



[2017-9-BM-008]

음식물류 폐기물 바이오가스 플랜트의 경제성 분석

이준표¹⁾ · 박순철¹⁾ · 강 호²⁾ · 왕창근²⁾ · 현재혁^{2)*}

Economic Analysis of Food Waste Biogas Plants

Joonpyo Lee¹⁾ · Soonchul Park¹⁾ · Ho Kang²⁾ · Changkeun Wang²⁾ · Jaehyuk Hyun^{2)*}

Received 22 May 2017 Revised 19 June 2017 Accepted 20 June 2017

ABSTRACT Biogas plants using food waste and other organics as a substrate to produce biogas for energy utilization were analyzed for their economic feasibility. In the case of anaerobic digestion of food wastes alone, the economic feasibility of biogas production was quite low. Therefore, it is essential to increase the government subsidy for the construction of biogas facilities. In the case of food waste leachate, it was economically feasible without government support. Currently, approximately 30% of food waste leachate was processed in the biogas facility. The number of them are expected to increase gradually in Korea. The co-digestion of food waste leachate and livestock manure was not economically feasible, but it is expected that the number of facilities will increase as the government subsidies can compensate the loss. The co-digestion of food waste and food waste leachate will help improve the economics of food waste biogas facilities. Among the food waste and other organic treatment processes, biogas production from food waste leachate by co-digestion was found to be more feasible than the other options. Overall biogas production using food waste leachate should be encouraged continuously by government.

Key words Economic analysis(경제성분석), Biogas(바이오가스), Food waste(음식물류 폐기물), Net present value(순현재가치), Internal rate of return(내부수익률), Levelized cost of Energy(에너지 균등화 비용)

Nomenclature

B/C : Benefit/Cost
NPV : Net present value
IRR : Internal rate of return
LCOE : Levelized cost of energy

1. 서론

우리나라에서 발생하는 음식물류 폐기물은 연간 5,599천톤이 발생하고 있으며, 이중 92.7%에 해당하는 5,190천톤이 남은 음식물류 폐기물로 분리 배출되고 있다.^[1] 남은 음식물류 폐기물의 97.2%가 재활용되고 있으며, 매립은 0.9%로 낮은 수준을 보이고 있다.^[2] 환경부의 유기성 폐자원 에너지 활용시설 현황^[3]에 따르면 음식물류 폐기물의 바이오가스화 처리량은 286천톤/년으로 분석되며, 음폐수는 1,541천톤으로 분석된다. 남은 음식물류 폐기물의 발생량을 기준으로 보면 음식물류 폐기물과 음폐수의 바이오가스화 처리율은 35.1%로 산출된다. 하지만, 음식물류 폐기물

1) Korea Institute of Energy Research

2) Chungnam National University

*Corresponding author: jayhh@cnu.ac.kr

Tel: +82-42-821-6673

Fax: +82-42-822-5610

의 처리과정에서 물을 첨가하는 시설이 많아 음폐수의 바이오가스화 처리율은 이 보다 낮을 것으로 여겨진다.

우리나라의 음식물류 폐기물은 분리배출 및 수거시스템이 정착되어 있어 바이오가스화 할 경우 폐기물 감량화가 용이하며, 신재생에너지 생산과 아울러 온실가스 감축효과도 기대할 수 있다.^[4] 바이오가스의 에너지 이용은 엔진발전기에 의한 전력생산이 주류를 이루며, 보일러 연료로도 사용된다. 최근에는 바이오가스의 메탄 순도를 높이는 Upgrading 기술(Membrane, Scrubbing, PSA 등)의 발달로 도시가스 배관망 연결이나 차량연료로의 이용이 늘고 있으나,^[5-6] 아직은 미미하다.

음식물류 폐기물의 바이오가스 플랜트는 혐오시설로 인식되어 있음은 물론 운영상의 여러 가지 기술적 측면과 경제성 등의 문제로 인하여 활발한 보급에 지장을 초래하고 있다.^[7] 혐오시설로 인식되는 가장 큰 문제점은 악취를 들 수 있는데, 음식물류 폐기물의 수송차량에서 기인하는 문제는 차량의 현대화로 어느 정도 극복이 되고 있으나, 시설의 운영과정에서 발생하는 악취 제어는 운영비 상승으로 이어진다. 음식물류 폐기물의 바이오가스 시설에 대한 정확한 경제성 분석 결여로 인하여 시설 투자비에 대한 적정성에 문제가 있다는 견해도 있다.^[8]

본 연구에서는 음식물류 폐기물에 대해 실제 운영되고 있는 바이오가스 플랜트의 경제성을 분석함은 물론 전력생산관점에서 LCOE를 분석하여 정부의 음식물류 폐기물 처리 및 신재생에너지 보급정책 수립에 필요한 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 분석방법

2.1 대상시설 및 전제조건

2.1.1 대상시설

음식물류 폐기물 바이오가스 플랜트의 경제성 분석 시설은 Table 1과 같이 음식물류 폐기물과 음폐수의 단독 혐기성 소화 시설 그리고 이들과의 병합시설로 한정하여 각각 1개소를 선정하여 경제성 분석을 실시하였다.

Table 1. Case of biogas plant depending on substrates

Case	Substrate
Case 1(F)	Food waste
Case 2(F · M)	Food waste + Manure
Case 3(F · S)	Food waste + Sewage sludge
Case 4(L)	Food waste leachate
Case 5(L · M)	Food waste leachate + Manure
Case 6(L · S)	Food waste leachate + Sewage sludge

2.1.2 전제조건

자본비용에 있어 건설기간에 따른 투자비의 배분은 하지 않고 일시에 모두 투자되는 것으로 간주하여 시설의 건설기간을 1년으로 하였고, 시설의 운영기간은 20년으로 설정하였다. 일반적인 기계장비의 내구연수는 7~10년이지만 시설현황조사 시 이러한 자본비용에 대해 정확한 조사가 불가능하여 내구연수를 모두 20년으로 동일하게 설정하였다. 과거에 건설된 시설은 건설비를 현재가치로 환산하여 적용하였다. 자본비용 투자에 따른 건설과정에서 부과되는 각종 세금의 경우 정부사업에 대해서는 정부가 회수하는 만큼 투자비로 간주하지 않으나 본 분석에서는 세금에 대한 불명확성 등으로 모두 투자비에 포함하였다.^[9] 부지비용의 경우 정부사업에 대해서는 사업완료 후 부지가 그대로 남기 때문에 포함하지 않지만, 민간사업에 대해서는 부지의 사업기간 동안의 임대비용을 포함하여야 한다. 그러나 본 분석에서는 시설 위치에 따른 부지비용의 차이도 있고 음식물류 폐기물 바이오가스 시설이 대부분 정부사업으로 이루어지고 있으므로 부지비용을 고려하지 않았다.

사업이 완료된 이후 사업지에 대한 원상복구 비용은 바이오가스 시설이 플랜트 시설인 만큼 고철 등의 판매에 따른 비용으로 대체가 가능하다는 전제하에 사업 청산비용은 없는 것으로 하였다.

시설에서 발생된 바이오가스는 자체 이용, 전력생산, 가스판매, 수송연료 등으로 다양하게 이용하고 있으며, 단순 소각 처리하는 시설도 있어 여기서는 생산된 바이오가스의 이용이 불명확하거나 저조한 시설은 자체 시설 이용률인 26.8%(음식물과 음폐수 단독시설 기준)^[10]를 제외한 나머지를 열량기준으로 도시가스 요금인 650원/Nm³(서울특별시 일반용 평균요금)을 적용^[11]하여 수익을 산출하였다. 또

한 LCOE 분석에 있어서는 에너지 생산량에 대해 바이오가스 생산량 중 26.8%를 자체사용량으로 간주하고 나머지의 바이오가스를 열량으로 환산하여 분석을 실시하였다.

경제성 분석의 중요한 요소 중 하나인 이자율(사회적 할인율)은 우리나라가 고성장에서 저성장 기조로 바뀌면서 계속하여 낮아지고 있으며, 정부사업에 대해 가장 최근의 지침으로 발표된 5.5%를 적용하였다.^[9] 민간시설 사업으로 진행된 음폐수와 가축분뇨의 바이오가스 시설에 대해서도 정부 보증 용자부분이 있지만 이 역시 동일한 할인율을 적용하였다.

2.2 경제성 분석방법

음식물류 폐기물 바이오가스 플랜트의 경제성분석은 일반적으로 널리 이용되는 편익/비용분석, 순현재가치분석, 내부수익률분석과 에너지 균등화 비용분석법을 이용하였다.

편익/비용분석(Benefit/cost ratio)을 간단하게 살펴보면 식 (1)과 같이 사업기간동안의 총 비용과 총 수익을 현재 가치(Present value)로 환산하여 이들의 비율로 사업 타당성을 분석하는 방법으로 1 또는 1 보다 큰 값이 나오면 타당성이 있음을 의미한다.

$$B/C = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}} \quad (1)$$

여기서, B/C : 편익/비용 비율

B_t : t년에서의 수익

C_t : t년에서의 비용

r : 할인율

n : 내구연수

음식물류 폐기물의 바이오가스 플랜트에서 총 비용에 해당하는 항목은 건설비, 운영비(인건비, 유지비, 폐기물처리비, 공과금 등) 그리고 잔존가치(원상복구 비용이 들어가는 경우)가 있으며, 총 수익에 해당하는 항목은 폐기물 반입 처리비, 전력판매비, 열 판매비, 가스 판매비, REC 판매비, 액비 살포 지원금 등이 해당된다.

순현재가치(NPV, Net present value)는 사업에 수반된 모든 비용과 편익을 현재가치로 환산하여 총 편익에서 총 비용을 감한 값으로, 0 또는 양(+)의 값이 되면 경제성이 있고 음(-)의 값이 되면 경제성이 없음을 의미한다. 순현재가치의 산출방법은 식 (2)와 같다.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (2)$$

내부수익률(IRR, Internal rate of return) 분석법은 순현재가치(Net present value)가 0 또는 편익비용분석에서 B/C 비율이 1이 되도록 할 때 계산되는 할인율(r)을 구하여 몇 %의 이익이 발생하는가를 분석하는 방법이다. 내부수익률은 기존의 할인율보다 커야 사업의 타당성이 인정되며, 산출방법은 식 (3)과 같다.

$$IRR : \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (3)$$

에너지 균등화 비용(LCOE, Levelized cost of electricity generation) 분석은 전력 생산단가를 말하는데, 여기서는 Electricity generation을 Energy로 변경하였으므로 단위 에너지 생산비용을 나타내게 된다. LCOE 분석은 여러 가지 에너지 생산방법에 대한 객관적인 비교검토가 가능한 방법이다. LCOE의 기본적인 산출방법은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (4)$$

여기서, $LCOE$: 평균 에너지 생산 비용

I_t : t년에서 투자비용

M_t : t년에서 운전/유지관리비용

F_t : t년에서 연료사용 비용

E_t : t년에서 에너지 생산량

3. 연구결과 및 고찰

3.1 바이오가스 플랜트 현황

음식물류 폐기물 단독 바이오가스 시설(Case 1) 규모는 일일 300톤을 처리할 수 있으며, 건설비는 720억원으로 중앙정부가 33%를 지원하였다. 시설 운영비는 연간 약 37억원이 소요되었으며, 인건비가 23%, 수선유지비 2.2%, 수도광열비 2.4%, 재료비 29.5%, 폐기물 처리비 등이 43%로 구분되었다. 수익은 음식물류 폐기물 반입/처리비로 연간 약 46억원으로 산출하였는데, 공공처리시설이기 때문에 별도의 반입/처리비가 책정되지 않으나 여기서는 경제성 분석을 위하여 80,000원/톤을 적용하여 산출하였다. 음식물류 폐기물의 위탁처리 시설에서 처리하는 비용은 80,000~100,000원/톤, 공공처리시설의 경우 최소한의 운영비로 책정되는데 40,000~50,000원/톤으로 조사되었다. 바이오가스 수익은 연간 약 18억원이며, 이는 동 시설의 경우 바이오가스를 Upgrading 하여 차량연료로 활용하는 시설이지만 시설가동 초기여서 활용률이 높지 않고 가격 결정이 되지 않아 시설의 자체 이용량을 제외하고 도시가스 요금으로 환산하여 적용하였다.

음식물류 폐기물과 가축분뇨의 병합 바이오가스 시설(Case 2) 규모는 음식물류 폐기물 100톤과 가축분뇨 50톤

등 일일 150톤을 처리할 수 있으며, 건설비는 230억원으로 국비가 70% 지원되었다. 시설 운영비는 연간 약 18억원이 소요되었으며, 인건비가 41%, 수선유지비 19%, 수도광열비 26%, 재료비 13%, 기타 0.4%로 구분되었다. 수익은 음식물류 폐기물 반입/처리비로 연간 약 26억원으로 산출하였는데, 음식물류 폐기물은 80,000원/톤, 가축분뇨는 20,000원/톤을 적용하여 산출하였다. 바이오가스 수익은 연간 약 4.5억원이며, 동 시설에서는 바이오가스 중 일부를 사용하여 스팀을 산업시설에 판매하고 있으나 활용률이 낮아 자체 이용량을 제외한 나머지를 도시가스 요금으로 환산하여 적용하였다.

음식물류 폐기물과 하수슬러지의 병합 바이오가스 시설(Case 3) 규모는 음식물류 폐기물 220톤과 하수슬러지 210톤 등 일일 430톤을 처리할 수 있으며, 건설비는 243억원으로 86%의 민간자본이 투입되었다. 기존의 공공시설에 민간자본으로 시설을 확충하였다. 시설 운영비는 연간 약 37억원이 소요되었으며, 인건비가 34%, 수선유지비 11%, 수도광열비 30%, 재료비 6%, 기타 18%로 구분되었다. 수익은 음식물류 폐기물 반입/처리비로 연간 약 73억원으로 산출하였는데, 음식물류 폐기물은 80,000원/톤, 하수슬러지는 가축분뇨와 동일하게 20,000원/톤을 적용하여 산출하였다. 바이오가스 수익은 연간 약 34억원이며, 동 시설에

Table 2. Status of food waste biogas plants

Parameter		Case 1 (F)	Case 2 (F·M)	Case 3 (F·S)	Case 4 (L)	Case 5 (L·M)	Case 6 (L·S)
Construction cost (10 ³ won)	Central government grants	24,000,000	16,135,000	1,004,000	13,287,000	2,100,000	-
	Local government grants	48,000,000	6,915,000	2,345,000	31,003,000	2,100,000	-
	Private investment	-	-	21,000,000	-	3,496,000	-
	Total	72,000,000	23,050,000	24,349,000	44,290,000	7,696,000	1,719,000
Operation cost (10 ³ won)	Labor cost	845,662	758,712	1,278,771	687,399	279,361	485,933
	Repair maintenance cost	81,414	358,923	411,291	186,165	347,201	133,836
	Utilities	87,442	483,785	1,138,397	215,330	147,063	305,944
	Material cost	1,085,896	240,507	227,943	1,533,811	13,195	573,168
	Others	1,585,772	6,985	687,181	362,284	888,435	379,050
	Total	3,686,186	1,848,912	3,743,583	2,984,989	1,396,444	1,845,931
Benefit (10 ³ won)	Waste import / disposal cost	4,640,720	2,137,400	7,340,840	6,268,200	1,349,125	2,850,000
	Biogas of benefit	1,759,295	447,571	3,366,119	3,022,109	329,969	1,335,410
	Others	-	-	-	-	298,566	-
	Total	6,400,015	2,584,971	10,706,959	9,290,309	1,977,660	4,185,410

서는 자체 사용량을 제외한 전량을 산업시설에 판매하고 있다.

음폐수 바이오가스 시설(Case 4) 규모는 일일 500톤을 처리할 수 있으며, 건설비는 443억원으로 30%의 국비와 70%의 지방비가 투입되었다. 시설 운영비는 연간 약 30억원이 소요되었으며, 인건비가 23%, 수선유지비 6%, 수도광열비 7%, 재료비 51%, 기타 12%로 구분되었다. 수익은 음식물류 폐기물 반입/처리비로 연간 약 63억원으로 산출하였는데, 동 시설은 공공처리시설로서 별도의 반입/처리비가 책정되어 있지 않아 여기서는 50,000원/톤을 적용하여 산출하였다. 음폐수의 위탁처리 시설에서 처리하는 비용은 50,000~70,000원/톤, 공공처리시설에서는 21,000~26,000원/톤으로 최소한의 운영비용만 책정되는 것으로 조사되었다. 바이오가스 수익은 연간 약 30억원이며, 동 시설에서는 자체 사용량을 제외한 전량을 단순 소각처리하고 있어 이를 도시가스요금으로 환산하여 적용하였다.

음폐수와 가축분뇨의 병합 바이오가스 시설(Case 5) 규모는 가축분뇨 70톤과 음폐수 30톤 등 일일 100톤 처리할 수 있으며, 건설비는 77억원으로 국비와 지방비에서 55%를 지원하였다. 시설 운영비는 연간 약 14억원이 소요되었으며, 인건비가 20%, 수선유지비 25%, 수도광열비 11%, 재료비 1%, 차량운송비 등 기타 64%로 구분되었다. 수익은 폐기물 반입/처리비로 연간 약 20억원으로 산출하였는데, 음폐수가 50,000원/톤, 가축분뇨는 25,000원/톤을 적용하여 산출하였다. 바이오가스 수익은 연간 약 3.3억원이며, 동 시설에서는 바이오가스를 전량 전력생산에 이용하여 3,091MWh를 생산, 전력거래소에서 판매하였다. 기타 수익은 전력생산을 통해 얻은 REC로 2015년 12월의 비태양광 평균 REC 거래금액 96,592원/MWh^[11]를 기준으로 산출하였다.

음폐수와 하수슬러지의 병합 바이오가스 시설(Case 6)

규모는 기존의 하수처리장 소화조에 음폐수 190톤/일을 추가 처리하는 개념이다. 건설비는 저장조와 이송시설을 추가하는 것으로 17.2억원이 소요되는 것으로 추정하였다. 시설 운영비는 연간 약 18억원이 소요되는 것으로 나타났으며, 인건비가 26%, 수선유지비 7%, 수도광열비 17%, 재료비 31%, 폐기물 처리비 등 기타 21%로 추산되었다. 수익은 음폐수 반입/처리비로 연간 약 28.5억원으로 산출하였는데, 실제로는 26,000원/톤으로 공공처리시설로서 최소한의 운영비용을 받고 있으나, 여기서는 민간처리시설의 최소 처리비용인 50,000원/톤으로 산출하였다. 바이오가스 수익은 연간 약 13억원으로 바이오가스의 자체 이용량을 제외하고 도시가스요금으로 환산하여 적용하였다. 음폐수의 메탄가스 생산량은 음폐수 바이오가스 시설의 평균 생산량인 43.74Nm³/톤을 적용하였다.^[10]

3.2 경제성 분석결과 및 고찰

편익/비용 분석과 순현재가치 분석 및 내부수익률에 대한 분석결과를 Table 3에 나타내었다.

편익 및 비용에 대한 순현재가치로부터 편익/비용 분석 결과 Case 1(F)과 Case 2(F·M)는 각각 0.637과 0.582으로 경제성이 많이 결여되는 것으로 나타났으며, Case 5(L·M)는 0.963으로 경제성이 조금 결여되었다. 반면 Case 3(F·S)과 Case 6(L·S)은 낮은 건설비로 인하여 각각 1.852, 2.103으로 경제성이 우수한 결과를 보였다. Case 4(L) 역시 1.347로 경제성이 좋은 것으로 평가되었다.

한편, 경제성이 떨어지는 Case 1(F)과 Case 2(F·M) 및 Case 5(L·M)에 지방정부 혹은 사업자 입장을 고려하여 건설비에서 국비의 지원금을 경제성 분석에 산입하지 않는 경우에 대해 편익/비용을 재분석하였다. Case 1(F)과 Case 2(F·M)는 각각 0.805, 0.988로 여전히 경제성이 결여되었으나, Case 5(L·M)는 1.031로 경제성이 있는 것으로 분석

Table 3. Results of economic analysis

Parameter	Case 1 (F)	Case 2 (F·M)	Case 3 (F·S)	Case 4 (L)	Case 5 (L·M)	Case 6 (L·S)
Benefit (10 ³ won)	76,482,675	30,891,412	127,952,336	111,022,816	23,633,808	50,017,282
Cost (10 ³ won)	120,011,360	53,121,219	69,086,277	82,396,783	25,254,050	23,778,595
B/C ratio	0.637	0.582	1.852	1.347	0.936	2.103
NPV (10 ⁶ won)	-43,529	-22,230	58,866	28,626	-1,620	26,239
IRR (%)	-8.06	-11.13	21.71	6.28	-2.27	123.79

되었다.

순현재가치에 대한 분석결과 Case 1(F)과 Case 2(F·M) 및 Case 5(L·M)는 사업기간동안 각각 435억원, 222억원, 16억원의 손실을 보게 되며, 반면 Case 3(F·S)과 Case 4(L) 및 Case 6(L·S)은 사업기간동안 각각 589억원, 286억원, 262억원의 이익을 보는 것으로 나타났다. 손실을 보게 되는 Case 1(F)과 Case 2(F·M) 및 Case 5(L·M)에 대해 국비의 지원금을 산입하지 않는 경우에 대해 NPV를 재 분석하였다. 그 결과 Case 1(F)의 경우 사업기간동안 185억원의 손실이 발생하며, Case 2(F·M)도 4억원의 손실이 발생하여 여전히 경제성이 결여되는 것으로 나타났다. Case 5(L·M)는 7억원의 수익이 발생하여 경제성이 있는 것으로 분석되었다.

내부수익률에 대한 분석결과 Case 1(F)과 Case 2(F·M), Case 5(L·M)는 각각 -8.06%, -11.13%, -2.27%를 나타내어 음(-)의 수익률을 나타내었으며, Case 3(F·S)과 Case 4(L)는 각각 21.71%, 6.28%를 보여 기준 할인율보다 높았으며, Case 6(L·S)은 124%로 매우 높았다. 경제성이 부족한 Case 1(F)과 Case 2(F·M) 및 Case 5(L·M)에 대해 국비의 지원금을 산입하지 않는 경우에 대해 내부수익률을 재 분석하였다. 그 결과 Case 1(F)과 Case 2(F·M)는 각각 -4.56%, -0.64%로 경제성이 결여되며, Case 5(L·M)는 1.28%로 (+)의 값을 나타내지만 기준 할인율보다 낮았다. 그러나 Case 5(L·M)는 민간시설로써 국비는 물론 지방비 지원금을 제외하고 내부수익률을 분석하면 7.89%로 기준 할인율보다 높아 경제성이 있는 것으로 분석되었다.

Case 3(F·S)은 기존 시설의 직접사용 및 개보수로 인하여 건설비가 상대적으로 적기 때문에 경제성이 우수한 것으로 나타났다. Case 6(L·S) 역시 그러한 영향으로 경제성이 좋았으며, 특히 내부수익률은 시설투자비가 적기 때문에 124%로 나타나 1년 내에 투자비 회수가 가능한 결과를 보였다. 그러나 현재 하수처리장에서 음식물 혹은 음폐수

의 기존 소화조 이용 처리는 포화상태에 이르렀다.

음식물류 폐기물을 단독으로 혐기성 소화를 하는 경우 경제성이 매우 낮은 것으로 나타나고 있으며, 지방정부 혹은 민간에서 경제성을 갖기 위해서는 중앙정부의 건설비 지원금 혹은 운영비 지원을 확대해야 하며, 그렇게 되면 35% 정도^[1,10]에 머물고 있는 음식물류 폐기물의 바이오가스 시설이 증가할 것으로 예상된다. 음식물류 폐기물과 가축분뇨의 병합시설은 이번 연구에서 경제성 분석이 이루어진 시설이 우리나라에 유일하며, 음식물 단독소화에 비해 내부수익률이 더 나쁘게 나타나 정부지원이 더 필요할 것으로 여겨진다.

음폐수의 경우에는 정부의 지원이 없이도 경제성이 우수한 것으로 나타났으며, 현재에도 음폐수의 30% 정도^[1,10]가 바이오가스화 되고 있고 점차 시설이 늘어날 것으로 예상된다. 음폐수와 가축분뇨의 병합처리시설은 경제성이 떨어지기는 하지만 정부의 지원금으로 경제성을 갖추게 되는 만큼 시설보급은 확대될 것으로 예상된다.

음식물류 폐기물의 처리주체가 지방자치단체이므로 경제성이 결여되는 음식물류 폐기물과 경제성이 있는 음폐수를 통합하여 바이오가스화를 하게 되면 음식물류 폐기물의 경제성 개선에 도움을 줄 수 있으므로 지방자치단체의 음식물류 폐기물 처리에 있어 하나의 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

LCOE 분석결과는 Table 4에 나타내었다. 에너지 kWh 당 생산단가가 Case 6(L·S)이 -35원, Case 3(F·S)은 -32원, Case 4(L)는 14원, Case 5(L·M)는 92원, Case 1(F)은 165원 그리고 Case 2(F·S)는 260원 순으로 낮게 나타났다. 에너지 생산단가가 가장 낮은 Case 6(L·S)과 Case 3(F·S)의 경우 음(-)의 값을 보였는데, 이는 사업기간동안 운영수익(폐기물 반입/처리비)의 현재가치가 비용의 현재 가치보다 높기 때문이다. 에너지 생산단가를 35%의 발전 효율^[13]과 REC(96,592원/MWh)^[11]를 편익으로 가정하여 전력생산단가(kW_eh)로 환산하면 Case 1(F)이 375원, Case

Table 4. Results of LCOE analysis

Parameter	Case 1 (F)	Case 2 (F·M)	Case 3 (F·S)	Case 4 (L)	Case 5 (L·M)	Case 6 (L·S)
Cost (10 ³ won)	64,552,946	27,578,456	-18,646,591	7,489,480	9,131,481	-10,280,016
Energy (kWh)	391,148,944	106,179,717	583,666,429	526,495,608	99,050,903	296,905,396
LCOE (won/kWh)	165	260	-32	14	92	-35
LCOE (won/kW _e h)	375	646	-188	56	160	-131

2(F·S)가 646원, Case 3(F·S)이 -188원, Case 4(L)가 56원, Case 5(L·M)가 160원, Case 6(L·S)이 -131원으로 나타나는데, 전력생산 측면에서 고려하면 Case 3(F·S), Case 4(L) 그리고 Case 6(L·S)에서 경제성을 갖는 것으로 볼 수 있다. LCOE 결과가 높게 나타난 Case 1(F)과 Case 2(F·M) 및 Case 5(L·M)에 대해 국비의 지원금을 산입하지 않는 경우에 대해 LCOE를 재분석하였다. 그 결과 Case 1(F)의 경우 에너지 생산단가(kWh)는 100원, Case 2(F·M)는 55원, Case 5(L·M)는 69원으로 나타났으며, 전력생산단가(kWh)로 환산하면 Case 1(F)이 189원, Case 2(F·M)는 61원, Case 5(L·M)는 93원으로 분석되었다. Case 2(F·M)와 Case 5(L·M)는 전력생산단가 면에서 경쟁력을 갖게 된다.

국내 바이오가스 시설에 대한 LCOE 분석결과는 전무하며, IRENA^[14]는 영국의 바이오가스 시설에 대한 분석결과 0.06~0.15\$ kWh로 보고하였으며, DECC^[15]는 0.154\$ kWh로, Laith et al.,^[16]은 0.14\$ kWh로 보고하였다. Nixon^[17]은 OFMSW(Organic fraction of municipal solid waste)로 84톤/일 규모의 바이오가스 시설에 대한 LCOE 분석결과 0.139\$(167원) kWh로 보고한 바 있다. 따라서 바이오가스 플랜트의 전력생산단가는 72~180원(환율 1,200원 적용)으로 볼 수 있다. 우리나라의 음식물류 폐기물보다 경제적이지만, 음폐수 보다는 경제성이 낮다고 할 수 있다.

한편, 인도의 바이오매스 발전소 LCOE는 0.04\$(48원)/kWh^[14]로 경제성이 있는 것으로 보고되었으며, 국내의 바이오매스는 126원/kWh^[18], 또 다른 연구자는 73원/kWh^[19]로 분석하였다. 김신영 등^[20]은 태양광 발전의 경우 0.6~0.63\$(720~756원)/kWh로 보고하였으며, 육상풍력 115~161원/kWh, 해상풍력 208~242원/kWh로 분석되었다^[18]. 위와 같이 연구자들의 보고 자료와 비교하면 음식물류 폐기물 중 음폐수의 바이오가스화는

태양광, 풍력 등 다른 신재생에너지원에 비해 경제성이 있는 것으로 여겨진다.

4. 결론

지금까지 여러 가지 방법에 의해 음식물류 폐기물의 기

질별 혐기성 소화 시설에 대한 경제성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 음식물류 폐기물을 단독으로 혐기성 소화를 하는 경우 경제성이 매우 낮은 것으로 나타나, 바이오가스화 시설 확대를 위해서는 중앙정부의 건설비 지원금 혹은 운영비 지원을 확대할 필요성이 있다고 판단되며, 음식물류 폐기물과 가축분뇨의 병합시설은 음식물류 폐기물 단독소화에 비해 내부수익률이 더 나쁘게 나타나 정부지원이 더 많이 필요할 것으로 여겨진다.
- 2) 음폐수의 경우에는 정부의 지원이 없어도 경제성이 우수한 것으로 나타났으며, 현재에도 음폐수의 30% 정도가 바이오가스화 되고 있고 점차 시설이 늘어날 것으로 예상되며, 음폐수와 가축분뇨의 병합처리시설은 경제성이 떨어지기는 하지만 정부의 지원금으로 경제성을 갖추고 있는 만큼 정부의 꾸준한 지원정책이 요구된다.
- 3) 음식물류 폐기물의 처리주체가 지방자치단체이므로 경제성이 결여되는 음식물류 폐기물과 경제성이 있는 음폐수를 통합하여 바이오가스화를 하게 되면 음식물류 폐기물의 경제성 개선에 도움을 줄 수 있으므로 지방자치단체의 음식물류 폐기물 처리에 있어 하나의 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) 전력생산 측면에서 보게 되면 음폐수 혹은 음폐수와 하수슬러지 병합소화에서 충분한 경쟁력을 가지는 것으로 나타났으며, 음식물류 폐기물 중 음폐수의 바이오가스화는 다른 신재생에너지원에 비해 경제성이 있는 것으로 나타나므로 정부의 우선 보급정책이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(20143010071570)과 대전녹색환경지원센터의 2016년도 연구개발사업 지원에 의해 이루어진 것이며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] Ministry of Environment, 2016, “2015 The nations of waste occurrence & treatment status”.
- [2] Ministry of Environment, 2016, “2016 White paper of environment”.
- [3] Ministry of Environment, 2015, “2014 Organic waste into energy utilization facilities”, 2015. 9.
- [4] Heo, N. H., An, Y. S., and Ha, H. W., 2015, “Case study for biogas upgrading using methane separation technology”, The Korean Society of New & Renewable Energy, proceeding, p.156.
- [5] Svensson, M., 2015, “Country report Sweden”, IEA Bioenergy Task 37.
- [6] Leibniz, B. L., 2015, “Country report, Germany”, IEA Bioenergy Task 37.
- [7] Ministry of Environment, 2015, “Food waste reduction policy direction”, Journal of the Korea Organic Resource Recycling Association, Proceeding, pp.1-14.
- [8] Hong, Y. P., Kim, U. Y., and Shin, H. G., 2016, “Study on the public food waste recycling facility operation(II) - Focusing on Improvement plan”, Journal of the Korea Organic Resource Recycling Association, 24(1), pp.51-57.
- [9] Lee, J. K. and Kim, S. Y., 2013, “General guidelines for carrying out preliminary feasibility studies for public enterprises and semi-governmental organizations”, Korea Development Institute.
- [10] Ministry of Environment, 2016, “Food waste disposal facility installation and operation status”.
- [11] Korea Power Exchange, 2017, “Non-PV REC average trading price, Dec. 2015”, Home page access, <http://rec.kpx.info/index.jsp>(2017. 1. 5).
- [12] City Gas Association, 2016, “General price of Seoul city gas”.
- [13] Lee, J. P. and Park, S. C., 2016, “Estimation of Geographical & Technical Potential for Biomass Resources”, New & Renewable Energy, 12(S2), pp.53-58.
- [14] IRENA, 2015, “Renewable power generation cost in 2014”.
- [15] DECC, 2012, “Electricity generation cost”.
- [16] Laith, L. A. and Mohamed, M. O., 2017, “A financial feasibility model of gasification and anaerobic digestion waste-to-energy(WTE) plants in Saudi Arabia”, Waste management, 59, pp. 90-101.
- [17] Nixon, J. D., 2016, “Designing and optimizing anaerobic digestion system: A multi-objective non-linear goal programming approach”, Energy, 113, pp. 814-822.
- [18] Lee, C. H., Cho, J. H., and Yun, J. H., 2014, “LCOE and potentials of renewable energy in Korea”, Korea Environmental Institute.
- [19] Nam, T. S., Lee, K. Y., and Kim, K. N., 2016, “A study on the incentive-based strategies for utilization of thermoelectric power plant hot waste water: Focusing on the analysis of levelized cost of energy(LCOE)”, Journal of Energy Engineering, 25(1), pp.29-42.
- [20] Kim, S. Y., Lee, H. J., Yun, C. Y., Kang, Y. H., and Jo, D. K., 2013, “A comparison of the levelized cost of electricity(LCOE) between concentrated solar power and photovoltaic power with the system advisor model(SAM)”, The Korean Solar Energy Society, Proceeding 33(2), 165-167.