



SPECIAL FEATURE

특집  
ISSN 1225-6498

## 음식물류폐기물의 고효율 바이오가스화를 위한 설계 및 운전 기술지침 마련 연구(Ⅲ)

- 설계 및 운전 지침(안) 중심으로

이동진, 강준구, 이수영, 김기현, 배지수<sup>†</sup>

국립환경과학원 폐자원에너지연구과

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

- Final Items of Technical Guideline of the Installation and Operation

Dongjin Lee, Junkyu Gang, Suyoung Lee, Kiheon Kim, Jisu Bae<sup>†</sup>

National Institute of Environmental Research  
Environmental Resource Research Department, Waste to Energy research Division

#### 목 차

1. 서론
  2. 연구방법
    - 2.1 연구방법 체계도 및 흐름도
    - 2.2 현장조사
    - 2.3 시설진단
    - 2.4 정밀모니터링
  3. 연구결과
    - 3.1 외국의 바이오가스화 시설의 기술지침서 현황
    - 3.2 현장조사 결과
    - 3.3 정밀모니터링 결과
    - 3.4 기술진단 결과
  4. 음식물류폐기물 바이오가스화 시설의 기술지침(안)
    - 4.1 설계 지침(안)
    - 4.2 운전 지침(안)
  5. 결론
- 참고문헌

<sup>†</sup>Corresponding author(dongj7@korea.kr)

## 4. 음식물류폐기물 바이오가스화 시설의 설계 지침(안)

본 연구에서는 음식물류폐기물 바이오가스화 시설에 대한 운영 실태조사를 기반으로 바이오가스화 시설의 세부 검사방법에 대한 적정성을 검토하여 관리방안을 제안하고자 한다.

### 4.1 전체 사항

#### 4.1.1 바이오가스화 시설 공정 흐름

일반적인 음식물류폐기물 바이오가스화 시설은 [Fig. 10]와 같은 흐름으로 구성된다. 혐기성 소화 공정에서 음식물류폐기물은 반입 및 전처리 설비를 거쳐 혐기성 소화설비로 유입된다. 소화조 설비에서 발생하는 슬러지는 소화슬러지 설비로 유입되어 탈수처리를 거치게 되며 이 과정에서 탈수케익을 생산하게 된다. 탈수처리 과정에서 발생하는 탈리액은 폐수처리설비로 이송되어 처리 및 방류된다. 혐기성 소화설비에서 발생하는 소화가스(바이오가스)는 소화가스 이용설비에서 불순물들을 정제하여 에너지원으로 쓰일 수 있도록 하고 있다.

#### 4.1.2 시설용량 산정

아래 [Fig. 11]에 요일별·월별 음식물류폐기물의 1인당 발생량을 나타내었으며, 발생량은 각각

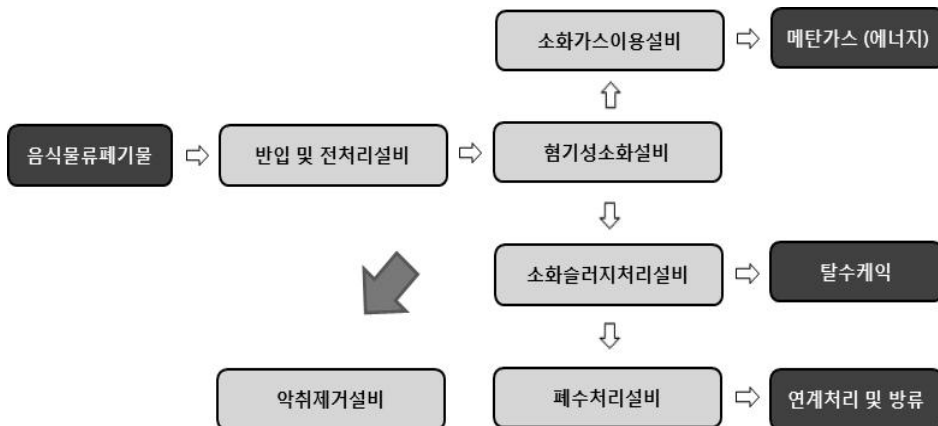
약 100 %, 30 %의 변화를 보인다. 토·일요일은 적은 양이 유입되며, 월·화요일에는 평균치의 약 2배의 양이 유입되는 등 그 차이가 크다. 음식물류폐기물의 시설 반입량 변화폭이 매우 크기 때문에 현재의 평균 처리용량(예, 100 톤/일)으로는 안정적인 시설 운영이 어려운 실정이다. 시설용량을 처리용량과 여유율(10~30 %)의 합으로 산출하여 상기 문제점을 해결할 수 있을 것이다. 예를 들어 기존 시설용량이 100 톤/일인 시설의 경우, 향후 처리용량은 100 톤/일에 여유율 20 톤/일을 합하여 시설용량 총 120 톤/일로 산출한다.

#### 4.1.3 기술지침서 제한사항

음식물류폐기물 바이오가스화 시설 중 소규모(시설용량 50 톤/일 이하) 시설은 전처리 및 소화 공정 등 전체적으로 2계열화를 하지 않아도 된다. 또한 음식물류폐기물의 바이오가스화 시설은 지역별, 유입물 물성별, 계절별, 공법별 특성이 다를 수 있으므로 이 지침서에서 제시하는 내용과 상이할 경우는 지자체(민간 시설의 경우는 시공사)에서 전문가 회의 또는 위원회 등을 거쳐서 별도로 적용할 수 있다.

### 4.2 반입 및 전처리설비 공정

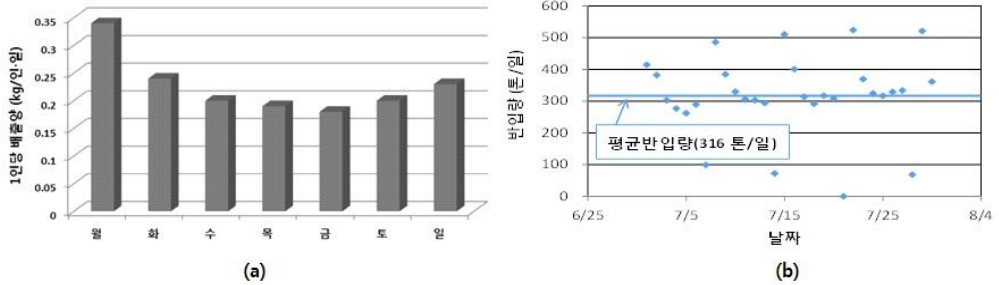
반입 및 전처리설비는 유입되는 음식물류폐기물 성상 및 이물질, 배출특성, 이송 배관, 투입설



[Fig. 10] Typical process of bio-gasification facilities.

비, 저장조 등에 유의해야 한다. 이하 반입 및 전처리설비에 대한 지침사항은 부록 [Table

10], [Table 11], [Table 12]에 수록하였다.



[Fig. 11] (a) Daily amount per person., (b) Intake amount in bio-gasification facilities of food waste.

[Table 10] Design & Operation Guidelines of Import Storage Hopper

문 제 점	가이드라인 제시	비 고
1) 요일별, 계절별 발생량 편차가 매우 큼	- 폐기물 밀도(0.7~0.9 kg/m <sup>3</sup> ) 고려하여 용량을 계산 - 최소 2일, 권장치 3일 이상 저장이 가능하도록 용량 산정	
2) 저장호퍼 내부의 부식 문제 발생	- 호퍼 내부는 내부식성 재질로 코팅	
3) 동절기 호퍼 내 폐기물 동결 문제	- 호퍼 내 가온설비(스팀, 온수 등) 설치	권장사항
4) 호퍼 하부 침출수 발생 문제	- 호퍼 하부 드레인 밸브 및 타공망 설치	
5) 호퍼 내부 브릿징 현상 발생	- 진동 장치 등 브릿징 제거설비 설치	권장사항
6) 하부 이송 컨베이어 막힘 문제	- 하부 이송컨베이어의 2계열화	
7) 악취방지	- 반입장은 에어커튼식 및 전동셔터, 악취 확산 방지 - 투입실 안식각을 5° 이상 - 바닥 청소용 및 차량 청소용 공정수 배관 설치	권장사항

[Table 11] Design & Operation Guidelines of Pre-treatment Facility

문 제 점	가이드라인 제시	비 고
1) 전처리설비의 처리효율 확립 필요	- 파쇄기 효율은 목표입경을 설정하여 계획	
2) 폐기물 파쇄 목표입경 확립 필요	- 10~20 mm 이하로 계획	권장사항
3) 잦은 고장으로 유지 보수 어려움	- 2계열 이상의 계열화를 통한 유지보수 - 운영시간을 주간 8시간 기준, 한 Line이 고장시 다른 Line이 16시간 운영하도록 함	
4) 목표입경 기준 불확실	- 파쇄설비 후단 목표입경에 적합한 스크린 설치 - 완전혼합을 바탕으로 용도에 따라 체류시간 최소 2일 권장치 3일 계획, 2조 이상 원칙	
5) 중간저장조(저류조) 기준 미확립	* 산발효조가 있는 경우 또는 건식처리의 경우는 저장조를 설치하지 않을 수 있음	

[Table 12] Design & Operation Guidelines of Conveying Systems

문 제 점	가이드라인 제시	비 고
1) 펌프의 잦은 고장 및 막힘	- 모든 펌프에 예비대수 적용	
2) 배관의 잦은 막힘	- 이송배관 최소 관경 : 150A(소화 전), 200A(소화 후)	
3) 배관 막힘시 유지보수 어려움	- 직관부는 10~20 m 마다 플랜지 접합 - 곡관부는 밴딩 접합 - 상습 막힘 예상 구간에 세척수 노즐 설치	
4) 배관 유지보수시 폐기물 누출	- 플랜지 및 밴딩 접합부에 배수피트 설치	

### 4.3 혐기성소화 공정

혐기성소화 설비는 높은 온도(35 ℃ 혹은 55 ℃) 조건에서 혐기성 미생물을 이용하여 유기물을 분해하는 시설이다. 혐기성 미생물의 성장속도가 느리기 때문에 온도, 부하량 변화, pH, 체류시간, 암모니아, 휘발성지방산, 독성물질, 교반,

가스발생량 등의 소화조 운전 주의사항을 유의해야 한다. 따라서 온도측정 장치, 침전물 제거, 소화조 유입배관, 상부 스크럼 제거장치 등의 대응 방안을 마련하여 상기 문제를 해결할 수 있도록 조치하여야 한다. 자세한 내용은 부록 [Table 13]에 수록 하였다.

[Table 13] Design & Operation Guidelines of Anaerobic Digestion Facility

문 제 점	가이드라인 제시	비 고
1) pH 설계 기준	- 단단소화조: 6.5~8.0 - 이상소화조(산발효조) : 4.5~6.5 - 이상소화조(메탄발효조) : 7.0~8.0	± 1.0 이내
2) 소화 온도 설계 기준	- 중온소화: 30~40 ℃ - 고온소화: 50~60 ℃	± 2.0 이내
3) 음식물 온도 기준 상이	- 동절기 (4 ℃), 하절기(25 ℃)	
4) 저해인자 농도 기준	- Volatile Acid : 4,000 mg/L 이하	
5) 소화일수 설계 기준	- 중온소화 : 15일 이상 - 고온소화 : 10일 이상	
6) 교반 성능 평가 방법 없음	- 교형물 온도 편차 : 최상부 - 최하부 ±1 ℃ - 교형물 농도 편차 : 최상부 - 최하부 ± 10 %	
7) OLR(유기물부하) 기준 필요	- VS Base : 1.5~4.0 kgVS/m <sup>3</sup> · day - VS Base : 2.5~5.0 kg-CODcr/m <sup>3</sup> · day	습식 건식
8) 소화조 유입 불균형	- 유입펌프, 배관 및 소화조 2계열로 구성	권장 사항
9) 가스발생량 과소설계	- 최소 설계 기준 : 0.48 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kgVS 이상 - 시설 설계 기준 : 0.48~0.65 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kgVS ※ 습도를 제거한 건조가스로서 시설설계 기준 0.35~0.48 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kgVS	습윤 가스 기준
10) 소화조교반효율 저하	- 하부 침적물 배출: 경사각 1/12 이상, 드레인 밸브 - pH meter, 온도계, Level Gage 설치	
11) 소화조 감시 제어 어려움	- 투시창 및 점검맨홀 설치 - 시료채취 장치 설치	권장 사항
12) 상부 스크럼, 하부 침전물 제거장치	- 레이크 · 스크류 회전, 스크럼층에 소화가스로 교반, 상등수 살수 등으로 스크럼 제거 - 하부 침전물 제거 및 배관장치 설치	

#### 4.4 소화가스 이용 공정

혐기성소화 설비에서 생산되는 소화가스량에 따라 저장 및 무해화하는 시설을 말한다. 소화가스의 생산량은 유동적이므로 일정한 사용을 위하여 소화가스 저장조에 중간저장을 한다. 소화가스 저장조에 추가 저장이 불가능하거나 유지관리가 필요할 경우, 잉여가스 연소기를 설치하여 무해한 가스 상태로 폐기하여야 한다. 소화가스 이용설비에 대한 지침사항은 부록 [Table 14]에 수록하였다.

#### 4.5 소화슬러지 처리 공정

소화된 슬러지는 탈수 전 농축과정을 거쳐 탈리액과 슬러지케익으로 분리되며, 탈수된 슬러지 케익은 이송과정을 거쳐 반출되게 된다. 따라서 소화액의 특성 및 슬러지 함수율에 만족하는 탈수기, 약품 투입률, 이송수단 등을 고려해야 한다. 이하 소화슬러지 처리설비에 대한 자세한 지침사항은 부록 [Table 15]에 수록하였다.

#### 4.6 폐수처리 공정

폐수처리설비는 음식물류폐기물의 소화 및 탈수 후 발생하는 폐수를 처리하는 곳이다. 일반적인 음식물류폐기물 폐수성상은 C/N비 1.7~3.9로 매우 낮은 것이 특징이다. 적정 폐수처리 운영인자(C/N비, 체류시간, 온도, pH 등)를 고려하여 발생폐수 특성에 맞는 적정 공법을 선택할 수 있도록 해야 한다. 폐수처리설비 관련 지침사항은 부록 [Table 16]에 수록하였다.

#### 4.7 악취제거 공정

음식물류폐기물 처리시설에서 발생하는 악취는 대부분 고농도 악취를 발생시킨다. 처리시설을 완전 밀폐로 구성하여도 일부 누출이 불가피하므로 완벽한 포집이 이뤄질 수 있는 설비를 구성하여야 한다. 또는 악취 제거를 위하여 환기횟수, 적정 악취제거 방식 선정, 모니터링 등의 방안을 마련하여 악취 문제를 대비할 수 있도록 해야 한다. 악취제거 설비에 관한 지침사항은 부록

[Table 14] Design & Operation Guidelines of Facility Using Biogas

문 제 점	가이드라인 제시	비 고
1) 소화가스 저장조 용량 부족	- 시설 설계 기준 : 0.48~0.65 Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kgVS - 일 가스발생량의 1/4 저장용량 확보 (최소 3시간 이상)	
2) 잉여가스연소기 설치 기준 및 용량	- 단위공정 및 설비의 외면으로부터 10 m 이상 이격 - 소화가스저장조로부터 20 m 이상 이격 - 시간당 가스발생량의 200 % 이상으로 계획	
3) 적용 관련법규의 미확립	- 소화가스 연료 품질기준 - 도시가스 연료 품질기준 - 「도시가스사업법」에 천연가스 외의 가스제조시설로 구분되어 시설기준, 기술기준, 감리 및 정기검사 등	

[Table 15] Design & Operation Guidelines of Digested Sludge Treatment Facility

문 제 점	가이드라인 제시	비 고
1) 탈수케익 활용을 위한 함수율 기준	- 퇴비화 및 펠렛화 : 관련법에서 제시하는 함수율 - 필요시 함수율 조절용 톱밥 등 부자재 혼합 고려	
2) 탈수케익 반출	- 최소 2일 이상, 권장치 3일 이상 저장이 가능하도록 계획 - 악취확산 방지 필요	권장 사항
3) 이송설비	- 이송펌프 2 계열화 - 이송배관 150A 이상	권장 사항

[Table 17]에 수록하였다.

### 5. 운전지침(안)

#### 5.1 운전 요인

5.1.1 운전인자(온도, pH, 유기물부하율, 메탄생성률 등)

혐기성소화조 운전시 온도, pH, 유기물부하율(OLR) 등 주요 인자를 고려해야 한다. 다음 [Table 18]은 혐기성 소화조 운전시 주요인자 값을 나타냈다.

혐기성과정은 중온(30~40 °C), 고온(50~60 °C) 범위에서 진행이 되므로 소화조 내 온도가 일정하게 유지되도록 운전해야 한다. 온도 측정

[Table 16] Design & Operation Guidelines of Wastewater Treatment Facility

문 제 점	가이드라인 제시	비 고
1) 낮은 C/N Ratio	- 필요시 외부탄소원 투입	
2) 폐수처리 온도 상승	- 최적 온도 범위 : 5~30 °C - 필요시 냉각설비를 적용	
3) 질산화에 의한 pH 저감	- 상시 pH 7.0~8.0 범위 내에서 운전 - pH 저감을 위한 약품 투입	
4) 연계처리 기준	- 연계처리 유입하수 오염 부하량의 10 % 이내	

[Table 17] Design & Operation Guidelines of Odor Removal Facility

문 제 점	가이드라인 제시	비 고
1) 환기횟수 기준 미확립	- 고 농 도 : 싯탈취 (12 회/hr 이상) 기기탈취 (15 회/hr 이상) 국소탈취 (15 회/hr 이상) - 중저농도 : 싯탈취 (8 회/hr 이상) 기기탈취 (12 회/hr 이상) 국소탈취 (10 회/hr 이상)	
2) 주요 악취원인 물질	- 황화합물 : 황화수소, 메틸머캅탄 - 질소화합물 : 암모니아, 트리메틸아민 - 알데하이드류 : 아세트, 프로피온, 뷰틸	
3) 모니터링 기준농도 오류	- 배출허용기준 보다 10~20 % 낮게 설정 추천	권장 사항

[Table 18] The Main Operation Factor in the Anaerobic Dgester(food waste leachate standards)

구 분	참고값		
pH	1 phase	6.5 ~ 8.0	
	2 phases	acidogenic	4.5 ~ 6.5
		methanogenic	7.0 ~ 8.0
temperature, °C	mesophilic	30 ~ 40	
	thermophilic	50 ~ 60	
OLR, kgVS/(m3-d)		1.5 ~ 4.0(습식 기준)	
		2.5 ~ 5.0(건식 기준)	

에 사용하는 센서는 다양한 높이에 설치하여 각 층의 교반을 확인할 수 있도록 한다.

혐기성소화조 내부에서 일어나는 생물학적 과정은 pH 영향을 크게 받는다. 다양한 분해단계에 참여하는 미생물의 최적 pH 범위가 다르므로 이를 유의해야 한다. 산형성 미생물은 4.5~6.5, 메탄형성균은 7.0~8.0로 각각의 pH 최적 범위를 넘지 않도록 해야 한다. 또한 pH 변동이 급격히 일어나지 않도록 관리하는 것이 매우 중요하고, 휘발성지방산 값의 변화가 사전에 발생되는 것에 주의해야 한다.

소화조 반입량은 유기물부하율로 조절하는 것이 바람직하다(1.5~4 kg<sub>VS</sub>/m<sup>3</sup>·day). 음식물류폐기물 자체를 혐기 소화하는 건식 소화방식은 5.0 kg<sub>VS</sub>/m<sup>3</sup>·day 이하로 관리할 것을 권장한다. 유기물부하율은 평균보다 상한 값으로 관리되어야 한다.

메탄가스생성률은 유기물 분해율과 혐기성소화의 효율을 파악하는데 가장 명확한 인자이다. 소화가 원활하게 이루어지는 경우의 습윤가스 기준 바이오 가스량은 평균 0.48 Nm<sup>3</sup><sub>CH<sub>4</sub></sub>/kg<sub>VS</sub> 정도이다. 실제 운전시 0.5 Nm<sup>3</sup><sub>CH<sub>4</sub></sub>/kg<sub>VS</sub> 이상의 가스가 발생하는 경우가 많다. 따라서 최소 설계기준은 0.48 Nm<sup>3</sup><sub>CH<sub>4</sub></sub>/kg<sub>VS</sub>이고, 시설 설계기준은 0.48~0.65 Nm<sup>3</sup><sub>CH<sub>4</sub></sub>/kg<sub>VS</sub>가 적정하다.

소화가스에서 습도를 제거하면 건조가스 기준 바이오가스량은 습윤가스에 비하여 20~25 %

정도 감소한다. 바이오가스에 함유된 습도는 고온/고압이며, 여러 가스 유량계 측정방법에 따라 현장의 습윤가스량과 건조가스량의 차이가 발생한다. 따라서 음식물류폐기물 특성에 따른 정확한 가스측정을 위하여 BMP Test를 사용하여 적정 값을 선정할 것을 권장하고, 시공 후 소화가스 저장조 용량 부족과 같은 문제가 발생하지 않도록 면밀한 점검이 필요하다.

### 5.1.2 저해요인

혐기성소화공정의 제한 및 정지 원인으로 작용하는 것은 휘발성지방산(VFA), 암모니아, 중금속 등이 있다. 이러한 원인물질은 혐기성소화조 내에서 적정 농도로 유지되어야 하며, 그 농도 수준을 넘어서면 혐기성 미생물의 증식을 억제한다. 다음의 [Table 19]에 혐기성소화공정에서의 제한·정지 원인물질을 나타내었다.

일반적으로 휘발성지방산은 3,000 mg/L 이하로 관리할 것을 권장하고 있다. 음식물류폐기물은 4,000 mg/L 이하까지 큰 장애가 일어나지 않는 것으로 알려져 있지만 4,000 mg/L 이상에서는 혐기소화 장애가 발생하는 것을 볼 수 있었다. 본 연구보고서에서는 미국에서 사용되고 있는 알칼리도와 휘발성지방산 측정 수분석 방법을 부록 V에 제시하였다.

질소를 함유한 유기물이 분해될 때에 질소가 암모니아성 질소(NH<sub>3</sub>-N)로 변환된다. 암모니아

[Table 19] Impeding Factors of the Anaerobic Digestion16

구분	저해 농도 (mg/L)
휘발성지방산 (VFA)	> 4,000 (at acetic acid)
암모니아	> 3,000 (at pH > 7.6)
황화물 (수용성)	> 3,000
칼슘	2,500 ~ 4,500
마그네슘	1,000 ~ 1,500
칼륨	2,500 ~ 4,500
나트륨	3,500 ~ 4,500
구리	> 0.5
카드뮴	> 150
철	> 1,700

Source : WPCF, Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants, Manual of Practice No 11, 1990, Vol III, 2nd ed.을 참조하여 음식물류폐기물 특성을 고려하여 재작성함.

는 물에 해리되어 암모늄을 형성한다. 질소는 세포 분해시 필요한 필수 영양소이다. 하지만 다른 측면에서 기질 내 포함된 암모니아/암모늄의 농도가 높으면 메탄 형성을 억제한다. 미생물 억제 작용은 해리되지 않은 부분, 즉 암모니아에서 기인하며 증온보다 고온 조건에서 암모늄이 예민하게 반응한다. 제한농도는 암모늄이온이 3,000 mg/L 이상이고, 암모니아(free NH<sub>3</sub>) 농도는 150~1,200 mg/L로 연구자마다 다양하다.

### 5.1.3 미량원소

미량원소 부족시 메탄생성미생물의 활성이 저하되어 가스 생산량이 줄어들고 휘발성지방산이 증가하며 장기적으로는 pH가 낮아지는 문제가 발생한다. 정확한 메커니즘과 실질적인 제한물질은 확인되지 않았지만, 미량원소 주입 효과는 확연한 것으로 보고 있다. 미량원소 첨가시 농도가 높을 경우 억제 작용이 발생할 수 있으며, 유독물질로 간주되는 중금속이라는 점을 유의해야 한다. 다음 [Table 20]은 개별원소의 기준 값을 나타낸다.

### 5.1.4 스킴층 및 거품형성

스킴층은 섬유질 함유 기질을 이용하는 플랜트에서 주로 발생한다. 스킴층을 적합한 교반기로

교반하지 않으면 수 미터 두께로 증가하고 그렇게 되면 수동으로 제거해야 한다. 또한 플랜트 운전자가 검사창을 통해 육안으로 검사하여야 한다. 스킴제거 방법에는 수면에 설치된 레이크(rake)나 스크루 회전, 펌프를 사용하여 상등수를 수면 상부와 하부에 설치된 노즐을 통하여 스킴층 위에 살수, 소화가스를 소화조 수면 부근에 주입하여 교반 등이 있다.

거품은 표면장력 감소시 발생하는 현상으로, 가스라인이 폐색되거나 소화조 내 압력이 과압력으로 형성될 경우 문제를 일으킨다. 초음파 센서와 같은 측정기술을 이용하고 거품제거제를 이용하는 등 거품형성을 예방해야 한다.

## 5.2 운전모니터링 항목 및 주기

바이오가스화 시설의 정상운영 상태를 파악하기 위해서 주요 항목에 대한 주기적 측정 및 기록·관리가 중요하다. 음식물류폐기물 바이오가스화 시설의 운전모니터링 항목 및 측정·기록 주기는 [Table 21]에 정리하였다. 추가 측정 항목은 소화조의 안전성 확보에 필요한 항목이지만 측정 장비 및 인력이 요구되며 시설 실정에 맞게 운영할 수 있다.

## 5.3 운전 체크리스트(안) 마련

[Table 20] Reference Values of Trace Elements<sup>17, 18</sup>

원소	기준값 <sup>17</sup> (mg/kgTS)	기준값 <sup>18</sup> (mg/L)
코발트(Co)	0.4~10 (최적 1.8)	0.06
몰리브덴(Mo)	0.05~16 (최적 4)	0.05
니켈(Ni)	4~30 (최적 16)	0.006
셀레늄(Se)	0.05~4 (최적 0.5)	0.008
텅스텐(W)	0.1~30 (최적 0.6)	-
아연(Zn)	30~400 (최적 200)	-
망간(Mn)	100~1,500 (최적 300)	0.005~50
구리(Cu)	10~80 (최적 40)	-
철(Fe)	750~5,000 (최적 2,400)	1~10

Source : Oechsner, Hans et al., 2008, H. Sahm., 1981



[Table 21] Operation Factor Lists and Measuring Periods

운전 인자	단위	주기
유입량	톤	매일
온도	℃	매일
pH	-	매일
가스 생산량	m <sup>3</sup>	매일
바이오가스 조성	메탄 vol %, 이산화탄소, 황화수소, 선택적으로 산소	매일
가스 생산율	m <sup>3</sup> /kg <sub>VS</sub>	매일
유입부하율	kg <sub>VS</sub> / m <sup>3</sup> ·d	매일
체류 시간	d	매일
휘발성지방산	mg/L	매일
소화슬러지 발생량	kg <sub>TS</sub> /m <sup>3</sup> , kg <sub>VS</sub> /m <sup>3</sup>	매주
추가 측정		
총질소(TN)	mg/L	매주
유입물의 TS, VS	%	매주
유출물의 TS, VS	%	매주
알칼리도	mg/L	매주
COD <sub>Cr</sub>	mg/L	매월
유분	mg/L	필요시
미량 원소	mg/L	필요시

상기 내용에서 제시된 운전인자를 이용하여 운전 체크리스트를 부록에 제시하였다. 운전조건은 처리량과 소화조 운전인자, 그리고 유입물에 대한 것으로 소화조의 안정적인 운영을 점검하는 것이다. 소화조 온도, pH 뿐만 아니라 변화폭을 점검해야 하며, 소화조 유입물의 유기물부하율 관리가 중요하다. 운전 효율성은 유기물분해율과 메탄가스생성률을 점검하는 것으로 이루어지며, 음식물류폐기물의 처리 정도와 바이오가스화 시설의 생산성을 확인할 수 있다.

운전조건 및 효율성을 점검한 후, 세세한 파악을 위해서 메탄 함량, VFAs, 알칼리도, 암모니아성 질소, C/N비 등을 기본적으로 점검하여야 한다. 특히 VFAs 농도는 소화조 현재 상태를 가장 정확하고 민감하게 알려주는 지표이므로 필히 점검해야 하는 항목이다. 더욱 자세한 내용은 부록 [Table 22]과 [Table 23]에 나타내었다.

## 6. 결론

본 연구에서는 음식물류폐기물 바이오가스화 시설에 대한 현장조사, 정밀모니터링, 기술진단 등을 실시하고 현장시설의 문제점 및 개선방안을 파악하여 바이오가스화 시설의 설계 및 운영 기술지침(안)을 제안하고자 한다.

1. 고효율 시설(음폐수 톤당 바이오가스 생성량 30 Nm<sup>3</sup>/ton) 6개소를 대상으로 정밀모니터링을 실시하였다. 정밀모니터링 결과 VS 기준 유기물분해율 평균 82.2 %, COD 제거율은 73.6 %, 영양 성분 분해율은 탄수화물 52 %, 지방 67 %, 단백질 9.6 %, 휘발성지방산은 유입 5,998 mg/L, 유출 1,239 mg/L, 암모니아성 질소는 유입 759.7 mg/L, 유출 1,698.9 mg/L, 총인은 유입 413.6 mg/L, 유출 156.34 mg/L 등으로 조사되었다.
2. 전국 10개 음식물류폐기물 바이오가스화 시설

[Table 22] Example of Operation Checklists (1)

항목		성능 기준	운전 현황	비고	
운전 조건	처리량 (톤/일)	음식물류폐기물			
		음폐수			
	소화조 운전	온도 (°C)			
		pH			
		체류일자(일)			
		유기물부하율 (kg VS/(m <sup>3</sup> · day))			
유기물부하율 (kg COD/(m <sup>3</sup> · day))					
소화조 유입물	TS (%)				
	VS (%)				
	CODcr (mg/L)				
운전 효율	처리효율 (%)	TS			
		VS			
		CODcr			
	바이오가스	발생량 (Nm <sup>3</sup> /일)			
		CH <sub>4</sub> 함량(%)			
		VS 유입당			
	바이오가스 생성율 (Nm <sup>3</sup> /kg)	VS 제거당			
		CODcr 유입당			
		CODcr 제거당			
		유입물 톤당			
	메탄생성율 (Nm <sup>3</sup> /kg)	VS 유입당			
		VS 제거당			
		CODcr 유입당			
		CODcr 제거당			
		유입물 톤당			

[Table 23] Example of Operation Checklists (2)

항목	성능 기준	운전 현황	비고
소화조 온도(°C)	(± )	(± )	중온 ± 2 이내 고온 ± 1 이내
소화조 pH	(± )	(± )	7.0~8.0 적합
유기물부하량(kg vs/(m <sup>3</sup> · day))	(± )	(± )	4.0 이하 추천(습식) 공법에 따라 상이
유기물부하량(kg COD/(m <sup>3</sup> · day))	(± )	(± )	
메탄 함량(%)	(± )	(± )	보통 55~70
휘발성지방산(VFAs, mg/L)		(± )	4,000 이하 적합
알칼리도(mg/L)		(± )	
휘발성지방산/알칼리도		(± )	0.2~0.3 이하 적합
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)		(± )	
NH <sub>3</sub> (mg/L)		(± )	
C/N비		(± )	10~30
유분(n-Hexanol 추출) (mg/L)		(± )	

을 대상으로 기술진단을 실시하여 시설 효율성 및 안정성을 점검하였다. 기술진단 결과 고효율시설(메탄생성률 0.50 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kg<sub>VS</sub> 이상, 유기물 분해율 70 % 이상 등)은 6개소, 고효율이며 안정적인 운영시설(유기물 분해율 70 % 이상, 적정 온도 및 pH 유지, 유기물부하율 4.0 kg<sub>VS</sub>/(m<sup>3</sup>·day) 이하 등)은 3개소, 계절적 변동에 의한 장애시설 3개소(여름철 산발효조 운영 개선, 겨울철 음식물류폐기물의 해빙 등), 잦은 설비결합 시설은 2개소(전처리시설의 잦은 고장, 저장조의 추가설치 필요 등) 등으로 조사되었다.

3. 효율적인 바이오가스화 시설 설계를 위하여 시설용량 산정과 공정별 설계 지침(안)을 제안하였다. 시설용량은 요일별·계절별 시설반입량을 고려하여 처리용량에 여유율(처리용량의 10~30 %)을 더하여 산정하였다. 각 공정별 지침(안)은 전처리공정에 호퍼 저장공간 3일 이상, 배관크기 150A 이상 등, 혐기성소화공정에 상부 스크, 하부 침전물 제거 등, 소화가스 이용 공정에 가스발생량 0.48 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kg<sub>VS</sub> 이상 등, 약취 제거 공정에 환기 횟수 기준 마련 등을 제안하였다.
4. 바이오가스화 시설의 운전인자로는 pH, 온도, 유입물부하량 등을, 저해인자로는 휘발성지방산, 암모니아, 미량원소 등을 고려해야 한다. 운전 지침(안)은 운전인자에 대하여 pH(산발효조 5.0~6.2, 메탄발효조 7.0~8.0), 온도(중온 30~40 °C, 고온 50~60 °C), 유기물부하율(4.0 kg<sub>VS</sub>/(m<sup>3</sup>·day) 이하, 습식기준) 등이고, 저해인자에 대하여 휘발성지방산(4,000 mg/L 이하), 암모니아(3,000 mg/L 이하), 미량원소(코발트 0.4~10 mg/kg<sub>TS</sub>, 몰리브덴 0.05~16 mg/kg<sub>TS</sub>, 니켈 4~30 mg/kg<sub>TS</sub> 등) 등을 제안하였다. 또한 음식물류폐기물 바이오가스화 시설의 정상운영 여부를 파악할 수 있도록 운전 체크리스트를 제공하였다.

## References

1. [환경부, 폐기물 에너지화사업의 경제성 분석 연구]  
Ministry of Environment, Economic analysis of waste-to-energy project, Ministry of Environment, South Korea. (2008).
2. [환경부, 2012 전국폐기물 발생 및 처리현황]  
Ministry of Environment, The status of waste generation and treatment in Korea, Ministry of Environment, South Korea (2013).
3. [환경부, 음식물류폐기물 처리시설 발생폐수 육상처리 및 에너지화 종합대책]  
Ministry of Environment, Comprehensive plan of energization and land disposal of food waste leachate, Ministry of Environment, South Korea. (2007).
4. Weiland, P., "Biogas production: current state and perspectives", Applied Microbiological Biotechnology, 85. pp. 849~860. (2010).
5. [환경부, 폐기물공정시험방법]  
Ministry of Environment, Official Waste Testing Method, Ministry of Environment, South Korea. (2014).
6. [환경부, 식품공정시험방법]  
Ministry of Food and Drug Safety, Official Food Testing Method. General testing method 1.1.5.1.1. Ether extraction method, South Korea, (2012).
7. [환경부, 수질오염공정시험방법]  
Ministry of Environment, Official testing method with respect to water pollution process. South Korea. (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. FNR(Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe), Handout of biogas production and utilization. (2013).
12. Ministry of Environment, Manual of Facility on Methane-Gasification of Organic Wastes, Japan. (2008).
13. Zickefoose, c., Hayes, R. B. J., Operation manual anaerobic sludge digestion, EPA 430/9-76-001. (1976).
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]  
Ministry of Environment, Rules on Detailed Inspection Method of Waste Treatment Facility, South Korea. (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(11). (1981)
19. Her, J.. and Huang, J., "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", J. 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. (2012). 