SPECLAL FEATURE
특집
ISSN 1225-6498

음식물류폐기물의 고효율 바이오가스화를 위한 설계 및 운전 기술지침 마련 연구(I) - 현장조사 결과 중심으로

이동진, 강준구, 이수영, 김기헌, 배지수†
국립환경과학원 폐자원에너지연구과

A Study on Establishment of Technical Guideline of the Installation and Operation for the Efficient Bio-gasification Facility of Food Wastes (I)

- Results of the Field Investigation

Dongjin Lee, Junkyu Gang, Suyoung Lee, Kiheon Kim, Jisu Bae†
National Institute of Environmental Research
Environmental Resource Research Department, Waste to Energy research Division

1. 서론

유기성폐기물(음식물류폐기물 및 음폐수)의 직매립이 2005년 1월부터 금지 되었다[1]. 폐기물의 해양배출 기준 강화와 함께 해양환경관리법에 따라 2013년부터 육상에서 발생되는 음식물류폐기물의 해양배출(Ocean dumping)이 전면 금지되었다. 2012년 국내 음식물류폐기물 발생량은 전체 생활폐기물의 25.61 %인 13,036.9 톤/일 규모로 배출되고 있으며, 처리비용은 최근 3년 동안 그 규모가 3배 이상 급증하고 있다[2]. 최근 음식물류폐기물은 바이오매스 에너지원으로써 새로운 신재생에너지원으로 각광받고 있다. 따라서 음식물류폐기물의 처리, 자원화 및 에너지화를 위한 대책 마련이 필요하다.

정부는 2008년 "폐자원 및 바이오매스 에너지 대책 실행계획"을 바탕으로 총 사업비 7,225억 원을 투입하여 22개의 바이오가스화 시설의 설치를 추진하였다[3]. 환경부는 국내 유기성폐자원 에너지화 시설을 2020년까지 28개소 5,638 톤/일 규모로 신규 확충 · 설치할 예정이다. 현재 국내에서 가동되고 있는 바이오가스 시설의 가스발생량은 음식물류폐기물 93.5 m^3/톤, 음폐수 32.3m^3/톤이다. EU 바이오가스화 시설의 평균 바이오가스 발생량인 120.0 m3/톤(유기성폐자원의 경우)과 비교하였을 때 각각 77.9 %, 26.9 % 수준에 불과한 값이다[4]. 이는 EU와 국내 음식물 성상, 적용 기준 등의 차이로 인한 효율성의 차이로 볼 수 있다. 그러나 이러한 점을 감안하여도 EU에 비하여 매우 낮은 효율성을 보이는 것으로 나타나, 국내 바이오가스화 시설의 운영 및 관리에 대한 점검이 필요한 것으로 판단된다.

유기성폐기물의 해양투기 금지와 함께 바이오가스화 시설의 신규건설이 본격적으로 이루어지고 있다. 그러나 운전 효율성(메탄가스 생성률, 유기성 분해율 등)은 처리효율 기준에 미치지 못하고 있는 시설들이 많은 실정이며, 운전 및 유지관리 기술 부족 등의 문제로 정상 가동률에 미치지 못하

† Corresponding author : js7532@korea.kr

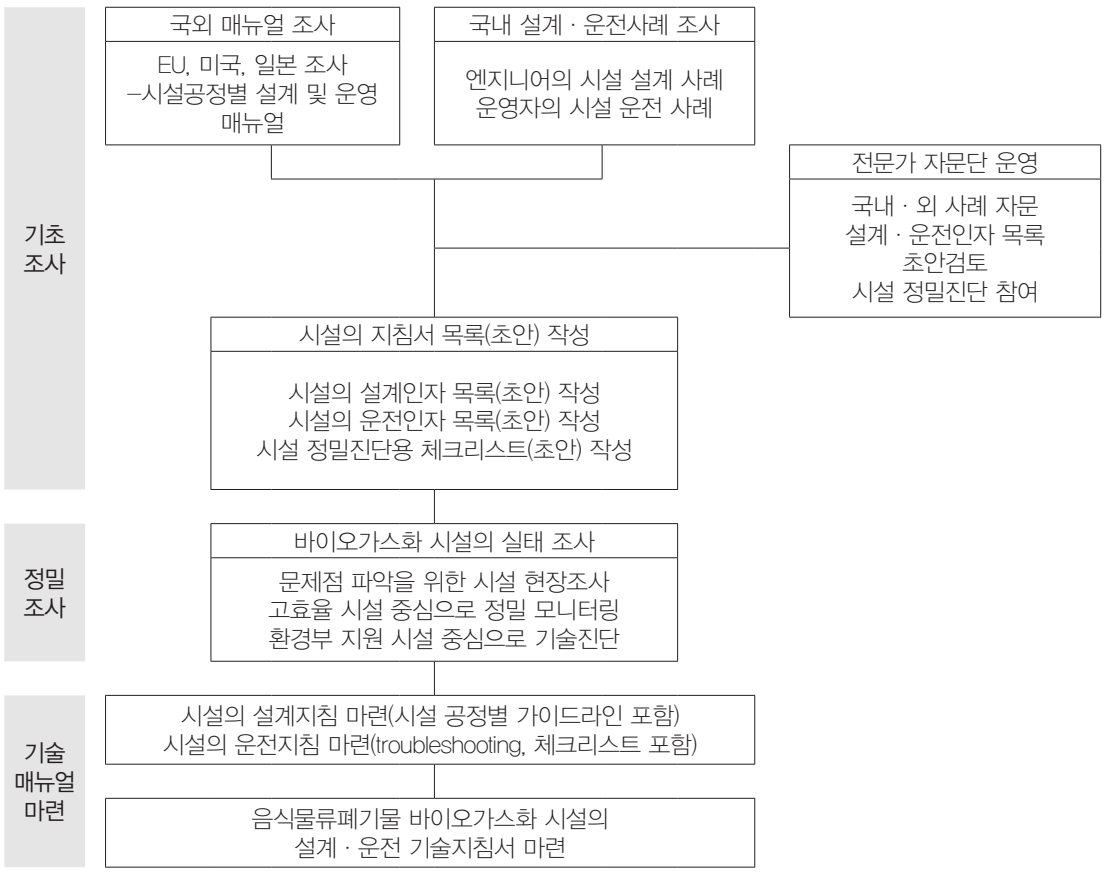
는 사례가 많았다. 또한 국내 바이오가스화 시설은 음식물류폐기물의 특성을 반영한 설계 및 운전 지침이 없는 실정이다.

따라서 음식물류폐기물의 처리방안으로 대두되고 있는 바이오가스화 시설의 운전 효율성을 증대시키고 시설의 안정적인 운영을 위한 대안이 마련되어야 한다. 그러므로 본 연구에서는 음식물류폐기물의 특성을 감안한 설치 · 운영시 설계인자 및 운전인자에 대한 가이드라인을 제시하는 기술지침서를 마련하고자 한다.

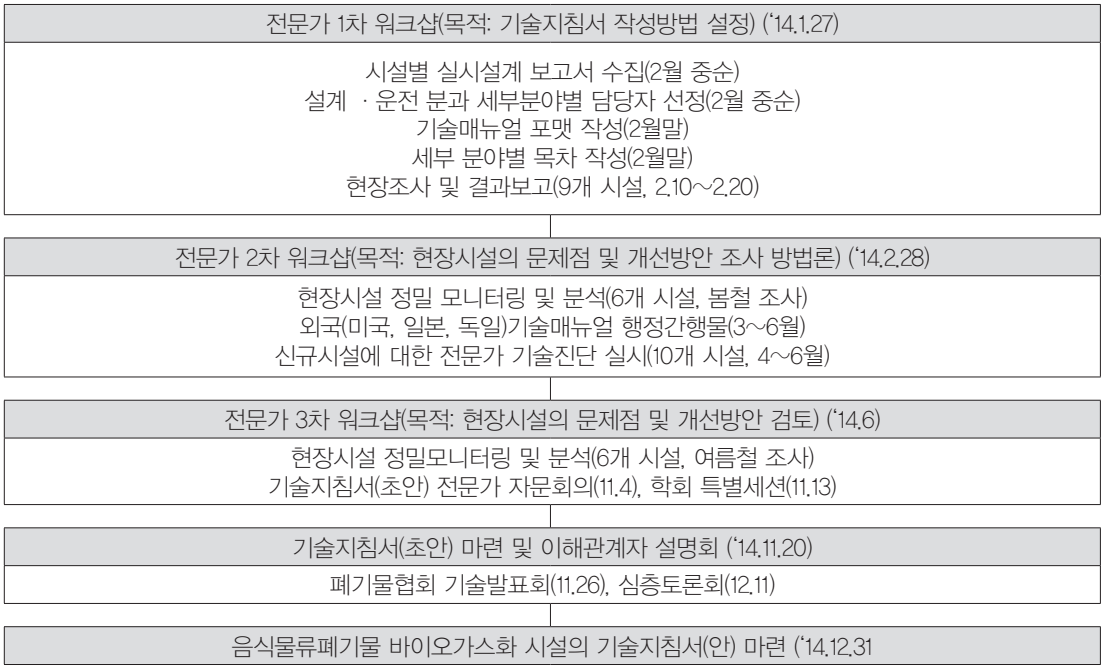
2. 연구 방법

2.1. 연구방법 체계도 및 흐름도

본 연구는 유기성폐자원 바이오가스화 시설의 실질적인 효율 증대를 목적으로 설계 · 운전 기술지침서를 작성하고자 한다. 연구방법은 기초조사, 정밀조사, 기술매뉴얼 마련 등 세부분으로 구분되며, 국외 매뉴얼조사, 국내 사례조사, 대표시설의 현장조사, 기술지침서 마련 등의 과정으로 진행되었다. 총 3차 전문가 워크샵과 기술지침서 초안에 대해 이해관계자 설명회 등 5회에 걸쳐 의견수렴하여 기술지침서(안)을 마련하였다. 이와 같이 기



[Fig 1] Structure of research methods.



[Fig 2] Flow chart of research methods.

초조사와 전문가 자문단 운영, 정밀조사와 기술지침서(안) 마련에 대한 구체적인 연구방법의 체계도는 **[Fig 1]**에 나타내었다. 또한 기술지침서를 마련하기 위하여 연구방법 체계도에서 제시한 내용들이 시계열적으로 어떻게 진행되었는지를 알기 쉽게 연구방법의 흐름도를 **[Fig 2]**에 나타내었다.

2.2. 현장조사

현재 운영 중인 바이오가스화 시설에 대한 기초자료 수집 및 문제점을 분석하기 위하여 현장조사를 실시하였다. 음식물류폐기물의 바이오가스화 시설의 설계 · 운전 기술지침서 마련을 위하여 전국 9개 시설(송파, 청주, 광주 송대, 울산 용현, 광주 유덕, 대구, 부산 생곡, 양산, 정읍)을 대상으로 1, 2차에 나누어 조사를 실시하였으며 공정별 특징 및 문제점(반입 · 공급 공정, 전처리 공정, 혐기소화 공정, 바이오가스 생산 · 이용 공정, 부산물 · 악취 · 폐수 등 처리공정)을 중점으로 조사하였다. 현장조사 대상시설 제원은 **[Table 1]**과 같다.

[Table 1] Specifications of bio-gasification facilities in the field investigationon

순번	시설명	대상처리물질	소화방식	설계용량
1	송파 음식물폐기물처리시설 (음폐수 바이오가스화)	음폐수	습식 고온	500 톤/일
2	정읍 축분 · 음폐수 병합 처리시설 (습식, 중온, 가축분뇨 · 음폐수 병합)	가축분뇨, 음폐수	습식 고온 음폐수 병합	30 톤/일
3	광주 유덕 음식물자원화시설 (습식, 고온, 음폐수, 건조 사료화)	음폐수	습식 고온	299 m^3/일

순번	시설명	대상처리물질	소화방식	설계용량
4	광주 송대 음식물자원화시설 (습식, 고온, 음폐수, 건조 사료화)	음폐수	습식 고온	160 톤/일
5	대구 음식물자원화시설 (건 · 습식, 고온, 음식물 · 음폐수)	음식물, 음폐수	건 · 습식 고온	300 톤/일
6	청주 유기성폐기물 에너지화시설 (습식, 중온, 음폐수, 건조 사료화)	음폐수	습식 중온	200 톤/일
7	부산 생곡 음식물자원화시설 (건식, 중온, 음식물, 건조 사료화)	음식물	건식 중온	200 톤/일
8	양산 음식물자원화시설 (습식, 중온, 음폐수 · 가축분뇨)	음폐수, 가축분뇨	습식 중온	60 톤/일
9	울산 용현 음식물병합자원화시설 (습식, 중온, 음식물류폐기물–하수)	음식물류폐기물, 하수	습식 중온	180 톤/일

2.3. 현장조사

2.3.1. 조사방법

유기성폐자원 바이오가스화 시설의 기술지침서 마련을 위하여 정밀모니터링을 실시하였다. 고효율 시설(음폐수 톤당 바이오가스 생성량 30 Nm3/ton)을 중심으로 울산 용현, 광주 송대, 청주, 광주 유덕, 대구, 송파 시설을 조사대상으로 선정하였다. 시설 특성을 반영한 시계열별 운영 및 분석 데이터 제공을 목적으로 3~7월 동안 반입량, 온도, pH, 가스발생량, 유기물부하량(kg/(m^3 · day)), 메탄농도, 체류시간 등을 조사하였다.

2.3.2. 분석방법

바이오가스화 시설의 분석방법은 다음과 같다. 음식물류폐기물 원료의 성상분석을 위하여 삼성분(수분, 고형물, 회분), 영양성분(탄수화물, 단백질, 지방), CODcr, 질소(TN, NH_4^+), 인(TP, PO_4^{3-}), 휘발성지방산(VFAs)을 분석하였다. 또한 공정 분석 및 현장자료 검토를 위하여 유기물부하율, 체류시간, 유기물 함량(TS, VS), 메탄발생량 등을 분석하였다.

2.3.2.1 삼성분 분석법

폐기물공정시험방법[5]에 명시된 삼성분 분석법을 바탕으로 시료의 수분, 가연분, 회분 등 함량(무게 % 기준)을 나타내었다. 가연분 함량과 회분 함량을 아래의 계산식에 적용하여 총고형물(TS)의 함량과 휘발성고형물(VS)의 함량을 계산하였다.

$$\text{수분 (\%)} = \frac{\text{건조 전 시료의 무게} - \text{건조 후 시료의 무게}}{\text{건조 전 시료의 무게}} \times 100$$

$$\text{가연분 (\%)} = \frac{\text{강열 전 시료의 무게} - \text{강열 후 시료의 무게}}{\text{강열 전 시료의 무게}} \times 100$$

$$\text{회분 (\%)} = 100 - \text{수분 (\%)} - \text{가연분 (\%)}$$

$$\text{TS (\%)} = 100 - \text{수분 함량 (\%)}$$

2.3.2.2. 영양성분(탄수화물, 단백질, 지방) 분석법

식품공정시험법[6] (제 10. 일반시험법, 1.1.3.1 나. 단백질 분석기를 이용하는 방법; 1.1.5.1.1. 에테르추출법)에 근거하여 단백질과 지방을 분석하였다. 탄수화물은 식품공정시험법[6] (제 10. 일반시험법, 1.1)에 근거하여 수분, 회분, 지방과 단백질 함량 분석 값을 이용하여 도출하였다(아래의 계산식 참고).

$$\text{탄수화물} = 100 - (\text{수분} + \text{회분} + \text{지방} + \text{단백질})$$

2.3.2.3. CODcr, 질소(TN, NH_4^+), 인(TP, PO_4^-), 휘발성지방산

CODcr은 수질오염공정시험기준[7] (ES 04315.3 화학적 산소요구량-적정법-다이크롬산칼륨법), 암모니아성 질소는 수질오염공정시험기준[7] (ES 04355.3, 자외선/가시선 분광법), 총질소는 수질오염공정시험기준[7] (ES 04363.1, 자외선/가시건 분광법-산화법), 인은 수질오염공정시험기준[7] (ES 04360.3)에 근거하여 분석을 실시하였다.

휘발성지방산은 Standard method 5560 D. Gas chromatographic method 4.a[8]에 따라 Diethylether로 전처리 용액을 추출하여 GC 기기(GC-FID, Aglient 6890, USA)를 이용하여 분석하였다.

2.3.2.4. 이론적 메탄가스 발생량

투입한 유기성폐자원은 혐기소화를 거치면서 메탄과 이산화탄소를 주성분으로 하는 바이오가스를 생성한다. 유기성폐자원의 함유원소 C, H, O로부터 발생되는 메탄 가스발생량의 이론적 산정식은 Buswell and Mueller(1952)[9]의 식을 이용하고 있다.

$$C_nH_aO_b + [n-\frac{a}{4}-\frac{b}{2}]H_2O \rightarrow [\frac{n}{2}+\frac{a}{8}-\frac{b}{4}]CH_4 + [\frac{n}{2}-\frac{a}{8}+\frac{b}{4}]CO_2 \quad \text{<Eq-1>}$$

Tchobanoglous et al(1993)[10]은 유기성폐자원의 주원소로 C, H, O와 함께 N을 추가하여 〈Eq-2〉 식과 같이 제안하고 있다. 모든 유기물질이 메탄과 이산화탄소 등 바이오가스로 전환되었다고 가정할 때 아래 〈Eq-3〉 식으로 이론적 메탄가스 발생량을 계산할 수 있다. Tchobanoglous et al.(1993)이 제안한 예측식은 단백질이 혐기소화 후 발생되는 암모니아성 질소를 고려한 것이다. 본 연구에서는 원소 함량을 분석한 후, 함량 값을 이용하여 아래, 〈Eq-3〉 식으로 이론적 메탄가스 발생량을 계산하였다.

$$C_aH_bO_cN_d + (\frac{4a-b-2c-3d}{4})H_2O \rightarrow (\frac{4a+b-2c-3d}{8})CH_4 + (\frac{4a-b+2c+3d}{8})CO_2 + dNH_3 \quad \text{<Eq-2>}$$

이론적 메탄가스발생량 (STP L_{CH4}/g_{VS})

$$= \frac{22.4(\frac{4a+b-2c-3d}{8})}{12a+b+16c+14d} \quad \text{<Eq-3>}$$

2.4. 시설진단

시설진단은 운영 중인 바이오가스화 시설의 운영 실태를 파악하고, 문제점과 개선방안을 마련하고 안정적인 운영 및 계획 · 설치 중인 시설의 시행착오를 최소화 하고자 하였다.

조사시설은 수도권매립지, 청주, 광주, 진주, 진해, 대구, 울산, 속초, 동대문, 고양 등 총 10개 시설을 대상으로 하였으며 4~6월 기간 동안 현장진단을 실시하였다. 시설진단은 시설에 대한 효율성(메탄생성률, 유기물분해율 등)과 안전성(pH 및 온도 변화폭, 유기물부하율, VFAs 등 저해요인 등)을 실시하였다.

3. 연구결과

3.1. 외국의 바이오가스화 시설의 기술지침서 현황

3.1.1. 독일

2004년 독일 재생가능에너지자원청(FNR; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe)이 발행한 「바이오가스 생산 및 이용지침서」[11]를 바탕으로 축분 등 농업부산물의 바이오가스 분야에 대한 상세한 정보를 제공한다. 최근 개정된 2013년 판은 새로운 재생에너지법의 조건 및 가이드라인을 기초로 하여 모델 플랜트의 경제성을 제시하며 개략적으로는 바이오가스 기술, 투자 방법, 시설 운영 등에 대한 정보 또한 제공한다. 독일의 경우 소규모 퇴비시설을 다루는 것이 특징이다. 소규모 바이오

[Table 2] Operation factors guidelines for bio-gasification facilities in Germany[10]

관리인자	내 용
① 온도	– 온도는 30~45 ℃의 중온 유지 – 중온 박테리아는 3~4 ℃의 온도변화에 적용, 소화 후 15일 이내 병원균 95 % 이상 사멸 – 평균 35~39 ℃ 범위에서 소화조 운영
② pH	– 적정 pH 6.4~8.0 범위를 벗어나는 경우, 가스발생과 가스 조성이 열악해지고 이산화탄소가 증가함 – 투입물의 과다 유입시, 유기산농도 증가로 인하여 공정 방해 – 소화조 내 알칼리도 1,500~5,000 mg$CaCO_3$/L로 유지 – 고온, 독성물질, 과다투입의 경우, pH 하강
③ 지방산	– 지방산 C1~C6, mg/L로 나타내고 초산과 프로피온산이 적절한 지표로 사용 가능 – 총 유기산 1 g/L 이하, 프로피온산 비율 200 mg/L 이하인 경우, 최적운영 – 총 유기산 3 g/L 이상, 프로피온산 비율 300 mg/L 이상인 경우, 비정상 공정운영 – 투입물의 과다영양 및 조성의 급격한 변화시, 초산 증가, 메탄비율의 감소가 나타남
④ 독성물질	– 고농도 독성물질 유입으로 가스발생 저해
⑤ 소화조 내 영양물질	– 영양물질(인, 칼륨, 칼슘, 마그네슘)은 소화를 통해서 불변함
⑥ C/N비	– 적정비율은 30:1~10:1이며 그 이하인 경우, 높은 암모니아 발생 원인으로 8 : 1 이하에서는 극도의 방해요소로 작용함
⑦ NH3 농도	– 온도, pH 증가시 함께 상승하며, 적정운영범위는 50~200 mg/L, 1,500 mg/L부터 방해, 3,000 mg/L부터 극심한 방해를 일으킴
⑧ H2S	– 1 % 이상인 경우 방해로 작용 – 고농도의 NH_3, H_2S는 배관, 가스측정기, 엔진에 치명적 영향
⑨ 체류시간	– 30~50일 사이로 운영
⑩ 유기물 부하량	– 4 $kg_{VS}/(m^3 \cdot day)$ 초과 제한

가스 시설에 대해서는 2012 신재생 에너지법에 준하여 슬러지를 발효하는 75 kW 이하의 규모를 대상으로 특별 보상금을 지급하도록 되어있다.

해당 지침서는 주정부별, 공정별 운전 요인에 따라 시설 운영지침을 규정하고 있다. 공정별 영향인자로는 바이오가스 생산율, 온도, 소화조 유입농도, 유기산, pH, 미량원소, 암모니아, 스컴 등을 제시한다. 상기 영향인자를 바탕으로 시설 모니터링 및 자동화, 장애관리, 기술의 최적화를 기술하였다.

바이오가스화 시설의 적정 운영 · 관리 지표는 온도, pH, 지방산, 독성물질, 영양물질, C/N비, NH3 농도 등이 있으며, 자세한 내용은 **[Table 2]**와 같다.

3.1.2. 일본

일본 지침서[12]는 일본 환경성에서 음식물류폐기물 등 유기성폐자원으로부터 에너지를 회수하기 위한 메탄가스화 시설 장비를 검토하기 위하여 지방자치단체에 필요한 정보를 제공하고 지원하는 것을 목적으로 한다. 해당 지침서는 메탄가스화에 관한 기본적 사항, 메탄가스화 시설의 구성장비 및 사양결정, 운전 · 관리상 유의점을 중점으로 다룬다. 메탄가스화에 관한 기본적 사항에서는 처리과정 및 특징, 가동시간, 바이오가스, 발효액, 환경 · 안전 대책, 관련법규 등의 사항을 다루었다. 현재 일본은 음식물류폐기물 바이오가스화 시설의 적정 운영 · 관리 지표로 온도, pH, 유기산, 암모니아, 알칼리도, 황화수소, 체류시간 등을 제시하고 있다**[Table 3]**.

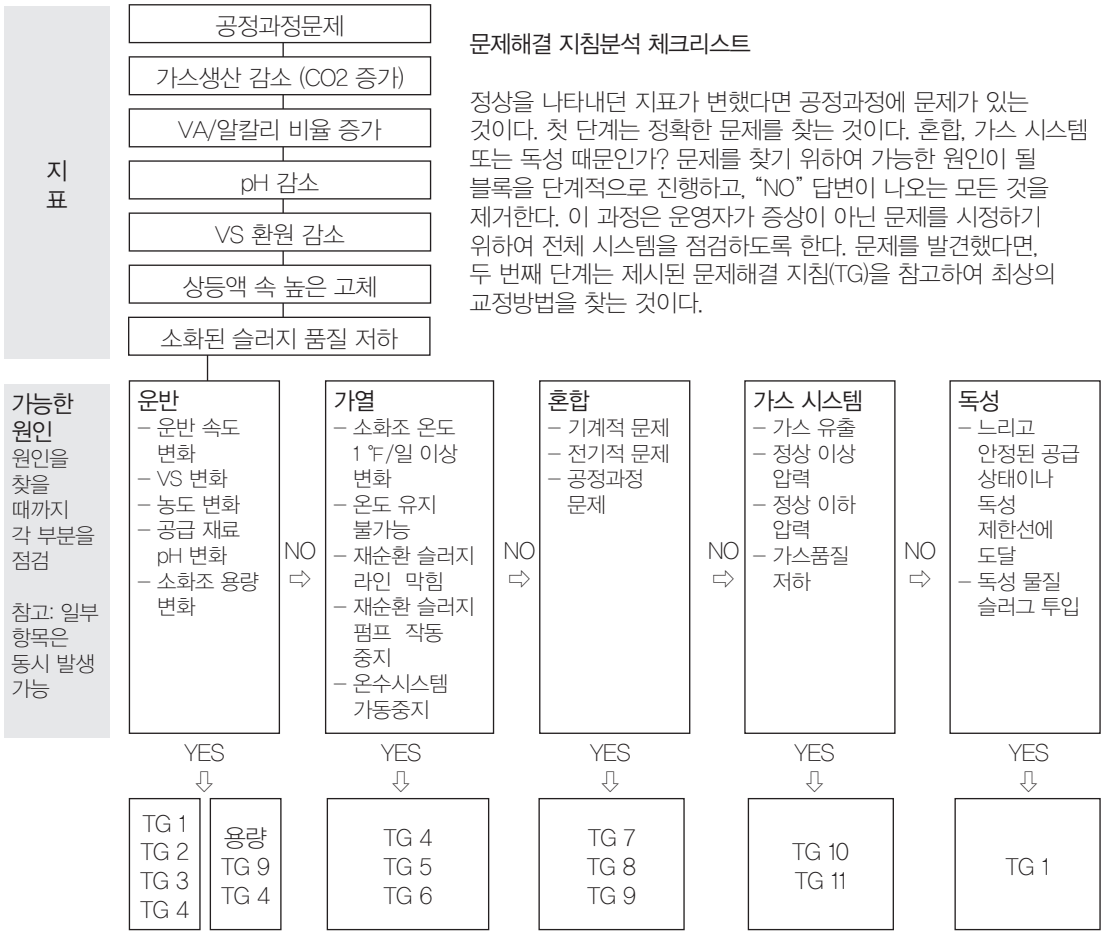
[Table 3] Operation factors guidelines for bio-gasification facilities in Japan[11]

관리인자	내 용
① pH	– 메탄발표 최적 pH 범위 : 6.8~7.6 – 단, 음식물쓰레기 등의 메탄발효시 고농도의 NH3-N를 함유하므로 pH 범위는 7.2~8.0
② 온도	– 메탄발효 온도는 35 ℃ 전후(중온 범위) / 55 ℃ 전후(고온 범위) – 고온발효는 가수분해 속도 및 병원성 미생물의 사멸률이 높고 발효 속도가 빠르며 고부하를 실현시키기 쉬운 반면, 암모니아 저해를 받기 쉬움. 중온발효는 분해속도가 느려 암모니아 저해를 받기 어렵고, 세균의 구성이 다양하여 안정성이 있음
③ 유기산	– 메탄 발효의 중간생성물로, 빠르게 메탄생성과정에 이용되기 때문에 일반적으로 유기산의 농도는 낮음 – 유기산의 거동 파악에 따라 메탄발효조의 상황 파악 가능
④ 가스발생량	– 처리대상물질의 양 · 질은 가스발생량에 직접적인 영향 – 메탄생성균 등 미생물의 활성이 저하되면 가스발생량 감소
⑤ 암모니아	– 메탄발효시 단백질분해에 따라 NH_4^+가 생성 – NH_4^+는 메탄 생성균 증식의 영양성분이 되는 등 필수적인 성분이지만, 고농도일 경우 유기산 축적 및 메탄생성 속도저하 등의 메탄발효 저해가 발생함(암모니아의 일시적인 억제는 pH 조절 및 희석으로 회복 가능)
⑥ 알칼리도	– 산을 중화하는 용액의 용량을 나타내는 지표, 메탄발효과정의 안정성에 관여 – 투입 TS 농도가 10 % 일 때, 총 알칼리도는 5,000~10,000 mg/L 범위
⑦ 황화수소	– 메탄발효에서 원료 중 유황성분이 황화수소 H_2S을 생성 – 황화수소 농도가 높아지면, 바이오가스 품질 저하 및 메탄발효 저해
⑧ 체류시간	– 체류시간은 유기물의 분해속도와 운전의 안정성에 중요한 지표 – 체류시간 15일 이상으로 유지시 높은 유기물 분해율을 얻을 수 있음
⑨ 메탄농도	– 바이오가스 중 메탄농도의 급격한 하락은 메탄발효 억제와 연동

[Table 4] Operating problems in bio-gasification facilities of food wastes

공정	문제점
음식물 저장호퍼	– 음식물 건더기와 침출수가 비중에 의해 분리되어 컨베이어 이송 어려움 – 드레인용 타공망이 없는 국부 드레인 배관으로는 침출수 처리가 어려움 – 평소보다 음식물류폐기물이 과다 유입 또는 설비고장 대비 호퍼 여유용량 부족 – 음식물 동결방지용 가온설비 반영 필요
전처리실 집수정	– 평소 이송 컨베이어에서 흘러나온 음식물이 많아 물청소시 집수정 범람
이송 컨베이어	– 실제 음식물류폐기물에 큰 고형물이 자주 반입되어 컨베이어의 폐색이 잦으므로 컨베이어 사이즈 증대 필요
파쇄 선별기, 미세 파쇄기	– 시중의 파쇄선별기, 미세파쇄기 등이 대부분 제 기능을 못하여 소화조로 이물질 및 큰 고형물이 많이 넘어가 결국 배관 막힘의 주요 원인이 됨 – 음식물류폐기물이 10 mm 이하로 분쇄가 가능한 설비 선정 필요 – 사업비 여유가 있으면 비중선별기, 마그네틱 분리기 반영 필요(유기성폐기물 처리시설 원활한 운영의 절반 정도는 선별기 및 파쇄기에서 결정)
음식물 완충탱크	– 음식물 완충탱크에 교반기 반영 필요(미교반시 침출수만 이송되는 현상 발생)
가축분뇨 이송배관	– 최소 100A 이상 배관 반영 필요(분뇨에는 왕겨, 모래 등 이물질이 많아 배관 막힘이 심함)

공정	문제점
산발효조 및 혐기성 소화조	– 발효조 및 소화조 하부에 퇴적된 고형물을 인발할 수 있도록 하부에 밸브를 90°간격으로 설치하고 내부 바닥을 고깔 모양으로 만들어 고형물 인발이 용이하도록 설계 필요 – 소화조 상부에 발생하는 스컴을 제거할 수 있는 스컴 제거설비 설치 – 발효조 및 소화조 외부 모양을 사각지대가 없게 만들어야함 – 발효조 사이즈를 키우거나 예비로 한대를 더 설치하여 발효조 체류시간을 확보하고 비상시 저류공간으로 활용수도 있음(산발효조에서 pH, 온도, 농도 등을 최대한 조절하여 혐기성소화조로 이송해야 미생물 충격이 적음. 또한 채소류가 급증하는 시기에는 산 발효 시간이 이론치보다 훨씬 길어짐) – 수위계는 초음파식 수위계 보다 압력식 수위계가 정확(초음파식 수위계는 스컴 발생시 잦은 오류 발생) – 발효조 및 소화조 외부에 내부 점검용 투명 점검창 반영 필요(계측기만 신뢰하기에는 위험이 크므로 육안확인이 때론 필요) – 슬러지 농도 증가시 교반기 기동이 잘 안되므로 교반기 모터 용량 증대 필요 – 혐기성소화조 상부에 브리더밸브를 설치하여 폭발방지 필요
가스 공급 라인	– 가스 저장소에서 발전기, 보일러, 잉여가스연소 가는 가스공급라인 개별적으로 설치 (작동회로 구성 및 가스압력 변동 대응 용이) – 가스배관 중간 중간에 응축수 배출용 드레인 밸브 설치 필요(특히 겨울철 기온 차에 의해 순식간에 아주 많은 응축수 발생) – 가스배관 및 각종 밸브는 SUS 재질을 사용하여 부식에 의한 누출 방지 – 가스배관은 플렌지로 연결(용접접합은 가급적 자제, 폭발방지)
탈황장치	– 습식탈황장치는 특히 겨울철 가성소다 응결로 인하여 순환배관이 자주 막혀 운영에 어려움이 많음(시공시 열선 등 보완방안 강구 필요) – 탈황장치 처리용량을 예상치보다 더 두어 가스발생량이 일시적으로 많아지더라도 황화수소를 모두 제거하여 발전기, 보일러 등에 공급되도록 설계필요(황화수소 과다 유입시 발전기, 보일러 부식으로 유지보수 비용 증대 예상)
탈취설비	– 약액 세정탑 방식이 설치비, 운영비 면에서 저렴하나 낮은 성능 – UV 광분해 장치는 현장에서는 아직까지 효과가 적음
옥외 소화조	– 발효조 및 소화조가 설치되어 있는 옥외 바닥은 집수정을 필히 설치하여 우수로로 소화슬러지가 유입되는 것을 사 전에 차단필요(발효조 및 소화조가 설치되어 있는 옥외는 펌프고장이나 배관청소 등으로 슬러지가 자주 유출됨)
가스 발전기	– 가스농도 또는 공급유량 변동에 따라 가변 부하운전이 가능한 유형으로 선정하는 것이 필요(바이오가스는 음식물류폐기물의 성상에 따라서 농도, 유량이 변하므로 도시가스처럼 일정한 유량 및 농도를 기대하기 어려움) – 가스발전기 연소가스 배출 연도를 보일러와 구분하여 설치(공동 사용시 미배출된 연소가스가 역류하는 현상 일부 발생)
약품탱크	– 유독성 약품탱크는 한 장소에 모아 안전에게 관리하는 것이 좋음 – 약품 유출 방지용 방류벽은 필히 설계에 반영 필요
보일러	– 가스누출 감지기 및 가스차단밸브 필히 반영(미설치시 보일러 검사필증 발급 불가) – 보일러 연소가스 배출 연도를 가스발전기와 구분하여 설치(공동 사용시 미배출된 연소가스가 역류하는 현상 일부 발생)
폐수 냉각설비	– 공랭식 칠러 방식은 폐수에 섞여있는 슬러지 등에 의해 자주 막히므로 악취 포집방안이 마련되면 옥외 냉각탑 방식이 운영에 유리
옥외 펌프	– 옥외 펌프는 덮개 등을 제작하여 보온방안 반영 필요
폐수 처리실	– 악취포집시설이 미반영 되어 있어 특히 여름철 폐수온도 상승에 따른 암모니아 가스 과다발생으로 악취 심함



[Fig 3] Troubleshooting guidelines analysis checklist in U.S. (example)[12].

3.1.3. 미국

미국 EPA에서 혐기성 소화시설 운영자에게 소화조 운영 및 관리에 대한 지침13을 제공한다. 해당 지침서는 실제 혐기성 소화시설 운영자들의 의견을 반영하였으며, 운전 · 관리상의 문제해결(Troubleshooting)에 중점을 두었다. 특히 소화조 문제를 인식하고 해결하며, 잠재적인 문제를 파악하고 제고하는데 유용한 정보를 제공한다. 미국의 지침서는「문제해결 지침 분석 체크리스트」를 바탕으로 운영관리 지표의 실태를 파악하여 시스템을 점검하고 문제사항을 해결하는 것을 목적으로 한다 **[Fig 3]**.

지침서에 적용되는 대상은 가축분뇨 원료의 기존/신규 소화조, 가축분뇨와 다른 유기원료를 병합처리하는 기존/신규 소화조, 집중형(Centralized) 소화조 및 병합소화조, 최종 에너지산물(전력, 바이오가스) 등이다.

3.2. 현장조사 결과

현재 운영 중인 음식물류폐기물 바이오가스화 시설을 대상으로 현장조사를 실시하였다. 음식물류폐기물 바이오가스화 시설의 일반적인 처리흐름에 따라 현장 조사를 진행하였으며, 각 공정별 발생하기 쉬운 문제점들은 **[Table 4]**와 같다.

참고문헌

1. 환경부, 폐기물 에너지화사업의 경제성 분석 연구, (2008).
2. 환경부, 2012 전국폐기물 발생 및 처리현황, (2013).
3. 환경부, 음식물류폐기물 처리시설 발생폐수 육상처리 및 에너지화 종합대책[2008~2012], (2007).
4. Weiland, P., "Biogas production: current state and perspectives, Applied Microbiological Biotechnology"85. pp. 849 ~ 860 (2010).
5. 환경부, 폐기물공정시험방법, (2014).
6. 환경부, 식품공정시험방법, (2012).
7. 환경부, 수질오염공정시험방법, (2014).
8. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Standard methods for the examination of water and wastewater, 22nd ed. Washington, USA, (1998).
9. Buswell, A. M. and H. F. Mueller, H. F., "Mechanism of methane fermentation", Industrial and Engineering Chemistry, 44(3), pp. 550 ~ 552 (1952).
10. Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Vigil, S., Integrated solid waste management, McGraw-Hill, (1993).
11. 이동진, 독일의 바이오가스 생산 및 이용지침서 번역본, 국립환경과학원 (2014).
12. 이동진, 일본의 메탄가스화 시설장비 매뉴얼 -음식물류폐기물을 중심으로번역본, 국립환경과학원 (2014).
13. 이동진, 미국의 혐기성 슬러지 소화 운영 매뉴얼번역본, 국립환경과학원 (2014).
14. Angelidaki, I and Sanders, W., "Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants", Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 3, pp. 117 ~ 129 (2004).
15. 환경부, 폐기물처리시설 세부 검사방법에 관한 규정, (2011).
16. WPCF, Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants, Manual of Practice No 11, 2nd ed., (1990),
17. Oechsner, Hans, Europäische patentanmeldung patentblatt, Anmeldenummer, 49, (2008).
18. Sahm, H, Biologie der methanbildung, chemie-ingenieur technik, 53, Nr. 11. (1981)
19. Her, Jiunn-Jye. and Huang, Ju-Sheng., "Influences of carbon source and C/N ratio on nitrate/nitrite denitrification and carbon breakthrough", Bioresource Technology, 54(1), pp. 45 ~ 51 (1995).
20. Natuscka, M. and Lee, T. W., "The different carbon sources on respiratory denitrification in biological wastewater treatment, Journal of Fermentation and Bioengineering", 82(3), pp. 277 ~ 285 (1996).
21. Srinandan, C. S., Glen, D., Srivastava, N., Nayak, B., "Anuradha S. Nerurkar, Carbon sources influence the nitrate removal activity, community structure and biofilm architecture", Bioresource Technology, 117, pp. 292 ~ 299 (2)