

에너지수지를 고려한 혐기성소화시설의 운영방안

Operational Strategy of Anaerobic Digesters Considering Energy Balance

홍성구*[†] · 권순국**

Seong Gu Hong*[†] · Soon-kuk Kwun**

Abstract

Anaerobic digestion system is getting more attractive in that it produces biogas in the process of organic waste stabilization. Net energy production is important when biogas production is concerned. In this study, net energy production was evaluated with respect to biogas production and heat losses in a hypothetical digester. Under the condition of digester operation with slurry inflow of 5% of TS, additional fuel is required to maintain digester temperature during the winter season. Substrate therefore, needs to have higher VS contents through co-digestion of silage or food waste that has greater values of methane production rate. Heating input slurry is important in cold season, which covers over 80% of heating requirement. Heat recovery from digestate is valuable to reduce the use of biogas for heating. It seems desirable to minimize slurry inflow when temperature is very low. Psychrophilic digestion may be a feasible option for reducing heating requirement.

Keywords : Anaerobic digestion, Substrate, Energy balance, Net energy Production

1. 서 론

유가상승에 대한 우려가 높아지고 온실가스 배출량 감축에 대한 논의가 진행되면서 신재생에너지에 대한 관심 또한 크게 증가하였다. 특히 재생에너지원으로서 바이오에너지는 화석연료와는 달리 특정 지역에 집중되어 있지 않고 널리 분포하므로 대부분의 국가에서 활용 잠재력이 높은 것으로 평가되고 있다.

바이오에너지는 동식물계 바이오매스를 이용하여 얻어지는 열 또는 에너지와 에탄올 및 바이오디젤 등의 바이오연료가 대표적이다. 바이오 연료로서 에탄올과 바이오디젤은 관련 국가의 산업에 크게 영향을 미치게 되었다. 에탄올 생산으로 인해 미국 중서부 옥수수 재배지역에서는 농가 소득이 증가하고 농지가 격이 상승하였으며, 인도네시아는 바이오디젤의 원료가 되는 팜유 생산을 위해 산림을 대규모로 팜 재배지로 전환해왔다.

음식물쓰레기나 축산분뇨와 같은 유기성폐기물을 처리하는 방법으로서 혐기성 소화공정은 부산물로서 메탄이 주성분인 바이오가스를 부수적으로 얻을 수 있기 때문에 여러 국가에서 도입하는 사례가 크게 증가하고 있다. 독일에서는 독일정부의 재생에너지에 대한 제도적인 지원으로 바이오가스 생산에 주력하는

* 한경대학교 지역자원시스템공학과

** 한국과학기술원

[†] Corresponding author. Tel.: +82-31-670-5134

Fax: +82-31-674-4119

E-mail address: bb9@hknu.ac.kr

2008년 5월 14일 투고

2008년 7월 15일 심사완료

2008년 7월 21일 게재확정

농가의 수가 늘고 있는 실정이다. 우리나라에서도 독일의 혐기성 소화시설 전문기업이 참여하는 바이오가스시설이 여러 기관의 참여로 추진되기 시작하였다(윤진섭, 2007).

바이오가스 생산 및 이용에 대한 연구는 지난 1970년대 석유파동으로 인해 본격적으로 시작되었다가, 석유가격의 지속적인 안정세로 인해 크게 관심을 갖지 못하였다. 그러나 최근 지구온난화에 대한 우려와 전례 없는 석유가격의 상승으로 인해 다시 관심과 투자의 대상으로 부각되었다. 한편 과거에 이루어졌던 연구 성과가 연속되지 않고, 또한 그 연구 결과가 공유되지 못하면 시행착오가 반복될 수 있다.

최근 이루어지고 있는 바이오가스 연구는 연료전지의 연계를 통한 적용성(GBSG, 2000)평가, 혐기성소화조 시설규모의 최적화(Ghafoori and Flynn, 2007), 안정적인 소화과정을 위한 반응공정의 제어 등 다양한 분야에서 이루어지고 있다. 그러나 지금까지 국내에서는 혐기성소화시설을 제한적으로 도입해왔으나 성공적인 사례가 드물다. 그 원인으로는 운영상의 미숙, 소화대상 폐기물의 이화학적 조건, 동절기 기온저하, 시설설치 목적의 불분명 등을 꼽을 수 있다. 과거 1970년대 혐기성 소화시설의 도입 실패 원인 중의 하나로 시설의 설치 목적을 바이오가스 생산에만 국한했다는 것이다. 유기성 폐기물의 처분을 위한 방안의 하나로서 인식되고 바이오가스를 부수적으로 얻을 수 있는 공정으로 수용하는 것이 요구된다. 그러나 최근 유가 상승으로 인해 과거와 같이 재생에너지로서 바이오가스 생산만을 기대한다면 다시 실패할 가능성이 높다. 혐기성소화시설의 도입 실패 원인 중 또 다른 것으로 동절기 기온 저하로 인한 기능 상실이 있다(농업과학기술원, 2002). 동절기에는 소화조 운영을 위한 적정 온도를 유지하기 위해서 가온을 위한 열에너지가 요구된다. 이 문제는 소화조의 열손실을 최소화하기 위한 단열이나 내부 가온으로 해결되기 어렵다.

Ghosh(1981)는 혐기성소화조에서 에너지 생산과 소비에 대해서 해석과 에너지 순생산을 최대화하기 위한 공정을 제시한 바 있다. 여기에서 고형물의 농도가 증가함에 따라서 가온에 필요한 에너지 요구량

이 줄어들고, 유기물 부하량이 증가함에 따라서 소화조에서 일어나는 열손실은 줄어드는 것을 확인하였다. Srivastava(1987)는 에너지 순생산에 대한 연구를 통해서 소화액 중의 휘발성고형물(VS), 유기물 부하율 등에 따른 에너지 순생산률을 비교 제시한 바 있다. 그의 결과에 의하면 중온소화조건에서 총고형물(TS) 15%, VS 부하율 8.0kg-VS/m³ 조건에서 평균기온은 15℃인 경우 소화액 혼합과 펌핑, 그리고 가온 등에 요구되는 에너지 요구량은 생산량의 15% 미만인 것으로 추정하였다. 반면에 유기물 부하율이 낮고 TS 농도가 낮은 경우에는 바이오가스 생산에 의한 에너지 생산량보다 많은 에너지가 소비될 수 있음을 언급하였다.

본 연구에서는 혐기성 소화시설을 가동하는데 있어서, 연간 기온변화에 따른 소화조의 열손실과 소화조 내에서 적정온도를 유지하는데 요구되는 열량 등을 분석하고, 바이오가스 생산에 의한 에너지 순생산량을 평가하여 효과적인 운영방안을 제시하였다. 정미 또는 순 생산량은 바이오가스가 가지는 총에너지에서 소화조 시설 가동에 필요한 에너지를 제한 것으로서 바이오가스에 의한 에너지생산을 계획할 때 고려해야 할 중요한 요소이다.

II. 연구 방법

1. 방법 및 기본 가정

혐기성 소화조에서 열수지를 고려하여 에너지 순생산량을 산정하기 위해서는, 연중 기온변화에 따른 소화조에서의 열손실량, 소화조에 투입되는 유기성폐기물을 소화조 운전온도로 조정하는데 요구되는 열량이 계산되어야 한다. 유기성폐기물을 펌핑하거나 소화조 내에서의 혼합 등에 요구되는 에너지는 기온 변화에 거의 영향을 받지 않으므로 일정 수준으로 가정하였다. 월평균 또는 연평균 기온은 소화조의 열손실량이나 가온에 필요한 열량을 산정하는데 충분한 정보를 제공하지 못한다. 본 연구에서는 일평균 기온을 이용하여 연중 소화조의 운전온도를 계산하였다. 기온자료는 경기도 이천시 평년기온을 이용하였다. 에

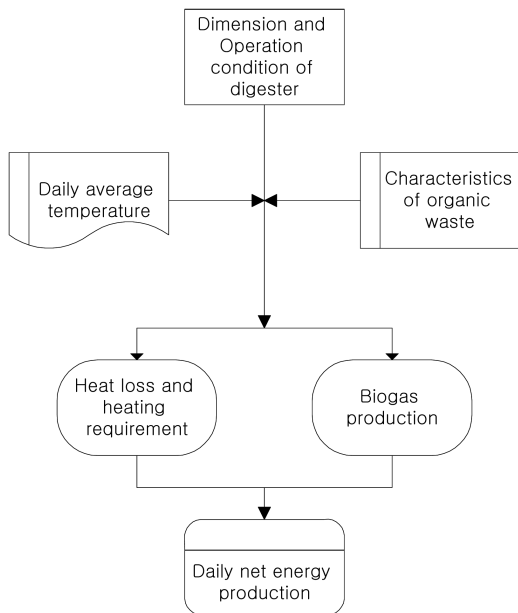


Fig. 1 Procedure for the assessment of net energy production in digester

너지 정미 생산량 분석을 위한 과정은 Fig. 1에 나타내었다.

소화조의 바닥이나 지붕, 그리고 벽면에서 발생하는 열손실량은 소화조의 제원에 의해 결정되며, 단열재의 두께에 의하여 제어가 가능하다. 소화조는 높이 6m, 직경 5m의 원통형으로, 지붕과 바닥은 15° 경사를 가지는 것으로 가정하였다. 바이오가스를 이용하여 소화조를 가온하는데 70%의 종합적인 열효율을 갖는 것으로 가정하였다. 소화조 및 단열재의 재질과 열적 특성은 Table 1에 제시된 바와 같다. 소화조에서의 열손실량은 열전도도, 비열, 밀도 등 유기성폐기물의 물리적 특성에 의해서도 영향을 받는다. 이와 같은 변수 또한 Table 1에 정리하였다.

유기성폐기물 중 음식물쓰레기는 VS(Volatile solids)가 높고 VS 단위중량당 메탄생산량 또한 상대적으로 높은 것으로 알려져 있다(허남효, 2004). 일반적으로 화학양론적 계산에 의하여 유기물로부터 얻어지는 메탄생산량을 계산할 수 있다. 허남효(2004)에 의하면 음식물쓰레기에 대하여 원소분석과 양론적 계산을 통해 C/N비는 16.11, 이론적 메탄수율은 0.489로 제시된 바 있다. 그는 실험적 고찰에 의하여 폐활성슬

Table 1 Specification and physical characteristics of digester and organic waste.

Digester dimension	Height(m)	6	
	Diameter(m)	5	
	Angle of roof	15°	Horizontal
	Digester thickness(m)	0.012	Mild steel
	Insulation thickness(m)	0.05	Mineral wool
Organic waste	Specific heat(J/kg·°C)	4,094	Assumed constant
	Density(kg/m ³)	1,020	
Thermal conductivity	mild steel(W/m·°C)	54	
	mineral wool(W/m·°C)	0.04	
Film coefficient	wall to air(W/m ² ·°C)	28	
	biogas to roof(W/m ² ·°C)	9	
	liquid to biogas(W/m ² ·°C)	6.8	
	slurry to wall(W/m ² ·°C)	150	

Table 2 Characteristics of organic waste for assessment of energy balance

Parameters	Value	Range*
Total Solids(%)	5-10	1-30
VS/TS(%)	90	
Methane production rate (m ³ /VS·kg)	0.3	0.11-0.36
VS reduction(%)	80	45-90
SRT (days)	20	9-30
Operation temperature	35°	35°, 55°

* (Han, 2001)

러지의 경우 C/N비가 5.79, 이론적 메탄수율은 0.544 L-CH₄/VS-g 로 나타나는 것으로 보고하였다.

실험적으로 얻은 결과(권 등, 2007)와 여러 문헌 결과를 토대로 메탄 생산량은 0.3m³/VS·kg으로 정하였다. VS의 분해율은 80%로 가정하였고 소화조의 운전온도는 35°로 연중 일정한 것으로 간주하였다. VS/TS 비율은 소화대상 슬러리의 종류에 따라 다르나 본 연구에서는 90%로 가정하였다. Table 2에는 분석과 관련된 유기성폐기물의 이화학적 특성을 제시하였다.

2. 소화조 열손실

소화조 벽면에서 발생하는 열손실은 외기온도가 소

화조 내부 온도에 비해 낮은 경우에 일어난다. 온도 차에 의한 Fourier 식에 의한 열손실량은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

여기에서 q 는 열전도량(W), k 는 열전도계수(W/m·°C), A 는 단면적(m²), T 는 온도를 나타낸다. 열전도계수 U 를 이용하면

$$q = \frac{dT}{\sum \frac{\lambda}{K} + \sum \frac{1}{H}} \quad (2)$$

$$\frac{1}{U} = \frac{x_1}{K_1} + \frac{x_2}{K_2} \dots + \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \dots \quad (3)$$

x 는 재질별 두께(m), K 는 재질별 열전도계수(W/m·°C), h 는 계면 열전도율(W/m²·°C)을 나타낸다. 소화조에서의 열손실은 철재와 암면 재질의 단열재로 이루어진 소화조 벽면에서 일어난다. 바닥은 소화조의 설치조건에 따라 일정 깊이의 지하에 위치할 수 있다. 지하에 위치하면 단열효과를 기대할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 바닥이 지표면에 설치되어 있는 것으로 가정하고 열손실을 산정하였다. 반면에 소화조 상부는 바이오가스로 차있으므로 소화액과 접촉하고 있는 경우와 다르다. 소화액의 온도는 일정하되 바이오가스와 지붕을 통과하는 열전도를 고려하여 열손실을 산정하였다.

3. 투입 폐기물의 가온

소화조에 투입되는 유기성폐기물은 소화조 외부에서 가온하거나, 소화조 내의 온도가 급격하게 낮아지지 않도록 적당한 양을 투입하면서 가온하여야 한다. 이를 위해서는 저장조에 있던 유기성폐기물의 온도가 매우 중요하다. 동절기에는 영하로 낮아지므로 이를 소화조 운전 온도로 올리기 위해서는 상당히 많은 양의 에너지가 요구된다. 가온을 위한 열량(h_f)은

다음의 식에 의하여 산정하였다.

$$h_f = F\gamma(T_o - T) \quad (4)$$

여기에서 F 는 하루 투입 유기성폐기물(kg), γ 는 유기성폐기물의 비열, T_o 는 소화조 내부온도, T 는 유기성폐기물의 온도를 나타낸다. 유기성폐기물이 외기에 노출되어 외기온과 같은 상태로 있다고 가정하여 가온 열량을 산정하였다.

III. 기온변화에 따른 에너지수지

1. 소화조의 가온열량

본 연구에서 설정된 소화조에 대해서 기온이 섭씨 -3°이고 소화조 운전온도 35°일 때 열손실량은 지붕에서 62.2MJ, 벽과 바닥에서 313MJ, 하루에 유입되는 유기성 폐기물 7.7t의 가온 열량 1,251MJ이 요구되는 것으로 계산된다. 보일러와 열교환기의 전체 효율이 70%라고 가정하였으므로, 손실 및 가온을 위한 열량은 2,273MJ이 된다. 하루 발생되는 바이오가스의 발열량은 3,364MJ이므로 67.6%가 소화조 운전온도를 유지하기 위하여 이용되어야 하며, 나머지 32.4%인 1,091MJ만이 발전 등에 이용이 가능한 순 잉여 에너지이다. 반면에 기온이 섭씨 24°인 하절기에는 19.6%만이 소화조 가온에 이용되고, 나머지

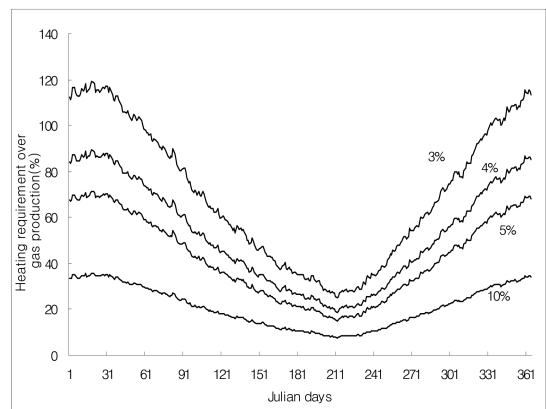


Fig. 2 Heating requirements for different TS loadings over a year

2,706MJ을 이용할 수 있다.

이천시 평년 일별 기온을 이용하여 TS/VS의 비율이 90%이고, TS가 3%에서 10%인 조건에서 1일 가운에 소요되는 열량을 1일 생산되는 바이오가스 열량의 비율로 나타내면 Fig. 2와 같다. TS가 3%일 때 동절기에는 소화조 운전온도를 유지하기 위해서는 소화조 가운에 생산되는 바이오가스 이외의 보조 연료가 이용되어야 한다. 반면에 TS 10%인 경우에는 동절기에 바이오가스 생산량의 40%미만이 소요됨을 알 수 있다.

2. VS 부하량의 영향

VS 부하량이 증가함에 따라 메탄 발생량이 증가하여 에너지 순 생산량은 증가한다. 그러나 일반적으로 VS 부하량이 과다하면 암모니아나 유기산이 축적되어 문제가 발생하기 때문에 허용상한치 3 kg-VS/m³-day를 둔다(양과 이, 2004). VS/TS가 90%이고 TS가 3, 4, 5, 10%일 때 VS 부하량은 각각 1.49, 1.99, 2.49, 4.98 kg-VS/m³-day로 계산된다. 따라서 본 연구에서 설정된 조건 하에서 TS 10%인 경우 VS 부하량은 다소 높으며, 에너지 순 생산량이 가장 많으나 이상소화를 초래할 수 있다.

에너지수지 분석을 위해 VS 분해율은 80%, 메탄 생산량은 0.3m³/VS-kg으로 가정하였다(Table 2). 그러나 소화대상 유기성폐기물의 종류에 따라 이 값은 변한다. 특히 이분해성 유기물이 다량 포함되면 메탄 생산량은 현저히 낮아진다. 소화기간이 다르지만 돈분의 메탄 생산량은 VS 분해율 40%에서 0.20~0.24 m³/VS-kg, 하수처리장 슬러지는 VS 분해율 70% 수준에서 0.2~0.4 m³/VS-kg의 범위를 갖는다(양과 이, 2004). 따라서 소화 대상 유기성폐기물의 기질 특성에 따라 에너지 순 생산량은 영향을 받으므로 소화조 계획과 설계 시에 충분히 반영하여야 한다.

3. 외기온도의 영향

외기온도가 낮아짐에 따라 소화조외벽에서 발생하는 열손실량은 증가하며, 투입되는 슬러리를 가운하

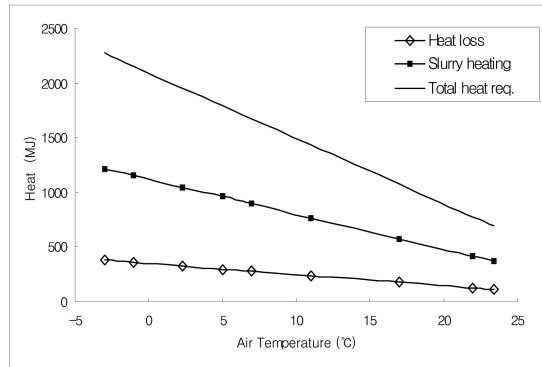


Fig. 3 Heating requirement and heat losses for different temperatures

기 위한 열량 또한 증가하게 된다. 소화조의 적정 운전 온도를 유지하기 위해 필요한 총열량 가운데 외벽 손실에 의한 열량은 16.5%, 투입 슬러리 가운을 위한 열량은 83.5%를 차지한다. 외기 온도가 -3°C 일 때 총 소요열량은 하루에 약 2,300MJ, 영상 23°C 에서는 약 700MJ로 산정된다. VS 부하량이 2.49 kg-VS/m³-day일 때 발생하는 메탄의 열량이 약 3,400MJ이므로 기온이 영하로 낮아지는 동절기에는 에너지 순 생산량이 제한적임을 알 수 있다. Fig. 3은 외기온과 가운열량의 관계를 나타내고 있다.

IV 소화조 운영방안

바이오가스에 의한 에너지 순 생산량에 영향을 미치는 요인은 크게 소화조 열손실량, 가운 열 요구량, 바이오가스 생산량 등이다. 소화조 외벽 등에서 발생하는 열손실량은 단열재를 이용하는 등 설계 시에 반영하여 최소화할 수 있다. 동절기에 소화조에 투입되는 슬러리를 가운하는데 소요되는 열량은 소화조에서 인출되는 소화액의 열을 이용하여 줄일 수 있다. 이와 같은 소화조 운영을 통해 바이오가스 생산에 의한 에너지 순 생산량을 제고할 수 있다(Chen, 1983). 소화조 운영에 있어서 에너지 순 생산량 제고를 위한 방안은 앞에서의 에너지 수지분석 결과를 토대로 기질의 조정과 외기온의 고려한 방식으로 나눌 수 있다.

Table 3 Characteristics of different substrates for digestion(DGS and Ecofys, 2004)

Feedstock	Dry matter (DM, %)	Organic matter (% of DM)	Biogas yield (m ³ /t-ODM)	Biogas yield (m ³ /t wet)	Average biogas yield (m ³ /t wet)
Cow manure	7-15	65-85	200-400	9-51	25
Pig manure	3-13	65-85	350-550	7-61	27
Chicken manure	10-20	70-80	350-550	24-88	51
Vegetable waste	10-20	65-80	400-700	25-120	75
Mangold	10-20	80-95	800-1200	65-230	145
Corn silage	15-40	75-95	500-900	55-340	200
Grass silage	30-50	80-90	500-700	120-315	220
Fat and flotation slurry	8-50	70-90	600-1,300	30-585	310

DM : dry matter, ODM : organic dry matter, wet : wet matter

1. 기질의 조정

축산분뇨는 유기물 농도가 높아 혐기성 처리에 적합하다. 그러나 Table 3에서 보는 바와 같이 단위 중량당 바이오가스 생산량이 상대적으로 낮기 때문에 에너지 생산성을 높이기 위해서는 기질을 개선하는 것이 바람직하다. 사일리지나 지방, 지질을 많이 포함하는 부유성 슬러리는 건량 기준 단위 중량당 바이오가스 생산량이 우분이나 돈분에 비해 약 2배 정도 많다. 국내에서도 음식물쓰레기를 혐기성 소화할 때 하수처리장 슬러지에 비해 바이오가스 생산량이 2배 이상 나타나는 것으로 보고된 바 있다(산업자원부, 2002). 음식물쓰레기와 돈분을 25:75의 비율로 혼합하여 소화하는 시설에서 기질의 VS는 9% 수준으로 매우 높다(권 등, 2007). 바이오가스 이용을 고려한 에너지 순 생산량을 제고하기 위해서는 이와 같이 생분해성 유기물 농도가 높은 기질을 병합 처리하는 것이 필요하다.

소화반응이 정상적으로 진행되기 위해서는 유기물(또는 VS)의 최대 부하량은 소화대상 물질의 특성에 따라 다르므로, 실험에 의해서 최적 부하량을 결정하여야 한다. 혐기성 소화에서 유기물 부하량이 허용치를 초과하면 이상발효를 초래하여 지방산이 축적되어 가스 생산이 정지되며, 소화액의 BOD가 크게 높아진다. 반대로 유기물 부하량이 낮을 때에는 바이오가스 생산량이 적을 뿐만 아니라 소화조 용적이 커지기 때문에 비경제적이다.

바이오가스 생산량을 높이기 위하여 유기물 또는

VS 부하량을 조정하는데 있어서 점검해야 할 요소로서는 적정 탄질(C/N)비와 유해성분의 포함 여부이다. 특히 음식물쓰레기 등을 병합처리할 때에는 비닐과 같은 각종 혐잡물이 포함되지 않도록 충분한 전처리계획이 수립되어야 한다.

2. 외기온에 따른 제어

Fig. 2에서 언급된 바와 같이 동절기에 소화조의 적정온도를 유지하기 위해서는 가온이 필수적이며, 특히 투입 슬러리를 가온하는데 요구되는 열량이 80% 이상을 차지한다. 따라서 가온에 소요되는 열에너지 줄이는 만큼 에너지 순 생산량을 증가시킬 수 있다. 가온 열량을 줄이기 위해서는 투입 슬러리량을 줄이는 방법과 슬러리의 온도를 높이는 방법이 있다. 1일 투입 슬러리량을 줄이기 위해서는 저장시설이 추가로 확보되어야 한다. 동절기에만 활용이 된다는 것을 전제로 하면 간이 시설을 이용할 수 있다.

가온설비에서 가온하기 전 단계에서 슬러리의 온도를 최대한 올리면 그 만큼의 가온 열량을 절감할 수 있다. Chen(1983)은 외기온도 10℃ 조건에서 소화조에서 인출되는 소화액의 열을 회수하여 이용할 때에 가스 생산비용 저감효과가 뚜렷함을 강조하고 있다. 물론 열교환 설비를 갖추므로 시설비용이 추가로 소요되는 점이 있지만 동절기 가온열량을 줄이는데 효과적이다. 슬러리의 온도를 높이기 위한 또 다른 방법으로 비닐하우스와 같은 시설을 활용하는 것이다. 비닐하우스 내에서 주간에 가온하여 투입하면

효과적이다. 더 나아가 낮 시간의 기온이 영하로 낮아지면 슬러리의 투입을 중단하는 간헐방식의 운영 또한 가능하다. 외기온을 고려하여 이들 방법들을 복합적으로 적용하면 효과적이라 판단된다.

혐기성 소화시설에 대한 연구나 논의가 대부분 35℃ 정도의 중온소화나 55℃ 내외의 고온소화에 집중되어 있다. 그러나 일부 연구자들은 저온소화에 대해서 가능성을 언급하고 있다. Masse et al.(1996)은 캐나다에서 혐기성 소화를 가동할 때 동절기에는 바이오가스가 가온에 전량 사용되거나 추가의 에너지가 요구되므로, 이를 해결하기 위한 방안의 하나로 20℃ 정도에서 소화조 운영에 대한 연구를 수행한 바 있다. 분노처리가 매일 필요하지 않으므로 1주에 1-3회 투입하는 조건에서 비교적 적정한 수준으로 소화가 이루어짐을 확인하였다. 혐기성 미생물이 충분히 고농도로 존재하는 경우 저온소화가 효과적으로 진행될 수 있음을 시사한다. 고온소화에서는 1℃ 이내의 온도변화가 허용되나 중온소화에서는 3℃ 정도의 변화에도 큰 문제가 없다(양과 이, 2004). 따라서 동절기에는 소화조의 운전 온도를 30℃ 내외로 낮추어 운영하는 것도 효과적이라 판단된다.

V. 요약 및 결론

유기성폐기물을 안정적으로 처리하기 위한 방안으로서 바이오가스를 부수적으로 얻을 수 있는 혐기성 소화공정은 최근 도입 사례가 증가하고 있다. 신재생 에너지 개발 측면에서 바이오가스를 경제적으로 얻기 위해서는 에너지 순 생산량이 중요하다. 본 연구에서는 혐기성 소화시설을 가동하는데 있어서, 연간 기온변화에 따른 소화조의 열손실과 소화조 내에서 적정온도를 유지하는데 요구되는 열량 등을 분석하고, 바이오가스 생산에 의한 에너지 순 생산량을 평가하여 효과적인 운영방안을 제시하였다. 이를 위하여 경기도 이천시 평년 일별 기온을 이용하였으며, 직경 5m 높이가 6m의 소화조를 대상으로 열수지를 분석한 후 에너지 순 생산량을 제시하였다.

주어진 소화조의 단열조건 하에서 소화대상 슬러리의 TS가 3%(VS 2.7%)인 경우 동절기에 소화조

운전 온도를 유지하기 위해서는 생산되는 바이오가스 이외에 보조연료가 소요되는 것으로 나타났다. TS가 10%(VS 9%)인 조건에서는 동절기에 40%만이 소화조 가온에 소요된다. 따라서 바이오가스 생산을 고려한 혐기성 소화조의 가동은 충분한 유기물이 공급되어야 함을 알 수 있다. 유기물의 공급이 과다할 때에는 유기산의 축적으로 이상소화가 발생할 수 있으므로 유기물 부하 허용 한계치를 고려하여 충분히 유기물이 공급될 수 있도록 해야 한다.

소화조 외측으로부터 발생하는 열손실량은 외기온이 낮아짐에 따라 증가하였으며, 적절한 단열조건 하에서는 투입되는 슬러리를 소화조 운전온도로 높이는 데 많은 열량이 요구되었다. 슬러리 가온에 요구되는 열량은 가온에 소요되는 전체 열량의 80% 이상을 차지하였다. 소화조 가온에 소요되는 에너지를 저감하기 위해서는 소화조에서 인출되는 소화액의 열을 이용하고, 저장시설에서 온도를 높이는 것이 중요하다. 기온이 매우 낮은 시기에는 슬러리 투입을 연기하고, 기온이 높은 날 주간에 투입하는 등의 시간적 배분이 필요하다.

가온을 위한 에너지 소요량이 많은 동절기에는 많은 연구가 이루어지지 않았으나 20℃ 정도의 저온 소화 또한 고려할 수 있다. 혐기성 미생물 농도를 높여 상온에서의 소화반응을 효과적으로 유지할 수 있다면 에너지 순 생산량을 제고할 수 있다. 저온소화와 관련된 연구는 소화조의 효율적인 운영과 에너지 순생산량의 제고를 위한 방안의 하나로서 앞으로 검토될 수 있다.

References

1. 권순국, 홍성구, 김현욱, 2007, 음식물쓰레기 실용화방안 연구, 농촌진흥청.
2. 농업과학기술원, 2002, 가축분뇨 처리를 위한 Biogas 이용기술 개발, 수원, 농촌진흥청.
3. 양상현, 이정수, 2004, 용폐수처리와 관리 - IV 혐기성처리 · 안정화지와 라군 · 질소와 인의 생물학적 제거, pp.43-44.
4. 산업자원부, 2002, 슬러지/음식물 통합소화에 의

- 한 바이오가스 이용기술 실용화 연구.
5. 윤진섭, 2007, 현대·대우건설 축산분뇨에 눈독 들이는 이유, <http://news.hankooki.com>
 6. 한신기, 2001, Bioenergy Generation and Leachate Treatment by Anaerobic Digestion of Organic Waste, 한국과학기술원. 토목공학과, 대전
 7. Chen, Y. R., 1983, Biogas digester design. in Fuel Gas Systems edited by Donald L. Wise, CRC Press, pp. 23-60.
 8. Chynoweth, D. P., J. M. Owens & R. Lergrand, 2001, Renewable methane from anaerobic digestion of biomass. Renewable Energy, 22, pp.1-8.
 9. DGS(Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie) & Ecofys, 2004, Planning and Installing Bioenergy Systems : A guide for installers, Architects and Engineers, Earthscan.
 10. Ghafoori, E. & P. C. Flynn, 2007, Optimizing the Size of Anaerobic Digesters. Transactions of the ASABE, 50 (3), pp.1029-1036.
 11. Ghosh, S., 1981, Net Energy Production in Anaerobic Digestion, Institute of Gas Technology, Orlando, Fl.
 12. Green Box Systems Group(GBSG), 2000, Biogas/ Anaerobic digestion for Fuel cell applications. <http://www.esru.strath.ac.uk>
 13. Masse, D. I., R. L. Droste, K. Kennedy, & N. K. Patny, 1996, Operation Strategies for Psychrophilic Anaerobic Digestion Swine Manure Slurry in Sequencing Batch Reactors. Canadian Journal of Civil Engineering 23, pp.1285-1294.
 14. Srivastava, V. J., 1987, Net Energy. in Anaerobic Digestion of Biomass, edited by D. P. Chynoweth & R. Isaacson, London, New York. Elsevier Applied Science, pp. 219-230.