

## 가축분뇨 병합처리 바이오가스화를 위한 설계 및 운전 기술지침 마련 연구(III) 설계 및 운전 지침(안) 중심으로

이동진, 문희성, 손지환, 배지수<sup>†</sup>

국립환경과학원 폐자원에너지연구과

## A Study on Establishment of Technical Guideline of the Installation and Operation for the Efficient Bio-gasification Facility of Pig Manure and Food Waste(III): Design and Operation Guideline

Dongjin Lee, HeeSung Moon, Jihwan Son, Jisu Bae<sup>†</sup>

Environmental Resource Research Department, National Institute of Environmental Research

(Received: Jun. 2, 2017 / Revised: Aug. 29, 2017 / Accepted: Sep. 7, 2017)

---

**ABSTRACT:** The purpose of this study is to provide a design and operation technical guideline for meeting the appropriate design criteria to bio-gasification facilities treating organic wastes. Based on the results obtained during the field surveys, the overall design and operation guidelines for bio-gasification facilities, monitoring items, cycle and commissioning period were presented. According to the flow of anaerobic digestion process, Various design factors for bio-gasification facilities were proposed in this study. When designing the initial anaerobic digestion capacity, 10 ~ 30% of the treatment capacity was applied considering the discharge characteristics by the incoming organic wastes. At the import storage hopper process, limit concentration of transporting organic wastes was limited to TS 10 % or less, and limit concentration of inhibiting factor was suggested in operation of anaerobic digester. In addition, organic loading rate (OLR) was shown as 1.5 ~ 4.0 kgVS<sub>in</sub>/(m<sup>3</sup>·day) for the combined bio-gasification facilities of animal manure and food wastes. Desulfurization and dehumidification methods of biogas from anaerobic digester and proper periods of liquifization tank were suggested in design guideline. It is recommended that the operating parameters of the biogasification facilities to be maintained at pH (acid fermentation tank 4.5~6.5, methane fermentation tank 6.0~8.0), temperature variation range within 2 °C, management of volatile fatty acid and ammonia concentration less than 3,000 mg/L, respectively.

**Keywords:** Swine manure, Food waste, Anaerobic digestion, Bio-gasification

---

**초 록:** 본 연구는 유기성폐자원 (가축분뇨, 음식물류폐기물, 음식물류폐수 등)을 병합 소화하는 시설을 대상으로

---

<sup>†</sup> Corresponding author(e-mail : [jisubae88@gmail.com](mailto:jisubae88@gmail.com))

적정 설계 기준치를 충족하기 위한 설계 및 운전 기술지침서 마련하고자 현장조사와 정밀모니터링을 실시하였다. 현장조사시 도출된 결과를 바탕으로 설계 및 운전 사항, 모니터링 항목 및 주기, 시운전 기간 등 바이오가스화 시설의 전반적인 가이드라인을 제시하였다. 초기 혐기소화 처리용량 설계시 유입 원료별 배출 특성을 고려하여 처리용량의 10~30 %의 여유율을 적용하였다. 공정별 설계 지침의 경우, 반입 및 전처리 설비의 유기물 반입 농도를 TS 10 % 이하로 제한하고 혐기소화조 운전시 저해요인 제한 농도를 제시하였다. 또한 병합기준 유기물부하율 1.5~4.0 kgVS<sub>in</sub>/(m<sup>3</sup>·day), 소화가스 이용설비는 탈황 및 제습 방법, 호기액비화조의 적정 설계·운영인자 등을 제안하였다. 바이오가스화 시설의 운전인자는 pH (산발효조 4.5~6.5, 메탄발효조 6.0~8.0), 온도변화폭 2 °C 이내, 휘발성지방산과 암모니아를 각각 3,000 mg/L 이하로 유지할 것을 권장하였다.

**주제어:** 가축분뇨, 음식물류폐기물, 음폐수, 병합 소화, 바이오가스화

#### 4. 가축분뇨 병합처리 바이오가스화 시설의 설계 지침(안)

본 연구에서는 가축분뇨와 음식물류폐기물 병합처리 바이오가스화 시설에 대한 운영 실태조사를 기반으로 바이오가스화 시설의 세부 검사방법에 대한 적정성을 검토하여 기술지침(안)을 제한하고자 한다.

##### 4.1. 설계 지침

##### 4.1.1. 시설용량 산정

음식물류폐기물은 지역별, 계절별, 요일별 배출 특성을 고려하여야 하며, 그 배출량 변동 폭이 매우 크다 (Fig. 15 참고).<sup>20</sup> 또한 가축분뇨는 Fig. 16과 같

이 농가 발생원 형태별 (재래식, 슬러리, 스크래퍼, 톱밥 돈사 등), 가축 종류별 (자돈, 육성돈, 비육돈, 모돈, 임신돈 등)에 의하여 배출량 및 농도가 매우 상이하게 배출된다. 따라서 바이오가스화 시설 설계 시 시설용량 산정은 그 특성을 반영하여, 여유율로 시설용량의 약 10~30 % 정도를 감안하여야 한다. 예를 들어 기존 시설용량이 100 ton/day인 시설의 경우, 향후 처리용량은 100 ton/day에 여유율 최대 30 ton/day을 합산하여 시설용량 총 130 ton/day로 산출한다.

##### 4.1.2. 기술지침서 제한사항

가축분뇨 및 음식물류폐기물 병합처리 바이오가스화 시설 중 소규모 (시설용량 20 ton/day 이하) 시설은 전처리 및 소화 공정 등 전체적으로 2 계열화

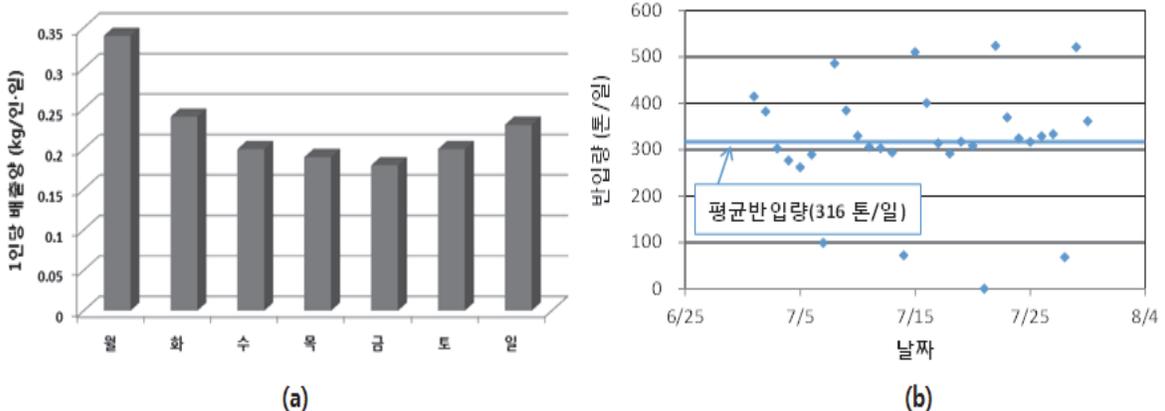


Fig. 15. (a) Daily amount per person., (b) Input in bio-gasification facilities of FW.

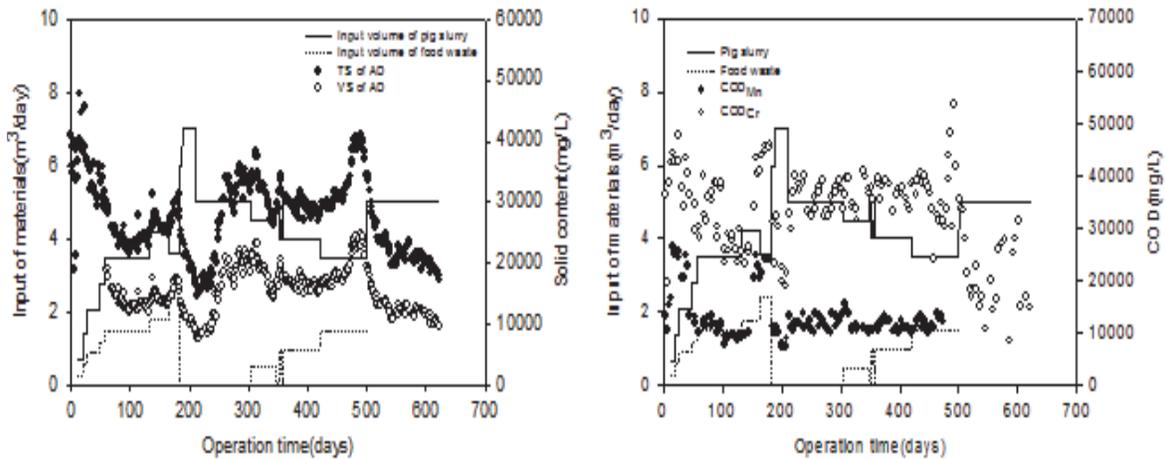


Fig. 16. Input variation of bio-gasification facility in pig manure.

를 하지 않아도 된다. 또한 바이오가스화 시설은 지역별, 유입물 물성별, 계절별, 공법별 특성이 다를 수 있으므로 이 지침서에서 제시하는 내용과 상이할 경우 지자체(민간 시설의 경우는 시공사)에서 전문가 회의 또는 위원회 등을 거쳐서 별도로 적용할 수 있다.

4.1.3. 반입 및 전처리설비 공정

반입 및 전처리설비는 유입되는 가축분뇨, 음식물류폐기물의 성상 및 이물질, 배출특성, 이송 배관, 투입설비, 저장조 등에 유의해야 한다. 특히 가축분뇨의 경우, TS 약 10 % 이상의 원료는 반입을 제한하고 목표입경 5~10 mm로 스크린을 설치하여 이물

질 및 협잡물을 제거해야 한다. 또한 저류조의 용량을 유효용량 5일 이상 저장이 가능하도록 용량을 산정하여야 한다. 이송설비의 경우, 펌프의 고장 및 막힘 현상에 대처하기 위하여 모든 펌프에 예비대수를 적용하여야 한다. 배관 최소 관경은 소화 전 150 A, 소화 후 200 A으로 설계·시공해야 하며, 가축분뇨를 중간저장조 전까지 이송하는 배관은 80~100 A 관경을 적용해야 한다. 이하 반입 및 전처리설비에 대한 지침사항은 Table 6, Table 7, Table 8 에, 이송설비에 대한 지침사항은 Table 9에 수록하였다.

Table 6. Design & operation guidelines of import storage hopper (FW)

구분	문 제 점	GUIDE LINE 제시	비고
FW*	요일별, 계절별 발생량 편차가 매우 큼**	- 최소 2일, 권장치 3일 이상 저장용량 확보	
	폐기물 밀도기준 부재	- 폐기물 밀도 (0.7~0.9 kg/m <sup>3</sup> )를 고려하여 용량 계산 필요	
	저장호퍼 내부 부식 발생**	- 호퍼 내부는 내부식성 재질로 코팅	
	동절기 호퍼 내 폐기물 동결	- 호퍼 내 가온설비 (스팀, 온수 등) 설치	권장사항
	호퍼 하부 침출수 발생	- 호퍼 하부 드레인 밸브 및 타공망 설치	
	호퍼 내부 브릿징 현상	- 진동 장치 등 브릿징 제거설비 설치	권장사항
	하부 이송 컨베이어 막힘	- 하부 이송컨베이어의 2 계열화	
	유입물 온도 설정 필요	- 동절기 (4 ℃), 하절기 (25 ℃)	
악취방지	- 반입장은 에어커튼식 및 전동셔터 적용 - 투입실 안식각을 5° 이상 - 바닥 및 차량 청소용 공정수 배관 설치		

\* FW : 음식물류폐기물, \*\* 음폐수는 음식물류폐기물(FW)의 문제점과 공동으로 해당됨

Table 7. Design & operation guidelines of import storage hopper (AM)

구분	문 제 점	GUIDE LINE 제시	비고
AM*	반입량 및 농도 편차가 매우 큼	- TS 10 % 이상 유입 제한 (돈분의 경우) (예, 축사 저장조 바닥 청소시 배출되는 고농도의 축분) - 저장조의 중간 높이에서 수집, 수거차량에서의 혼합 등을 실시하여 저류조 상·하부의 평균 농도 유입	권장사항
	소독제 과량 투입 관리 필요	- 광학현미경을 이용해 미생물 (원생동물 등) 유동성이 없을시 반입 금지 (예, 다량 소독제가 투입된 축분)	
	유입물 온도 기준	- 동절기 (10 ℃), 하절기 (25 ℃)	
	저류조 용량 설정 필요	- 유효용량 3일 이상 저장이 가능하도록 용량 산정 - 저류조는 2단으로 설치하여 1단 하단의 침전물 제거 - 저류조는 완전혼합 교반하며, 밀폐형 시공 - 음식물류폐기물을 병합처리하지 않거나 소량 병합처리하는 경우 는 중간 저장조로 대체 설치 가능	

\* AM: 가축분뇨

Table 8. Design & operation guidelines of pre-treatment facility

구분	문 제 점	GUIDE LINE 제시	비고
FW*	폐기물 파쇄 목표입경 확립 필요	- 10~20 mm 이하로 계획	
	컨베이어류 설치 기준 미확립	- 스크류 컨베이어: 45°이하 경사각 유지 - 플라이트컨베이어: 20°이하 경사각 유지	권장사항
	조대입자의 소화조 유입문제**	- 5 mm 이하로 계획 권장함	권장사항
	잦은 고장으로 유지 보수 어려움**	- 2 계열 이상의 계열화를 통한 유지보수 - 운영시간을 주간 8 시간 기준, 한 Line 고장시 다른 Line이 16시간 운영하도록 함	
	목표입경 기준 불확실	- 파쇄설비 후단 목표입경에 적합한 스크린 설치	
	유분 제거 미흡	- 유분을 분리·제거할 것을 권장함(배관 막힘과 스크림 제어를 위함)	권장사항
AM*	제거 목표 입경 관리 필요	- 스크린에 의한 제거 목표 입경은 5~10 mm 이하로 설치할 것을 권장함 (왕겨, 가축털 뭉치 등이 제거 가능한 스크린 사양 필요)	
	협잡물 제거	- 제거 목표입경에 맞게 협잡물을 제거해야 하며, ① 중·대 형 협잡물, ② 모발 및 미세 협잡물, ③ 모래, 씨앗 협잡물 등을 제거할 수 있어야함 - 협잡물 제거를 위하여 필요시 2~3 중으로 전처리 설비를 설치해야 함	
	잦은 고장으로 유지 보수 어려움	- 2 계열 이상의 계열화를 통한 유지보수 - 운영시간을 주간 8 시간 기준, 한 Line 고장시 다른 Line이 16시간 운영하도록 함	
공통 사항	중간 저장조에 대한 기준 미확립	- 유효용량 3 일 이상 저장 용량 산정 - 완전혼합 - 2 단 설치 - 안전을 위해 메탄 감지장치 설치	

\* AM: 가축분뇨, FW : 음식물류폐기물

\*\* 음폐수는 음식물류폐기물(FW)의 문제점과 공동으로 해당됨

Table 9. Design & operation guidelines of conveying system

구분	문 제 점	GUIDE LINE 제시	비 고
공통 사항	펌프 고장 및 막힘	- 모든 펌프에 예비대수 적용	
	배관의 잦은 막힘	- 이송배관 최소 관경 : 150 A (소화 전), 300 A (월류 부분), 300A(슬러지 인발 배관) - 가축분뇨만을 중간저장조 이전까지 이송하는 배관은 80~100 A 사용함	
	배관 막힘시 유지 보수 어려움	- 직관부는 10~20 m 마다 플랜지 접합 - 곡관부는 밴딩 접합 - 상승 막힘 예상 구간에 세척수 노즐 설치	
	배관 유지 보수시 폐기물 누출	- 플랜지 및 밴딩 접합부에 배수퍼트 설치	

4.1.4. 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.<sup>14</sup> 따라서 휘발성지방산을 음식물류폐기물의 경우 4,000 mg/L 이하, 가축분뇨는 3,000 mg/L 이하로 소화조를 운영해야 하며, 암모니아성 질소 농도를 3,000 mg/L (pH 7.5 기준)로 유지·관리해야 한다. 또한 유기물부하율

(OLR)을 습식으로 가축분뇨를 단독처리할 경우, 1.0~3.0 kgVS<sub>in</sub>/(m<sup>3</sup>·day)로, 음식물류폐기물과 병합처리하는 경우에는 1.5~4.0 kgVS<sub>in</sub>/(m<sup>3</sup>·day)로 관리해야 한다. 또한 메탄가스 생성율은 순간 부하율 변동을 고려하여 각 원료 (가축분뇨, 음식물류폐기물)의 최대치를 적용하여야 한다. 자세한 내용은 Table 10에 수록 하였다.

4.1.5. 소화가스 이용 공정

소화가스 이용설비는 혐기성소화 설비에서 생산되는 소화가스 발생량에 따라 저장 및 무해화, 에너

Table 10. Design & operation guidelines of anaerobic digestion facility

구분	문 제 점	GUIDE LINE 제시	비 고
	pH 설계 기준	- 단상소화조: 6.5~8.5 - 이상소화조 (산발효조) : 4.5~6.5 (음식물류폐기물 ≥ 50 %) 6.0~8.0 (가축분뇨 ≥ 50 %) - 이상소화조 (메탄발효조) : 7.0~8.5	± 0.5 이내
		소화 온도 설계 기준	- 중온소화 : 35~42 ℃ - 고온소화 : 50~60 ℃
공통 사항	저해인자 농도 기준	- (음식물류폐기물) Volatile Acid : 4,000 mg/L 이하 - (가축분뇨) Volatile Acid : 3,000 mg/L 이하	
	소화일수 설계 기준	- 중온소화 : 최소 20 일 이상 - 고온소화 : 최소 15 일 이상	
	교반 성능 평가 방법 없음	- 고형물 온도 편차 : 상부 - 하부 2 ℃ 이내 - 고형물 농도 편차 : 상부 - 하부 10 % 이내	
	OLR (유기물부하) 기준 필요	<병합처리 경우> - VS 기준(습식) : 1.5~4.0 kg VS <sub>in</sub> /(m <sup>3</sup> ·day) - VS 기준(건식) : 2.5~5.0 kg VS <sub>in</sub> /(m <sup>3</sup> ·day) <가축분뇨 단독처리 경우> - VS 기준(습식) : 1.0~3.0 kg VS <sub>in</sub> /(m <sup>3</sup> ·day) - VS 기준(건식) : 1.5~4.0 kg VS <sub>in</sub> /(m <sup>3</sup> ·day)	

Table 10. Design & operation guidelines of anaerobic digestion facility (continued)

구분	문 제 점	GUIDE LINE 제시	비 고
설비의 잦은 고장으로 운전 관리의 효율성 확보 미흡	- 유입펌프, 배관 및 소화조 2계열로 구성	- 표준상태 (0°C, 1기압)로 수분가 제거된 건가스 시설설계 기준 : 순간 부하율 변동을 고려하여 <b>최대치</b> 를 권장함 0.30~0.48 Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kgVS <sub>in</sub> ( <b>음식물류폐기물</b> ) 0.22~0.35 Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kgVS <sub>in</sub> ( <b>가축분뇨</b> )	권장 사항
가스 발생량 과소 설계	- 실제 시설설계 기준은 현장의 상황을 감안하여 수분, 관내 온도, 고압이 반영되어야 함. 현장 바이오가스는 시설에 따라 다르지만 부피기준으로 대략 20~25 % (평균 23 %) 정도. 따라서 메탄가스생성을 시설 설계 기준 (단독처리) : 순간 부하율 변동을 고려하여 <b>최대치</b> 를 권장함 0.48~0.65 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kgVS <sub>in</sub> ( <b>음식물류폐기물</b> ) 0.30~0.48 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kgVS <sub>in</sub> ( <b>가축분뇨</b> )	- 메탄가스생성을 시설 설계 기준 (병합처리) : $\frac{x_1m + x_2n}{m + n}$ m : 음식물류폐기물의 유입량 n : 가축분뇨의 유입량 x <sub>1</sub> : 음식물류폐기물의 메탄생성을 x <sub>2</sub> : 가축분뇨의 메탄생성을	습윤, 실온 가스 기준
공동사항			
침전물 배출	- 하부 침전물 배출: 경사각 1/12 이상		
소화조 감시 제어 어려움	- pH meter, 온도계, Level Gage 설치 - 투시창 및 점검맨홀 설치 - 시료채취 장치 설치		권장 사항
상부 스크립 및 하부 침전물 제거 장치	- 레이크 스크류 회전, 스크침에 소화가스로 교반, 상등수 살수 등으로 스크립 제거 - 하부 침전물 제거 및 배관장치 설치		
소화조 유입 불균형	- 습식 처리의 경우 가능하면 24시간 균등 투입이 되도록 운전 - 건식 처리의 경우 가능하면 최대한 균등 투입이 되도록 운전		

지화하는 시설을 말한다. 가축분뇨 및 음식물류폐기물 바이오가스화 시설에서 생산되는 바이오가스는 대부분 발전기를 통해 에너지화되므로 사전에 습기, 탈황, 분진 등을 제거하는 것이 매우 중요하다. 또한 소화조 상부 또는 소화가스 발생 직후 시점, 소화가스 이용설비 전단에 가스유량계를 설치하여 정확한 가스발생량 측정이 가능하도록 해야 한다. 또한 발생한 소화가스는 소화가스 저장조에 중간 저장을 하며, 저장조에 추가로 저장할 수 없거나 유지관리가 필요한 경우, 잉여가스 연소기를 설치하여 무해한 가스 상태로 폐기하여야 한다. 소화가스 이용설비에 대한 지침사항은 Table 11에 수록하였다.

#### 4.1.6. 폐수처리 및 액비화 설비

가축분뇨 단독처리시설의 경우, 질소농도가 높고 유기물질이 낮아 혐기소화액의 C/N 비가 10 이하인 것으로 조사되었다. 따라서 적정 폐수처리 및 액비화를 위하여 필요시 외부 탄소원을 주입하거나 폭기 처리를 실시하여야 한다. 호기액비화조의 적정 운영인자 (필요공기량, 체류시간 및 저장고 처리일수 등)를 고려하여 비료관리법<sup>21</sup>에 준하는 액비를 생산·저장할 수 있도록 해야 한다. 폐수처리 및 액비화 설비에 관련된 지침사항<sup>22</sup>은 Table 12에 수록하였다.

Table 11. Design & operation guidelines of facility using biogas

구분	문 제 점	GUIDE LINE 제시	비 고
공통 사항	소화가스 저장조 용량 부족	- 일 가스발생량 (습윤, 실온가스 기준으로)의 1/4 저장용량 확보 (최소 3 시간 이상)	
	잉여가스연소기 설치기준 및 용량	- 단위공정 및 설비의 외면으로부터 10 m 이상 이격 - 소화가스저장조로부터 20 m 이상 이격 - 시간당 가스발생량의 200 % 이상으로 계획	
	적용 관련 법규의 미확립	- 바이오메탄 연료 품질기준 (대기환경보전법 시행규칙 별표 33, KS M 2890) - 「도시가스사업법」에 시설·기술·검사 기준 등	
	제습처리 미흡	- 소화가스 이용설비가 적정 운전될 수준으로 바이오가스가 제공되어야 함	
	분진제거 미흡	- 소화가스 이용설비가 적정 운전될 수 있는 수준으로 바이오가스 내 분진이 제거되어 함	
	황화수소 처리 미흡	- 소화가스 이용설비가 적정 운전될 수 있는 수준으로 바이오가스의 황화수소가 처리되어야 함	
	가스유량계 미설치	- 바이오가스의 발생량 및 이용량이 측정되도록 각각 설치해야 함 - 가스유량계 설치 위치는 소화조에서 바이오가스 발생 직후 (발생량용) 및 바이오가스 이용시설 직전 (이용량)으로 함	
바이오가스의 공급설비 (승압 송풍기)의 압력 조절 미흡	- 바이오가스가 소화가스 이용설비에 충분히 공급될 수 있도록 공급 설비의 압력이 안정적으로 유지되어야 함		

Table 12. Design & operation guidelines of wastewater treatment facility

구분	문 제 점	GUIDE LINE 제시	비 고
폐수 처리	낮은 C/N Ratio	- 필요시 외부탄소원 주입	
	폐수처리 온도 상승	- 최적 온도 범위 : 15~30 °C - 필요시 냉각설비를 적용	
	질산화에 의한 pH 저감	- 상시 pH 7.0~8.0 범위 내에서 운전 - pH 저감을 위한 약품 투입	
	연계처리 기준	- 연계처리 유입하수 오염 부하량의 10 % 이내	
액비화*	총질소의 유입농도 설정 미흡	- 폐수처리 TN 농도 설정이 필요함	
	체류시간 부족	- 체류시간은 분뇨 혼합식(BOD <sub>5</sub> 22,000 mg/L 경우) 30 일 이상, 분뇨 분리식(BOD <sub>5</sub> 10,000 mg/L 경우) 15 일 이상으로 설계함	
	용존산소 (DO)의 기준 미흡	- 액비화조 단위 용량당 필요 공기량 : 0.03 m <sup>3</sup> air/(min·m <sup>3</sup> ) 이상 (DO는 0.5 mg/L 이상 유지 필요)	
	액비화 후 저장고 설계 기준 미흡	- 호기액비화시설로 처리할 경우, 혐기소화조, 호기액비화조, 액비저장조를 합하여 처리일수 120 일 이상이 되도록 함 - 저장조는 지하화를 권장함	

\* 액비화는 비료관리법에 적용함

4.1.7. 악취제거 공정  
가축분뇨 및 음식물류폐기물 처리시설에서 발생되는 악취는 메틸머캅탄, 암모니아 등과 같은 고농도 악취물질을 발생시키므로<sup>23,24</sup> 처리시설의 공정별 환기횟수를 지정하고 배출허용 기준보다 약 10~20

% 낮게 모니터링 농도 기준을 설정하여 악취 문제를 대비할 수 있도록 해야 한다. 악취 제거 설비에 관한 지침사항은 Table 13에 수록하였다.

Table 13. Design & operation guidelines of odor removal facility

구분	문 제 점	GUIDE LINE 제시		비 고
공통 사항	환기 횟수 기준 미확립	구분	적용	환기 횟수
		실 탈 취	반입장, 폐수처리실, 탈수기실, 협잡물 반출실, 탈수계의 반출실, 전처리실 등	12 회/hr 이상
			펌프실, 약품실 등	8 회/hr 이상
		기 기 탈 취	반입호퍼, 저장조 및 저류조, 유량조정조, 파쇄기, 선별기, 탈수기, 폐수처리 반응조 등	15 회/hr 이상
			연계처리수조, 응집조, 응집침전조 등	12 회/hr 이상
		국 소 탈 취	이송컨베이어, 전처리설비 등	15 회/hr 이상
반출 컨베이어, 협잡물 및 탈수계의 반출호퍼 등	10 회/hr 이상			
주요 악취 원인 물질		- 황화합물 : 황화수소, 메틸머캅탄 - 질소화합물 : 암모니아, 트리메틸아민 - 알데하이드류 : 아세트, 프로피온, 뷰틸		
모니터링 기준 농도 오류		- 배출허용기준 보다 10~20 % 낮게 설정 추천		권장사항

### 5. 운전지침(안)

#### 5.1. 운전 요인

5.1.1. 운전인자(온도, pH, 유기물부하율, 메탄생성률 등)

혐기성소화 공정에서 중요한 운전인자는 Table 14와 같다. 유기물부하율 (OLR)은 유입되는 건조고형물이 시간당 소화조에 공급되는 양으로, 반입되는 유기물의 농도 및 반입량을 조절하여 OLR을 적정

범위 내로 관리함으로써 안정적인 소화조 운영을 도모할 수 있다. 특히 가축분뇨는 휘발성고형물 (VS)의 농도가 낮으므로 대부분의 바이오가스화 시설에서 유기물부하율이 낮게 운영되고 있다. 따라서 습식 기준으로 가축분뇨 단독처리시설의 경우, 1.0 kgVS/(m<sup>3</sup>·day), 음식물류폐기물과 병합처리하는 시설은 1.5 kgVS/(m<sup>3</sup>·day) 이하로 유기물부하율이 감소되지 않도록 적정 메탄가스 발생량 및 안정적인 소화조 운영·관리를 유지해야 한다.

유기물 분해단계에 참여하는 미생물들의 최적 범위가 상이하므로 Table 14에 제시된 pH 범위를 참고

Table 14. The main operation factor in the anaerobic digester (AM+FW)

구분	참고값
pH	1 phase 6.5~8.5
	2 phases acidogenic 4.5~6.5 (FW ≥ 50 %)
	methanogenic 6.0~8.0 (AW ≥ 50 %)
temperature, °C	methanogenic 7.0~8.5
	mesophilic 35~42
	thermophilic 50~60
OLR, kgVS/(m <sup>3</sup> ·day)	1.5~4.0 (wet standard)
	2.5~5.0 (dry standard)

\* AM : 가축분뇨, FW : 음식물류폐기물, 음식물류폐기물 폐수

하여야 하며, 특히 pH 변동 폭이 급격히 변하지 않도록 관리하는 것이 중요하다. 또한 pH 값의 변동이 있기 전, 휘발성지방산 농도의 변화가 먼저 발생하지 않도록 주의해야 한다.

5.1.2. 저해요인

혐기성소화조 내부에서 휘발성지방산, 암모니아 등과 같은 저해인자의 농도가 일정수준을 초과하게 될 경우, 그 자체의 독성으로 인하여 혐기성 미생물의 증식 및 활동성을 억제한다. Table 15에 혐기성소화조 운전시 작용하는 저해인자 및 제한농도를 제시하였다.

휘발성지방산은 3,000 mg/L 이하로 관리하는 것이 일반적이며, 음식물류폐기물을 단독 처리하는 경우, 4,000 mg/L 이하까지 저해 영향이 일어나지 않는 것으로 알려져 있다. 단, 가축분뇨와 음식물류폐기물을 병합처리하는 경우에는 이보다 낮은 3,000 mg/L 이상에서 혐기성소화공정에 장애가 발생하는 것을 볼 수 있다.

질소를 함유한 고분자 유기물은 혐기성소화시 미생물에 의하여 암모니아성 질소 (NH<sub>3</sub>-N)으로 전환된다. 물에 용해된 암모니아성 질소는 암모니아로 전환되어 미생물의 세포벽 내부로 침투할 수 있게 된다. 만약 기질 내 포함된 암모니아/암모늄의 농도가 높을 경우, 미생물 세포 내부에 암모니아 축적으

로 인한 저해가 발생되며, 최종적으로 메탄 형성을 억제하는 결과를 일으킨다. 암모늄의 저해농도는 3,000 mg/L 이상이며, 억제 작용은 온도, pH 등에 따라 다르게 좌우된다.<sup>25</sup> 따라서 암모니아에 의한 저해가 발생할 경우, 온도를 낮추거나 기질 조성에 변화를 줌으로써 기질 내 질소 부하를 감소시켜 소화조 내부 암모니아 농도를 서서히 감소시킬 수 있으나 혐기성 미생물에 동시에 악영향을 미치므로 주의 깊은 운전이 필요하다.

발전기를 운영하는 대부분의 바이오가스화 시설에서는 황화수소에 한계 농도 값을 제시한다. 이는 황화수소의 부식 특성으로 인한 것으로,<sup>26</sup> 바이오가스에 함유되어 있는 황 성분을 사전에 탈황 처리하여 발전기의 부식을 예방하기 위함이다. 소화조 내에서 황화수소 저해 제거방법은 황화물 침전을 위한 철염 추가, 황 함유 기질 비율 조절 등이 있다.

5.1.3. 바이오가스화 시설의 운전 모니터링 방안

바이오가스화 시설의 정상 운영 상태를 파악하기 위하여 앞서 말한 주요 운영인자에 대한 주기적인 측정 및 기록관리가 중요하다. 혐기성소화조의 운전은 유입량, 유입부하율이 가장 중요하며, 기본적인 운전 제어인자는 온도 및 교반이다. 교반시 혐기소화액 온도의 상부와 하부 변화폭은 2 °C 이내로 설

Table 15. Inhibition factors of the anaerobic digestion<sup>16</sup>

구분	저해 농도 (mg/L)
휘발성지방산 (VFA)	> 4,000 (food waste) > 3,000 (animal manure)
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.

Table 16. 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> /kgvs	매일
유입부하율	kgvs/(m <sup>3</sup> · day)	매일
체류 시간	d	매일
휘발성지방산	mg/L	매일
소화슬러지 발생량	kgvs/m <sup>3</sup> , kgvs/m <sup>3</sup>	매주
추가 측정		
총질소 (TN)	mg/L	매주
유입물의 TS, VS	%	매주
유출물의 TS, VS	%	매주
알칼리도	mg/L	매주
CODcr	mg/L	매월
유분	mg/L	필요시
미량 원소	mg/L	필요시

정하여 관리해야 한다. 혐기성소화조의 운전 효율성은 메탄생성율을 확인함으로써 파악이 가능하고, 휘발성지방산, 암모니아 등의 농도를 주기적으로 분석하여 객관적인 모니터링이 가능하다. 바이오가스화 시설의 운전인자와 측정·기록 주기는 Table 16에, 추가 측정항목은 시설의 측정 장비 및 인력 현황에 따라 실시할 수 있다. 이 중 혐기성소화조의 유입량, 가스 생산량, 유입물의 VS, 메탄 함량 등은 기본적으로 측정·기록하여 운전 상태를 파악할 수 있도록

해야 한다.

#### 5.1.4. 시운전 및 성능보증

바이오가스화 시설에 대한 시운전은 예비 점검, 운전시험 및 성능시험으로 구분되며, 자세한 내용은 Table 17과 같다. 바이오가스화 시설의 시운전 및 성능보증은 아래 Table 18의 점검항목을 바탕으로 진행된다. 시운전 기간은 전체 시설의 공사 완료 이후 10개월 이상으로 정하며, 이 기간에 신뢰성 시험 기

Table 17. Startup list and contents of bio-gasification facility

구 분	범위	내 용
예 비 점 검 (Pre-commissioning)	단독기기 설치점검	기계 및 전기/계측제어 기기 점검, 설비 보완 실시
	단독기기 동작시험	임시동력을 사용 단위 기기별 무부하시험 실시
운 전 시 험 (Commissioning)	설비별 시운전	각 단위 설비별 부하시험 및 기능 확인, 운전상태 기록
	운전시험	각 단위 설비를 통합한 부하시험 및 기능 확인, 운전상태 기록
성 능 시 험 (Performance test)	성능시험 검사	성능시험 - 계약 제시한 설비의 성능 보증치 확인 신뢰성 시험 - 연속운전 및 안정적 운전가동 상태 확인

Table 18. Main inspection list of bio-gasification facility

주요 설비	주요 점검항목
반입 공급설비	- 계량대 및 반입저장호퍼 덮개 정상작동 여부 - 자동개폐시설 및 에어커튼의 정상 작동시험 - 침출수 및 악취누출 여부
전처리 설비	- 협잡물처리설비 이상 유무 확인 - 유기성폐기물 공급펌프 및 이송컨베이어 이송량 확인 - 이물질 선별분리 효율 확인
혐기성 소화설비	- pH, 온도, 압력 측정 (운전상태 확인 가능) - 유기물분해율 측정 및 가스발생량 확인
소화가스 이용설비	- 가스보일러 이상 유무 확인 및 대처 - 가스저장조 안전변 확인 (압력, 온도 등) - 탈황정제조건 제어 및 가스농도 측정
소화슬러지 처리설비	- 탈수케익 및 저장설비의 조건 제어 확인 - 반출 탈수케익의 함수율
악취제거설비	- 탈취 팬의 회전수 및 압력확인 - 악취농도 분석 및 악취확산 여부 확인
폐수처리 설비	- 폐수성상에 따른 운전조건 최적화 - 처리수질 상태 및 농도 확인 (연계 처리 수질)

간 2개월 이상을 포함한다. 신뢰성 시험은 시설 용량의 100 %로 운전하며, 혐기성소화조의 체류시간을 경과한 후에 시작하는 것을 원칙으로 한다. 또한 성능 보증 의무운전 기간은 시설 준공 후 2 년 이상을 권장한다.

## 6. 결론

본 연구는 가축분뇨 및 음식물류폐기물 바이오가스화 시설에 대한 현장조사, 정밀모니터링, 농가 발생원 특성 조사 등을 실시하여 현장 문제점 및 물리·화학적 특성 등을 조사하고, 바이오가스화 시설의 설계지침(안), 운전지침(안), 모니터링 항목 및 주기, 시운전 및 성능보증 기간 등을 운영관리 지침서(안)에 제시하고자 하였다.

1. 운영 중인 가축분뇨 및 음식물류폐기물 바이오가스화 시설 9 개소를 대상으로 정밀모니터링을 실시하였다. 정밀모니터링 결과, VS 기준 유기물분해율은 59.7 %, COD<sub>Cr</sub> 제거율은 68.2 %, 메탄가스생성율은 0.36 Sm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS, 영양성분 제거율은 탄수화물 71.3 %, 지방 60.9 %, 단백질 7.0 % 등으로 나

타났다. 원소분석시 혐기성소화조의 C/N비는 유입 10.7, 유출 8.7로 나타났으며, 혐기성소화조 유출수의 휘발성지방산은 1,137 mg/L, NH<sub>3</sub>-N은 유입 2,430 mg/L, 유출 2,918 mg/L 등으로 조사되었다.

2. 바이오가스화 시설에 유입되는 농가 발생원(축사) 15 곳을 대상으로 가축 분뇨 성분분석을 실시하였다. 농가 발생 가축분뇨의 평균 TS 함량은 10.6%, VS 함량은 7.6 %로 분석되었고, 바이오가스화 시설로 유입은 평균 TS 함량 3.9 %, VS 함량 2.8 % 으로 농가에서 약 60 % 이상 감소되어 바이오가스화 시설로 유입되었다. 또한 휘발성지방산은 평균 12,895 mg/L, TN 6,804 mg/L, NH<sub>3</sub>-N은 4,403 mg/L 등으로 조사되었다.

3. 회분식 분석결과, 가축분뇨 대비 음폐수 비율이 60 : 40 ~ 40 : 60에서 적정 혐기성소화 조건인 100 gTS/L 이하, pH 6.0~8.0, 알칼리도 1 gCaCO<sub>3</sub>/L 이상, TN 6 g/L 이하, COD/N 12~30로 초기 혐기소화의 적정 비율이라 할 수 있다. 연속식 반응기 분석 결과, 음폐수의 비율이 높아질수록 메탄 발생량은 0.3 Sm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS에서 0.4 Sm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS로 증가하는 경향이었으나, 안정성 인자인 휘발성지방산/알

칼리도 비율은 0.156에서 0.067 낮아지며 확고한 안정성을 보였다. 결과적으로 기질 내 음폐수의 병합 비율이 증가할수록 메탄생성율은 증가하지만 휘발성지방산/알칼리도는 낮아져서, 가축분뇨를 약 40% 정도 투입할 때까지 메탄생성율이 현저히 낮아지지 않으면서 소화조의 안정성을 확보하는 것으로 나타났다.

4. 병합처리 바이오가스화 시설의 효율성 증대를 확보하기 위해 시설용량 산정 및 공정별 설계 고려 사항 등을 제시하였다. 시설용량은 각 유입 원료별 배출특성을 고려하여 처리용량의 10~30%의 여유율을 적용하여 산정하였다. 공정별 지침(안)은 반입·전처리설비에 TS 10%의 유입물 제한농도, 저류조는 유효용량의 3일 이상 등, 혐기성소화 설비에 저해요인의 운영관리 농도, 병합 기준 유기물부하율  $1.5\sim 4.0 \text{ kgVS}_m/(\text{m}^3 \cdot \text{day})$  등, 소화가스 이용설비에는 각 원료의 가스발생량을 산술·적용한 가스저장조의 설계, 탈황 및 습기 제거 방법 등, 폐수처리 및 액비화 시설에는 호기액비화조의 적정 운영인자 등, 악취 제거 설비에는 공정별 환기횟수 및 모니터링 농도기준 마련 등을 제안하였다.

5. 가축분뇨 병합처리 바이오가스화 시설의 운전 인자 및 저해요인 등을 고려하여야 한다. 운전 지침(안)은 운전인자에 대하여 pH(산발효조 4.5~6.5, 메탄발효조 6.0~8.0), 온도(중온 35~42 °C, 고온 50~60 °C, 단, 온도 변화폭 2 °C 이내) 등이며, 저해 인자에 대하여 휘발성지방산(VFAs) (3,000 mg/L 이하), 암모니아 (3,000 mg/L 이하), 탈황 방안 등을 마련하였다. 또한 바이오가스화 시설의 정상운영 여부를 파악할 수 있도록 운전 모니터링 인자 및 측정·기록 주기를 제공하였다.

## 편집자 주

이 특집원고는 총 3편으로 구성되어 있으며, 1편은 유기물자원화 25권 2호에 게재되었으며, 3편이 마지막입니다.

## References

1. Ministry of Environment, Economic analysis of waste-to-energy project, (2008).
2. Ministry of Environment, The status of waste generation and treatment in Korea, (2013).
3. Ministry of Environment, The status of livestock manure in Korea, (2014).
4. Statistics Korea, 2014 Agriculture, Forestry and Fisheries survey report, (2014).
5. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, measures for recovery for long-term livestock manure, (2013).
6. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Energization plan of livestock manure, (2009).
7. Ministry of Environment, Comprehensive plan of energization and land disposal of food waste leachate[2008~2012], (2007).
8. Ministry of Environment, Comprehensive plan of energization and land disposal of food waste leachate, (2012).
9. Ministry of Environment, 2014 Status of organic waste energy utilization facilities, (2014).
10. Ministry of Environment, Official testing method on wastes, (2012).
11. Ministry of Food and Drug Safety, Official food testing method. General testing method, (2015).
12. Ministry of Environment, Official testing method on water, (2014).
13. 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).
14. D. J. Lee, Translation of guidelines for biogas production and use in Germany, National Institute of Environmental Research (2014).
15. Buswell, A. M. and H. F. Mueller, H. F., "Mechanism of methane fermentation", Industrial and Engineering Chemistry, 44(3), pp. 550 ~ 552 (1952).

16. Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Vigil, S., Integrated solid waste management, McGraw-Hill, (1993).
17. Ministry of Environment, Study for preparation of technical guidelines for livestock manure biogasification facilities, (2015).
18. Sanders, F. A. and Bloodgood D. E., "The effect of nitrogen-to-carbon ratio on anaerobic decomposition, Journal of Water Pollution Control Federation", 37(12), pp. 1741 ~ 1752 (1965).
19. D. J. Lee, Translation of anaerobic sludge digestion operation manual in U.S, National Institute of Environmental Research (2014).
20. D. J. Lee, Guidelines for operation management of food waste biogasification facilities, National Institute of Environmental Research (2014).
21. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Fertilizer control ACT, (2015).
22. Ministry of Environment, Standard design of livestock manure facility, (2009).
23. K. M. Lee, Y. M. Jo, Characterization of odorous elements in a livestock waste treatment plant, Korean Journal of Odor Research and Engineering, 10(1), pp. 8 ~ 17 (2011).
24. J. H. Kim, J. G. Park, M. S. Moon, J. B. Oh, J. S. Shin, The characteristic and management of odor emitted from pig farms, Korean Journal of Odor Research and Engineering, 10, pp. 201 ~ 215 (2009).
25. Parkin, G. F. and Owen W. F. , "Fundamental of anaerobic digestion of wastewater sludges", J. Environmental Engineering, 112(5), pp. 887 ~ 920 (1991).
26. O' Flaherty, V., Lens P., Leahy B. and Colleran E., "Long-term competition between sulfate-reducing and methane-producing bacteria during the full-scale treatment of citric acid production wastewater", J. Water Research, 32, pp. 185 ~ 196 (1998).