

전과정평가 방법을 이용한 가축분뇨/음식폐기물 통합 소화형 바이오가스 시설의 온실가스 배출량 평가

남재작^{1)*} · 윤영민²⁾ · 이영행³⁾ · 소규호¹⁾ · 김창현²⁾

¹⁾농촌진흥청 농업과학원 기후변화생태과, ²⁾한경대학교 바이오가스 연구센터, ³⁾한국과학기술연구원 환경기술연구단
(2008년 6월 25일 접수, 2008년 11월 17일 수리)

Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Livestock and Food Wastes Co-digestive Biogas Production System

Jae Jak Nam^{1)*}, Young-Man Yoon²⁾, Young Haeng Lee³⁾, Kyu Ho So¹⁾, and Chang-Hyun Kim²⁾ (¹⁾Department of Climate Change and AgroEcology, National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, 441-707, Korea, ²⁾Biogas Research Center, Hankyong National University, Anseong, 456-749, Korea, ³⁾Center for Environmental Technology Research, Korea Institute of Science and Technology, 39-1 Hawolgok-Dong, Sungbuk-Gu, Seoul 136-791, Korea)

ABSTRACT: Biogas plant with anaerobic digestion is receiving high attention as a facility for both livestock waste treatment and electric power generation. Objective of this study was to perform life cycle assessment (LCA) of a biogas plant which incorporates swine and food waste (7:3) as source materials for biogas production. In addition, the biogas production process was compared with the prevalent composting method as a reference in the aspects of greenhouse gas (GHG) reduction potential and environmental impact. The biogas method was capable of reducing 52 kg CO₂ eq. emission per ton of swine/food waste, but the composting process was estimated to emit 268 kg CO₂ eq. into air. The biogas method was evaluated as more beneficial to the environment by mitigating the impact on abiotic depletion potential (ADP), global warming potential (GWP), ozone depletion potential (ODP), eutrophication potential (EP), and photochemical ozone creation potential (POCP), but not to acidification potential (AP).

Key Words: LCA, Biogas, Composting, Environmental impact assessment, Greenhouse gas

서 론

현재 혐기소화를 이용한 바이오가스 생산시설은 가축분뇨의 처리 방법뿐 아니라 전기 에너지를 생산하는 수단으로 많은 주목을 받고 있다. 일반적으로 바이오가스 생산시설은 원재료의 악취 발생을 감소시키고 작물 영양원이 풍부하고 안정된 액비를 생산하는데 유리하다.¹⁾ 하지만 가축분뇨 자체는 총고형물질(Total Solid, TS)의 함량이 낮을 뿐만 아니라 분해 가능한 휘발성 고형물질(Volatile Solid, VS)의 함량 또한 낮아 에너지원으로서의 경제성은 낮은 편이다. 바이오가스 생산량을 늘려 경제성을 높이기 위한 방법으로 소화되지 않은 유기물을 투입하는 방법이 널리 활용되고 있다.²⁻⁴⁾ 국내

에서는 음식폐기물(남은 음식물)이 연간 418만 톤 발생하고 있어 가장 활용가능성이 높다.⁵⁾ 그 외에도 도축장 폐기물, 식품공정 폐기물, 작물 잔사 등도 활용 가능한 자원이다.

1 m³의 바이오가스는 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.⁶⁾ 이 때 바이오가스를 열병합 발전에 사용하지 않고 수송용 연료로 사용할 경우 환경성과 경제성은 더 증가하는 것으로 평가되었다. 가축분뇨를 퇴비화 할 경우 퇴비화 과정에서 NH₃, CH₄, N₂O 등의 직접 또는 간접적 온실효과 가스가 발생한다.^{7,8)} 또한 퇴비화 과정에서 폭기 및 뒤집기를 위한 다량의 에너지와 수분 조절을 위한 톱밥 등의 부재료도 사용하여야 한다. 이에 비해 바이오가스 시설은 생산되는 자체에너지로 시설의 운전이 가능하고, 악취 및 온실효과 유발 가스의 배출을 감소하는 효과가 있다.¹⁾ 이렇게 감축된 이산화탄소는 CDM(clean development

*연락처:

Tel: +82-31-290-0231 Fax: +82-31-290-0206
E-mail: jjnam@rda.go.kr

mechanism) 사업을 통하여 탄소시장에서 거래할 수 있어 바이오가스의 경제성을 더욱 높일 수 있다.

바이오가스 생산과정 중 발생하는 온실가스의 양을 평가하기 위해서는 원료 투입부터 최종단계인 혐기폐액(액비)의 처리까지 전과정(life cycle) 동안에 투입 및 산출되는 에너지와 물질에 대한 분석이 필요하며, 이러한 방법론은 다양한 분야에 폭넓게 적용되고 있다.⁹⁻¹¹⁾ 전과정 관점을 적용하여 바이오에너지 시설에 대한 에너지 수지 평가에서 생산된 에너지의 30%(범위 20-40%) 정도가 바이오가스 생산을 위한 운전 및 이송에 사용되는 것으로 분석되었다.¹²⁾ 이 중 대부분은 시설의 운전에서 사용되었다. 전과정분석(life cycle analysis)을 이용한 다양한 유기성 재료를 혼합하여 바이오가스를 생산하는 방법에 대한 환경영향 평가 역시 실시된 바 있다.¹²⁾ 이 분석에서는 윤활유의 사용, 시설의 건설 및 폐기와 같은 항목은 환경영향이 크지 않았지만 열병합발전은 환경부하가, 바이오가스 생산은 환경 편익이 큰 것으로 분석되었다.

바이오가스 발전시설의 온실가스 발생 저감량을 평가하기 위해서는 기존의 처리 방법과의 비교 분석이 필요하다. 환경부의 통계자료에 따르면 가축분뇨의 90%는 자원화 방법을 통하여 처리되고 있으며, 그 중 80% 이상이 퇴비화 하는 것으로 나타났다.¹³⁾ 그러므로 바이오가스 시설과의 비교를 위해서는 퇴비화 방법과 비교하는 것이 타당할 것이다. 현재까지 우리나라에서 퇴비화 시설에 대한 전과정분석은 실시된 예는 없으며, 수분조절제로 사용되는 톱밥 등에 대한 분석 자료도 없는 실정이다. 외국의 경우에는 퇴비화 과정 중 온실가스 발생량에 대한 다양한 연구결과가 현재 이용가능 하다.^{7,14,15)}

본 논문에서는 전과정평가 방법을 이용하여 가축분뇨-음식폐기물 통합 소화형 바이오가스 에너지화 시설에 대한 온실가스 발생량 및 환경부하를 평가하였다. 또한 퇴비화 방법과 비교하여 바이오가스 발전의 온실가스 배출 영향을 비교 평가하였다.

연구방법

바이오가스 생산 공정

본 연구에 사용한 바이오가스 시설은 CSTR(Continuous stirred-tank reactor) 방식의 혐기소화조로 시설 전체에 대한 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 주원료로는 모돈사 및 자돈사에서 발생하는 돈분뇨와 안성사에서 수거한 음식폐기물(남은음식물)을 사용하였다. 음식폐기물은 주당 한번 운반용 차량으로 이송하여 원료 저장조에 투입하였고 돈분뇨와 3:7의 비율로 혼합하였다. 혼합된 원료는 5 m³/day의 유속으로 혐기소화조로 투입하였으며, 혐기소화조의 HRT(Hydraulic Retention Time)와 SRT(Solids Retention Time)는 30일이었다. 혐기소화조의 운전온도는 35°C 내외로 유지하였다. 바이오가스 생산 시설의 모든 부분은 중앙제어실의 컴퓨터에서 제어하였으며, 각 부분에 센서를 이용하여 유량과 온도, 가스 조성 등을 온라인 모니터링 하였다.

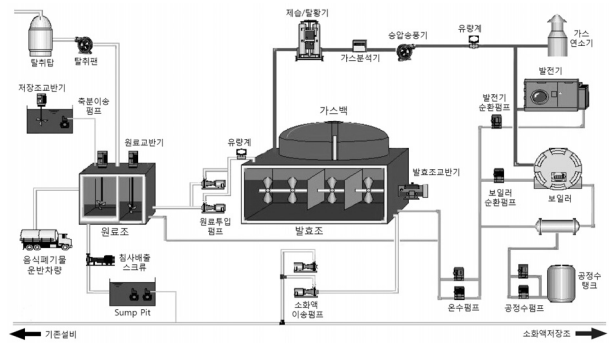


Fig. 1. Overview of the biogas plant used in this study.

생산된 바이오가스는 유량계(KTR 550, 한국유량계)를 이용하여 자동 모니터링 하였으며, 제습 및 탈황을 거친 후 경유 및 바이오가스 혼소형 발전기(Biogas 30B, (주)KEC)를 사용하여 전기를 생산하였다. 생산된 전기는 적산 전력계(OMWH-122, 옴니시스템)를 이용하여 계측하였다. 바이오가스 조성은 비분산적외선(Nondispersive Infrared, NDIR) 방식의 센서 측정기(SSSM 6000, GmbH & Co.KG)를 이용하여 측정하였다.

화학분석

혐기소화조의 유기물 분해율을 파악하기 위해서 유입원료(돈분뇨 슬러리와 음식폐기물)와 혐기소화조 내 혐기소화액, 혐기소화조 유출액의 총고형물(Total Solid, TS) 함량과 휘발성고형물(Volatile Solid, VS) 함량을 분석하였으며, 혐기소화액의 액비활용을 위한 비료가치를 분석하기 위해 총질소(Total Nitrogen; TN) 및 암모니아태 질소(NH₄⁺-N), 인산, 칼륨의 함량을 분석하였다. 유입원료와 소화액에서 총고형물(TS)은 105°C에서 건조 후 건조중량을 측정하였으며, 휘발성고형물(VS)은 550°C에서 회화 후 건조중량을 총고형물에서 감하여 계산하였다.¹⁶⁾ 총질소(T-N)는 킬달분해 후 중화적정법으로 분석하였고 암모니아태 질소(NH₄⁺-N)는 중류 후 중화적정법으로 분석하였다.¹⁶⁾ 유기물(OM) 함량은 휘발성고형물(VS)의 값을 사용하였다.

본 연구에 사용한 돈분뇨 및 음식폐기물의 유기물 함량(VS 함량)은 각각 1.7±0.4, 11.1±0.4%였다. 총질소(T-N) 함량은 돈분뇨 0.45±0.03%, 음식폐기물 0.53±0.09%였다.

온실가스 배출량 분석

바이오가스 생산시설의 LCA의 수행은 환경부의 환경성적표지제도 인증에 사용되는 전과정평가 소프트웨어인 Total 3(친환경상품진흥원)을 이용하여 수행하였다. 전기, 수송, 스티밍생산, 경유 등 국내에서 이용 가능한 전환경목록(Life Cycle Inventory, LCI)이 존재하는 경우에는 국내의 LCI를 사용하였고, 그렇지 않은 경우는 해외의 LCI 자료를 사용하였다. 바이오가스 생산 후 배출된 혐기폐액의 경우 전부 액비로 농경지에 환원하는 것으로 가정하고 농경지까지의 수송은 포함

하였으나, 액비의 비료가치는 본 연구의 시스템 경계에 포함하지 않았다. 경유는 0.83 kg/L의 평균밀도를 적용하여 부피를 무게로 변환하였으며, 기타 배출가스는 표준상태(25°C, 1 atm)를 가정하여 부피를 모두 무게로 변환하였다. 각 온실가스량은 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, 이산화질소는 310을 적용하였다.¹⁷⁾ 바이오가스 시설과 비교를 위한 기준(reference) 시스템으로는 우리나라 가축분뇨 처리에 가장 일반적으로 활용되고 있는 퇴비화 방법을 활용했다. 퇴비화 과정 중 발생하는 온실가스 발생량에 대한 분석 자료는 우리나라와 동일한 방법으로 퇴비화를 수행한 일본의 연구결과를 이용하여 추산하였다. LCA를 이용한 영향범주(impact category)별 환경영향평가(environmental impact assessment)는 환경부의 환경성적표지제도에 사용되는 방법을 이용하였다. 환경성적표지제도는 제품의 원료채취, 제조, 소비 및 폐기 등 제품의 전과정에서의 자연자원의 사용, 배출되는 오염물질 및 동 오염물질이 지구환경에 미치는 환경영향을 계량화하는 방법으로 자원소모(abiotic depletion potential, ADP), 지구온난화(global warming potential, GWP), 오존층 영향(ozone depletion potential, ODP), 산성화(acidification potential, AP), 부영양화(eutrophication potential, EP), 광화학 산화물 생성(photochemical ozone creation potential) 등 6개의 범주(category)로 나누고 있다.¹⁸⁾

결과 및 고찰

시스템 영역 설정

본 연구에서는 돈분뇨와 음식폐기물을 이용하여 바이오가스를 생산하고, 이를 경유 혼소형 발전기를 이용하여 전기를 생산하고 혐기소화 후 남은 혐기소화액(폐액)을 액비로 사용하는 것을 그 범위로 한다. 또한 기존의 퇴비화 방법과 비교를 위하여 돈분뇨 1 톤을 기준으로 하여 비교 평가하였다. LCA 평가를 위한 바이오가스 시설의 시스템 영역(system boundary)과 모식도는 Fig. 2에 나타내었다. 돈사에서 발생한 돈분뇨는 파이프라인을 통하여 바이오가스 시설의 원료조로 유입 된다. 이 때 돈분뇨는 가축사육 과정 중 발생하는 폐기물이므로 생산을 위한 에너지의 투입은 없는 것으로 간주하였다. 가축분뇨는 원료조에서 저장하였다가 음식폐기물과 혼합된 후 혐기소화조로 투입되었다. 음식폐기물은 5톤의 차량을 이용하였으며 이동거리는 20km로 가정하였다. 음식폐기물은 일주일에 한번씩 공급하였다. 혐기소화 공정을 통해 메탄가스를 회수하고 남은 발효폐액은 전부 액비로 재활용되는 것으로 가정하였다. 액비의 농경지까지 평균 이송거리는 10 km로 하였다. 그러나 액비 사용에 따른 화학비료의 회피 효과(avoided effect)는 본 논문에서는 분석한 시스템 경계에는 포함하지 않았다. 민감도 분석은 이송거리에 따른 영향

과 새로운 기술을 적용하여 메탄 생산효율이 30% 증가할 때의 영향 등을 고려하였다.

혐기소화 공정

2008년 5월 한 달간 평균한 혐기소화 공정의 물질수지는 Fig. 3에 나타내었다. 돈분뇨의 경우 TS 대비 62% 정도의 VS 농도 비율을 보였으며, 음식폐기물의 경우 86%의 VS 농도 비율을 보였다. 이는 바이오가스 생산 잠재력(potential)은 음식폐기물이 더 크다는 것을 나타내고 있는데, 이것은 돈분뇨의 경우 이미 돼지의 소화기관에서 소화되어 상당량의 가용 유기물이 분해된 후 배출되었기 때문이다. 혐기 소화조에서 바이오가스 생산량은 252±20 Nm³/d를 보였으며, 바이오가스 중 메탄함량은 68±0.9% 였다(Table 1). 사용된 혼합 원료의 VS 1 kg 당 바이오가스 1.115 m³ CH₄이 생산되었다. 생산한 바이오가스는 전량 경유 혼소엔진을 활용하여 전력으로 변환하였는데, 이 때 사용된 경유 소비량은 36.9 L/d 였고, 626 kWh/d의 전기와 689 Mcal/d의 열을 생산하는 것으로 추산되었다. 이를 VS 기준으로 환산하면 전기와 열이 각각 2.77 kWh/kg VS, 3.05 Mcal/kg VS 생산되는 것으로 나타났다. 이 때 생산된 전기의 13.6%는 시설의 운영을 위해 사용되었다. 이 기간 동안 혐기소화조의 온도 유지를 위한 온수의 이용은 없었다.

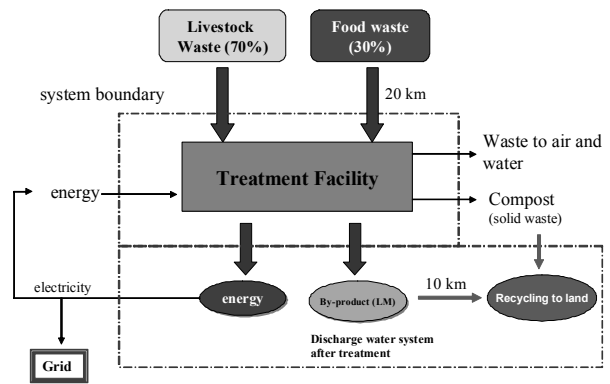


Fig. 2. System boundary of LCA applied to the biogas plant equipped with an anaerobic co-digestion process.

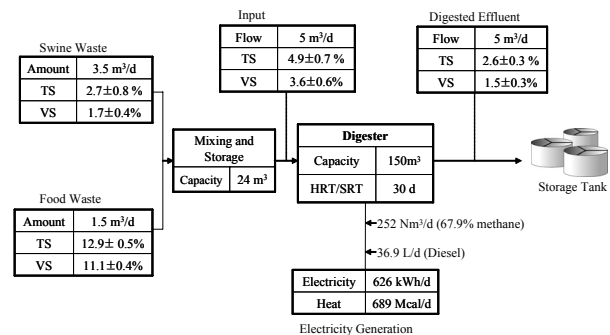


Fig. 3. Specifications of the biogas plant based on the operational data used in this study.

바이오가스의 발생량을 각 원료의 VS 기준으로 기여도를 분석하면 돈분뇨는 26.2%, 음식폐기물은 73.8%인 것으로 나타났다. 그러므로 바이오가스 처리시설의 경제성과 환경성을 높이기 위해서는 음식폐기물과 같이 유효한 유기물을 첨가하는 것이 유리하다는 것을 확인 할 수 있었다.^{19,20)} 바이오가스 시설의 전과정평가에 사용한 투입 및 산출물은 Table 1에 요약 정리하였다. 혐기소화 공정 최종 산물인 혐기폐액은 전량 액비로 사용하는 것으로 가정하였지만, 실제 농장에서 혐기소화 폐액은 기존의 SCB(Slurry Compositing and Bio-Filtration) 공법을 통해 처리된 후 그 액은 정화처리시설에서 호기성 처리 후 방류하고, 퇴비단은 1년에 2회 회수하여 퇴비로 활용하고 있었다.

혐기소화 후 부산물로 생성된 소화액은 미생물에 의한 유기물 분해 과정을 거치기 때문에 가축분뇨 특유의 악취가 저감되고 안정화된 상태로 존재하게 된다. 혐기소화액은 호기성 액비제조 방법과는 달리 휘산에 의한 질소 성분의 손실이 작고, 대부분의 질소가 혐기상태에서 암모니아태 질소(NH₄⁺-N)로 존재하여 토양 흡착력이 높고 식물이 쉽게 이용할 수 있는 특징이 있다. 따라서 혐기소화액은 화학비료를 대체하여 식물에 필요한 양분을 공급할 수 있는 속효성 비료로써 활용할 수 있다.¹⁾ 본 시설의 혐기소화액비(LF A)와 다른 시설의 액비(LF 2)에 대한 성분 조성은 Table 2에 나타내었다. 혐기발효 액비 중 질소 함량은 0.45%로 다른 액비와 비교했을 때 중간 정도의 범위에 들었으며,^{1,21)} 질소의 대부분은 암모니아태 질소로 존재하고 있었다.

온실가스 배출량 분석

1 톤의 돈분뇨/음식폐기물(7:3)에서는 바이오가스 50.4 Nm³가 생산되며 직접적으로 31.2 kg CO₂를 포함하고 있고, 또한 CH₄의 연소로부터 67.2 kg의 CO₂가 발생하여 총 98.4 kg의 CO₂가 발생한다. 이 때 H₂S 1.91 kg이 오염물질로 발생한다. 하지만 이 때 발생하는 CO₂는 대기 중 CO₂를 광합성을 통하여 동화한 것으로 간주하여 추가적인 온실가스 영향은 없는 탄소중립(carbon neutral)으로 간주 하였다.¹⁹⁾

본 실험에 사용한 바이오가스 생산자료(Table 1)를 이용하여 1 톤의 돈분뇨/음식폐기물에 대한 전과정영향평가(LCA) 결과를 Table 3에 나타내었다. 먼저 기본 시나리오인 시험플랜트 운영결과와 음식폐기물 운송 20 km, 액비운송 10 km를 적용하였을 때 온실가스는 52 kg CO₂-eq./ton 감축 가능하다는 것을 나타내고 있다. 5 ton/d 시설에서 연간 감축할 수 있는 양은 95 ton CO₂-eq/yr에 달한다는 것을 의미한다. 온실가스 감축효과의 양은 주로 전기와 열의 생산에 의한 회피효과로 분석되었다. 그 외에도 산성화(AP) 영향을 제외한 모든 범주에서 환경개선에 도움이 될 것이라는 것을 이 분석을 통해 확인할 수 있었다. 다른 영향범주와는 달리 산성화 영향이 증가하는 것으로 나타나는 것은 혼소형 발전기에 사용된 경유에 의한 영향이 주로 반영된 것으로 평가되었다. 이를 감축하기 위해서는 발전기를 순수 바이오가스만을 사용하는 것으로 교체하면 개선이 가능할 것으로 기대되었다. LCA 분석결과로부터 알 수 있듯이 바이오가스를 생산하는 방식의 유기성 폐기물 처리방법은 친환경성이 매우 우수하다고 평가할 수 있었다.

Table 1. Input and output data of the biogas plant for a day¹⁾

	Input	Output	Comments
Input materials (m ³ /d)	5	-	TS 4.9%, VS 3.6%
- Swine waste (m ³ /d)	3.5	-	TS 2.2%, VS 1.4%
- Food waste (m ³ /d)	1.5	-	TS 12.3%, VS 10.8%
Electricity (kW/d)	84.9	626	Assuming that all biogas was converted to electricity
Biogas (Nm ³ /d)	-	252±20	CH ₄ 67.9%, CO ₂ 31.6%, H ₂ S 0.5%
Diesel (L/d)	36.9		Used for the generator
Heat (Mcal/d)	-	689	Currently the heat produced is not used for maintaining the facility
Liquid fertilizer (ton)	-	5	N : 0.45%

¹⁾Average data obtained from the actual operation of the biogas plant in May, 2008.

Table 2. Properties of liquid fertilizer after biogas fermentation

	pH	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	T-P	K ₂ O
		mg/ L				
LF A ¹⁾	8.0	4,500	3,212	-	-	-
LF B ²⁾	8.2	2,410	2,120	0.7	380	3,300

¹⁾Data from the facility used for this study. ²⁾Cited from 고.¹⁾

Table 3. The result of LCA for biogas plant

Impact categories ¹⁾	Unit	Scenario 1 ²⁾	Scenario 2 ³⁾	Scenario 3 ⁴⁾
ADP	kg antimony-eq./ton	- 0.21	-0.20	-0.29
GWP	kg CO ₂ - eq./ton	-52	-50	-70
ODP	kg CFC11-eq./ton	5.47E-7	11.0E-7	5.45E-7
AP	kg SO ₂ -eq./ton	0.67	0.69	0.86
EP	kg PO ₄ ⁻³ -eq./ton	-0.0116	-0.0064	-0.0174
POCP	kg C ₂ H ₄ -eq./ton	-0.038	-0.034	-0.052

¹⁾Abbreviations: ADP(abiocytic depletion potential), GWP(global warming potential), ODP(ozone depletion potential), AP(acidification potential), EP(eutrophication potential), POCP(photochemical ozone creation potential). ²⁾Basic scenario described in the method section. ³⁾Scenario that doubled the distance of transport to the basic scenario. ⁴⁾Scenario that increased the biogas production by 30% from the basic scenario.

민감도 분석

수송거리 증가 및 바이오가스 생산효율 향상에 따른 온실가스 배출량 변화 분석결과는 Table 3에 나타내었다. 액비 수송거리가 2배 증가하였을 때(Scenario 2) 기준방법(Scenario 1)에 비해 온실가스 감축잠재량은 3.8% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 액비 살포거리와 음식폐기물 수송거리의 증가는 온실가스 배출량에 미미한 영향을 미친다는 것을 나타내었다.

또한, 새로운 기술을 적용하여 바이오가스 생산 효율을 30% 증가시킬 경우(Scenario 3) 온실가스 감축잠재량은 34.6% 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 바이오가스의 생산량을 늘리거나 메탄의 함량을 높이는 기술들이 온실가스 감축과 환경성 증가에 크게 기여할 것임을 나타내고 있다. 이 외에도 바이오가스 발전과정에서 발생하는 열에 대해 산업체에서 스팀 생산에 필요한 에너지에 대한 회피효과를 적용할 경우 온실가스 감축효과는 46% 정도 증가하는 것으로 추정되었다. 그러므로 발전 폐열을 효과적으로 사용하는 것 역시 바이오가스 시설의 환경성을 개선하는데 크게 기여할 것으로 판단되었다.

LCA의 한계

본 연구에 사용된 시스템 경계는 가축분뇨와 음식폐기물이 바이오가스 시설에 이송되어 들어오는 과정부터 혐기소화액을 액비로 사용하기 위해 운송하는 과정까지로 하였다(Fig. 2). 그러므로 혐기소화액비 사용에 따른 화학비료 회피효과는 평가범위에 포함되지 않았고, 음식폐기물 수거 과정과 액비로 농경지에 살포하였을 때부터 발생하는 온실가스 배출량

은 본 연구에서는 포함하지 않았다. 발전 폐열 역시 검토해야 할 중요한 인자이지만, 현재 폐열(스팀)의 사용처가 소화조 자체 가온 이외에는 없으므로 이 효과는 포함하지 않았다. 그러므로 향후 발전 온수의 사용처가 있다면 추가적인 분석이 필요할 것이다. 음식폐기물의 수거는 지방자치단체에서 상시적으로 수행하는 업무로 LCA 결과에 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 하지만 액비 살포후의 영향은, 비록 그 영향이 크지는 않겠지만, 추후 고려될 필요성이 있을 것으로 판단된다.¹⁹⁾ 이를 비료 살포 후의 영향과 같이 비교하여 환경영향을 평가하는 것이 타당할 것이다.

퇴비화를 통한 처리와 비교

퇴비화 과정 중에는 NH₃, N₂O, CH₄ 등의 대기오염물질과 온실가스가 발생한다. 가스의 발생량과 조성은 퇴비화 과정 중 산소의 공급과 밀접한 관련이 있는데, 벧짚의 첨가, 퇴비더미 뒤집기 및 강제 통기를 통하여 산소 공급량을 늘리면 N₂O와 CH₄의 발생은 감소하지만 NH₃의 발생은 증가한다.²²⁾ 퇴비화 과정 중 온실가스 배출량은 국내에서 사용되는 퇴비화 방법과 동일한 방법으로 실험한 참고문헌을 통해 추정하였다. 돈분-톱밥(수분 60%) 퇴비화 과정 중 가스 발생량은 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.²³⁾ 이를 이용하여 혐기소화에 사용된 원료가 퇴비화될 때 발생할 수 있는 가스 배출량을 총질소 및 유기물 기준으로 추정한 값을 Table 4에 나타내었다. 이 양은 돈분뇨와 음식폐기물에서 발생하는 양만을 나타낸 것으로 수분조절제로 사용하는 톱밥에

Table 4. Estimated gas emission of 1 ton of the mixture of swine waste and food waste during the composting period of 90 days¹⁾

Gases	Unit emission ²⁾	Contents (/ton raw material)	Estimated gas emission (/ton raw material)	
NH ₃	127.4 g NH ₃ -N/kg T-N	4.74 kg T-N	604 g NH ₃ -N	733 g NH ₃
N ₂ O	46.5 g N ₂ O-N/kg T-N	4.74 kg T-N	220 g N ₂ O-N	691 g N ₂ O
CH ₄	1.9 g CH ₄ /kg OM	45.2 kg OM	85.9 g CH ₄	

¹⁾The mixture ratio of swine waste:food waste was 7:3. ²⁾The data were cited from Fukumoto et al.²³⁾

서 유래하는 것은 포함하지 않은 값이다.

바이오가스 생산에 사용된 돈분뇨/음식폐기물(7:3) 1 톤은 퇴비화 과정 중 733 g NH₃, 691 g N₂O, 85.9 g CH₄을 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 유기물 감량을 36% 적용하고,²³⁾ 메탄으로 전환된 탄소 이외의 전부가 CO₂로 전환하였다고 가정하면 32.2 kg CO₂가 대기 중으로 배출된다. 그러므로 돈분뇨/음식폐기물(OM 4.5%) 1 톤이 퇴비화 과정 중 대기 중으로 배출하는 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O) 양은 248 kg CO₂-eq.로 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-eq.를 감축할 수 있었다는 것을 고려하면 기존의 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-eq.를 감축할 수 있다는 것을 나타낸다. 우리농업의 온실가스 감축 잠재량 확충과 환경부하 경감을 위해서 퇴비화 방법보다는 바이오가스 방법의 적극적인 도입이 필요할 것이다.

결 론

돈분뇨/음식폐기물 혼합 바이오가스 생산 시설에 대한 온실가스 배출량을 전과정평가(LCA) 방법을 사용하여 분석하였다. 30%의 음식폐기물이 바이오가스 생산량에 74%를 기여하는 것으로 나타났으며, 전체적으로 돈분뇨/음식폐기물(7:3) 1 톤 처리시 52 kg CO₂-eq./ton의 온실가스가 배출 저감되는 것으로 나타났다. 하지만 동일한 원료를 퇴비화 할 경우에는 온실가스 216 kg CO₂-eq./ton을 배출하는 것으로 평가되었다. 퇴비화 방법을 바이오가스 생산 방법으로 전환함으로써 268 kg CO₂-eq./ton를 저감할 수 있을 것으로 평가되었으며, 추가적으로 환경부하 경감이라는 측면에서도 유리한 것으로 평가되었다. 음식폐기물과 같은 신선 유기물을 포함하는 폐기물의 혼용은 바이오가스 시설의 환경성과 경제성을 함께 향상 할 수 있을 것으로 기대되었는데, 국내에는 가축분뇨 이외에 도축폐기물, 식품공정폐기물 등 다양한 유기성 폐기물이 이용 가능함으로 이를 바이오가스의 원료로 적극적으로 활용하는 것이 가축분뇨의 바이오가스화에 더 유리하게 작용할 것으로 기대된다. 또한 발전 폐열의 활용처를 확보하는 것 역시 에너지 절약과 온실가스 배출 감축에 크게 기여할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2008년 농촌진흥청 농업과학기술개발 공동연구사업 '바이오에너지 이용체계 구축 연구'의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 고한중 (2007) 메탄발효처리에 의한 가축분뇨의 바이오가스 생산과 액비화 이용, *한국초지사료학회 2007년도 국제학술심포지엄*, 103-113.
2. 허병두, 김시현, 유정택, 고윤경, 양수민 (2002) 음식물/축분의 통합소화에 의한 바이오가스 이용기술 실용화, *폐기물자원화* 10 (1), 46-51.
3. Angelidaki, I. and Ellegaard, L. (2003) Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants, *Appl. Biochem. Biotech.* 109 (1), 95-105.
4. Raven, R. and Gregersen, K. H. (2007) Biogas plants in Denmark: successes and setbacks, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 11 (1), 116-132.
5. 국립환경과학원 (2007) 전국 폐기물 발생 및 처리현황, p. 740.
6. Murphy, J. D., McKeogh, E. and Kiely, G. (2004) Technical/economic/environmental analysis of biogas utilisation, *Appl. Energ.* 77 (4), 407-427.
7. Hao, X., Chang, C., Larney, F. J. and Travis, G. R. (2001) Greenhouse Gas Emissions during Cattle Feedlot Manure Composting, *J. Environ. Qual.* 30 (2), 376-389.
8. Pattey, E., Trzcinski, M. K. and Desjardins, R. L. (2005) Quantifying the Reduction of Greenhouse Gas Emissions as a Result of Composting Dairy and Beef Cattle Manure, *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 72 (2), 173-187.
9. 임승택, 안상진, 정재수 (2006) 축산분뇨의 호기성퇴비화 및 메탄화과정 전과정평가, *한국전과정평가학회* 7 (1), 19-24.
10. Berglund, M. and Borjesson, P. (2006) Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production, *Biomass Bioenerg.* 30, 254-266.
11. Finnveden, G., Johansson, J., Lind, P. and Moberg, A. (2000) *Life Cycle Assessments of Energy from Solid Waste*, Stockholms Universitet.
12. Chevalier, C. and Meunier, F. (2005) Environmental assessment of biogas co- or tri-generation units by life cycle analysis methodology, *Appl. Therm. Eng.* 25 (17-18), 3025-3041.
13. 국립환경연구원 (2004) *축산폐수 처리 통계*, 환경부, p. 112.

14. Czepiel, P., Douglas, E., Harriss, R. and Crill, P. (1996) Measurements of N₂O from Composted Organic Wastes, *Environ. Sci. Technol.* 30 (8), 2519-2525.
15. He, Y., Inamori, Y., Mizuochi, M., Kong, H., Iwami, N. and Sun, T. (2000) Measurements of N₂O and CH₄ from the aerated composting of food waste, *Sci. Total Environ.* 254 (1), 65-74.
16. 농촌진흥청 축산연구소 (2006) 가축분뇨 성분분석 실험법, p. 273.
17. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2001) *Climate Change 2001, Radiative Forcing of Climate Change, The Scientific Basis*. Cambridge University Press, UK.
18. 친환경상품진흥원 (2007) *환경성적표지인증제도 작성지침 <부표2> 영향범주별 특성화 인자*, 환경부.
19. Ishikawa, S., Hoshihara, S., Hinata, T., Hishinuma, T. and Morita, S. (2006) Evaluation of a biogas plant from life cycle assessment (LCA), *International Congress Series* 1293, 230-233.
20. Mancarella, P. and Chicco, G. (2008) Assessment of the greenhouse gas emissions from cogeneration and trigeneration systems. Part II: Analysis techniques and application cases, *Energy* 33 (3), 418-430.
21. 임동규, 박우균, 권순익 (2002) *가축분뇨 혐기소화 후 폐액활용 기술*, 농촌진흥청, p.179-223.
22. Amlinger, F., Peyr, S. and Cuhls, C. (2008) Greenhouse gas emissions from composting and mechanical biological treatment, *Waste Manage. Res.* 26 (1), 47-60.
23. Fukumoto, Y., Osada, T., Hanajima, D. and Haga, K. (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.