.98	-	t-CO ₂	1 cal = 4.1868J, 72,600 kg-CO ₂ /TJ
	Cooling	151.67	-	t-CO ₂	0.4836 kg-CO ₂ /kWh
	Subtotal	233.65	10.67	t-CO ₂	
Chemical fertilizers substitution effect		0.03	0.01	t-CO ₂	0.28 t-C/t-CO ₂
Total		2,189	-	t-CO ₂	

위의 Table 25는 각 공정에서 감축되는 온실가스량을 나타낸 표이다. 바이오가스 생산에 따른 온실가스 감축량은 혐기소화 시설과 우리나라 가축분뇨 처리에 가장 일반적으로 활용되고 있는 퇴비화 방법의 온실가스배출량의 비교로 산정하였다. 퇴비화 과정 중에는 NH₃, N₂O, CH₄ 등의 대기 오염물질과 온실가스가 발생한다. 가스의 발생량과 조성은 퇴비화 과정 중 산소의 공급과 밀접한 관련이 있는데, 볏짚의 첨가, 퇴비더미 뒤집기 및 강제 통기를 통하여 산소 공급량을 늘리면 N₂O와 CH₄의 발생은 감소하지만 NH₃의 발생은 증가한다(Amlinger et al., 2008). 퇴비화 과정 중 온실가스 배출량은 국내에서 사용되는 퇴비화 방법과 동일한 방법으로 퇴비화를 수행한 일본의 연구결과를 이용하여 추산하였다. 돈분-톱밥(수분 60%) 퇴비화 과정 중 가스발생량은 암모니아 127.4 g NH₃-N/kg T-N, 아산화질소 46.5 g N₂O-N/kg T-N, 메탄 1.9 g CH₄/kg OM이었다(Fukumoto et al., 2003). 바이오가스 생산

에 사용된 돈분뇨/음식물폐기물(7:3) 1톤은 퇴비화 과정 중 733 g NH₃, 691 g N₂O, 85.9 g CH₄을 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 유기물 감량을 36% 적용하고, 메탄으로 전환된 탄소 이외의 전부가 CO₂로 전환하였다고 가정하면 32.2 kg CO₂가 대기 중으로 배출된다. 그러므로 돈분뇨/음식물폐기물(OM 4.5%) 1톤이 퇴비화 과정 중 대기 중으로 배출하는 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O)의 양은 248 kg CO₂-eq로 계산되었다. 각 온실가스별 기여율은 N₂O, CH₄, CO₂ 각각 86%, 0.7%, 13.3%로 N₂O가 대부분을 차지하고 있었다. 그러나 유기물의 분해의 최종 산물이 CO₂라는 것을 고려하고 또한 유기물 중의 CO₂가 대기 중에서 유래한 것을 감안하면 퇴비화 과정 중 발생하는 CO₂는 탄소중립(Carbon neutral) 개념을 적용하여 평가에서 제외하는 것이 타당할 것이다. 이 경우 퇴비화 과정 중 온실가스 배출량은 216 kg CO₂-eq/ton waste(OM 4.5%)였다.

위 결과는 바이오가스화를 통한 처리시 전체적으로 52 kg의 CO₂-eq를 감축할 수 있었다는 것을 고려하면 기존 퇴비화 방법에서 바이오가스 생산방법으로 전환함으로써 268 kg CO₂-eq/ton의 온실가스를 감축할 수 있음을 나타낸다. 이는 5 ton/d 바이오가스 시설에서 연간 489 ton CO₂-eq를 감축할 수 있다는 것을 나타낸다(Nam et al., 2008). 이러한 선행연구 데이터를 기준으로 본 연구에서 사용된 20 ton/d 크기의 바이오가스플랜트에서 바이오가스를 생산할 경우 1956 t-CO₂의 온실가스 감축효과가 있는 것으로 산정하였다.

화석연료의 대체효과에 따른 온실가스감축량은 시설하우스의 작기별 에너지 수요량 269,725 Mcal을 충족하기 위하여 투입된 메탄가스의 저위발열량을 통해 작기별 온실가스 감축량을 계산하였다. 하절기에는 냉방에너지를 대체하는 것이기 때문에 에어컨의 사용에 필요한 전력사용량을 대체하는 것으로 계산하였으며, 동절기에는 난방에너지를 대체하는 것이기 때문에 화석연료를 대체하는 것으로 계산하였다. 화학비료 대체효과는 시설하우스의 요소비료 필요량인 33.99 kg-urea/년을 대체함에 따른 온실가스 배출량을 계산하였다. 전체 온실가스 감축량에서 바이오가스 생산에 따른 온실가스감축량이 89.32%로 가장 높았으며, 화석연료 대체효과가 10.66%로 나타났다. 화학비료 대체에 따른 감축효과는 전체에서 차지하는 비율이 0.01%로 나타났으며, 20 t/d의 바이오가스플랜트를 통한 청정에너지 농업 시스템의 구축을 통해 연간 2189 t의 CO₂를 감축할 수 있는 것으로 분석되었다.

IV. 결 론

아직까지 농업부분에서 가축분뇨를 활용한 농업방식이 활성화되기에는 초기투자비용에 따른 진입장벽과 CEAS의 구축에 필요한 시설면적이 존재하여 영세한 농가는 활용할 수 없다는 한계가 존재한다. 하지만 가축분뇨가 한국에서 임산 바이오매스 다음으로 큰 잠재 에너지량을 지니는 바이오매스라는 점에서 향후 농촌에서의 농업용 에너지 대체를 위한 주

요한 바이오매스자원으로서 다양한 활용 체계를 모색할 필요가 있다. CEAS는 크게 원료수송, 혐기소화공정, 냉난방시스템, 비료생산의 4가지 공정이 존재하며 위의 공정들을 통해 바이오가스와 비료를 생산하고 온실가스가 발생하게 된다. 냉난방시스템과 혐기소화공정에서 가장 많은 온실가스가 배출되었으며 보통 가축분뇨를 활용하여 에너지로 사용할 경우 CH₄의 비율이 높은 것에 반하여 전체 배출량에서 CO₂의 비율이 높게 나타난 것은 생산된 메탄가스의 25.85%만 냉난방공정에 사용되었고 나머지 74.15%의 바이오가스는 시스템 내에서 사용하지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 가축분뇨는 퇴비화 하는 것보다 바이오가스화 하여 처리할 경우 더 많은 온실가스를 감축할 수 있다(Nam et al., 2008). 따라서 CEAS를 통해 가축분뇨를 바이오가스화 할 경우 현재 한국에서 가축분뇨를 퇴비화 하는 방식보다 많은 온실가스를 감축시킬 수 있게 된다. 따라서 가축분뇨를 바이오가스화 할 수 있는 청정에너지농업시스템 뿐만 아니라 지속적인 연구를 통해 농업부에서 지속가능한 농업과 온실가스저감을 할 수 있는 농업시스템이 개발되길 바란다.

[Submitted, October. 7, 2015 ; Revised, December. 4, 2015 ; Accepted, December. 9, 2015]

References

1. Shin, J. D., D. K. Lim, K. Y. Kim, M. H. Park, M. H. Koh, and K. C. Eom. 2003. Application of the Life Cycle Assessment Methodology to Rice Cultivation in Relation to Fertilization. *Korean J. Environ. Agr.* 22: 41-46.
2. Kramer, K. J., H. C. Moll, S. Nonhebel, and H. C. Wilting. 1999. Greenhouse Gas Emissions Related to Dutch Food Consumption. *Energy Policy.* 27: 203-216.
3. Nonhebel, S. 2004. On Resource Use in Food Production Systems: the Value of Livestock as 'Rest-stream Upgrading System'. *Ecological Economics.* 48: 221-230
4. Heo, B. D., S. H. Kim, J. T. Yoo, Y. K. Go, and S. M. Yang. 2002. Practical Application of Bio-Gas Using Technology through Integration Digestion of Food/Livestock Waste, *Korean J. Organic waste.* 10(1): 46-51.
5. Murphy, J. D., E. McKeogh, and G. Kiely. 2004. Technical/Economic/Environmental Analysis of Bio-Gas Utilisation, *Appl. Energ.* 77(4): 407-427.
6. Kim, S. Y., I. H. Hu, and S. D. Lee. 2010. Impacts of Temperature Rising on Changing of Cultivation Area of Apple in Korea. *Korean J. Association of Regional Geographers.* 16: 201-215.

7. Nam, J. J., Y. M. Yoon, Y. H. Yee, K. H. So, and C. H. Kim. 2008. Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Livestock and Food Wastes Co-digestive Bio-Gas Production System. *Korean J. Environmental Agric.* 27(4): 406-412.
8. Hwang, M. S. 2014. A study on the Bio-Gas Desulfurization System and Bio Upgrading. Ph. D. Thesis. Hankyung National University.
9. Fukumoto, Y., T. Osada, D. Hanajima, and K. Haga. 2003. Patterns and Quantities of NH₃, N₂O and CH₄ Emissions during Swine Manure Composting without Forced Aeration-effect of Compost Pile Scale. *Bioresource Technol.* 89(2): 109-114.
10. Amlingerm, F., S. Peyr, and C. Cuhls. 2008. Greenhouse Gas Emissions from Composting and Mechanical Biological Treatment. *Waste Manage.* 26(1): 47-60.
11. MAFRA. 2015. Establishment of Clean Energy Farming System Using the Agricultural Waste Biomass Report.