

바이오가스 이용 기술지침 마련을 위한 연구(II) - 정밀모니터링 결과 중심으로

문희성, 배지수, 박호연, 전태완, 이영기, 이동진[†]

국립환경과학원 환경자원연구부

A Study on Establishment of Technical Guideline of the Installation and Operation for the Biogas Utilization of Power generation and Stream - Results of the Precision Monitoring

HeeSung Moon, Jisu Bae, Hoyeun Park, Taewan Jeon, Younggi Lee, Dongjin Lee[†]

Environmental Resource Research Department, National Institute of Environmental Research

(Received: Mar. 09, 2018 / Revised: Mar. 13, 2018 / Accepted: Mar. 14, 2018)

ABSTRACT: According to the in social aspects such as population growth, urbanization and industrialization, development of livestock industry by meat consumption, amount of organic wastes (containing sewage sludge and food waste, animal manure, etc) has been increased annually in South Korea.

Precise monitoring of 11 organic wastes biogas facilities were conducted. The organic decomposition rate of organic wastewater was 68.2 % for food wastes, 66.8 % for animal manure and 46.2 % for sewage sludge and 58.8 % for total organic wastes. As a result of analyzing the biogas characteristics before and after the pretreatment, the total average of the whole facility was measured to be 560 ppm using iron salts and desulfurization, and decreased to 40 ppm when the reduction efficiency was above 90 %. Particularly, when iron salt is injected into the digester, the treatment efficiency is about 93 %, and the average is reduced to 150 ppm. In the case of dehumidification, the absolute humidity and the relative humidity were analyzed. The dew point temperature of the facility where the dehumidification facility was well maintained as 14°C, the absolute humidity was 12.6 g/m³, and the relative humidity was 35 %.

Therefore, it is necessary to compensate for the disadvantages of biogasification facilities of organic waste resources and optimize utilization of biogas and improve operation of facilities. This study was conducted to optimize biogas utilization of type of organic waste(containing sewage sludge and food waste, animal manure) through precision monitoring.

Keywords: anaerobic digestion, biogas, power generation, steam, food wastes

초 록: 본 연구는 유기성폐자원(가축분뇨, 음식물류폐기물, 음식물류폐수 등)의 바이오가스 이용에 대한 적정 설계 및 운전 기술지침서 마련하고자 현장조사와 정밀모니터링 등을 실시하였다. 정부의 중장기 바이오가스화 정책에 따라 폐자원의 자원화 시설 확충이 활발히 추진되고 있다. 하지만 생산된 바이오가스를 이용하여

[†] Corresponding author(e-mail : dongji7@korea.kr)

발전 및 스팀으로 활용하는 시설은 효율이 아직은 저조하고 잦은 고장이 발생되고 있다. 전국 11개소 유기성폐자원 바이오가스화 시설을 대상으로 정밀모니터링을 실시하였다. 사계절 평균으로 정밀모니터링 결과를 정리하였을 때, 유기성폐자원 별 효율성 분석에서 유기성분해율은 VS기준 음식물/음폐수는 68.2 %, 가축분뇨는 66.8 %, 하수슬러지의 경우 46.2 %로 전체 평균 58.8 %로 분석되었다. 전처리 전후 바이오가스 성상을 분석한 결과 철염 및 탈황(건식, 습식)을 이용하여 전체 시설의 H₂S 평균은 560 ppm으로 측정되었으며, 저감효율이 90% 이상인 경우 약 40 ppm 까지 감소할 수 있는 것을 확인하였다. 특히 소화조 내에 철염을 투입하면 처리효율 약 93 %이며, 평균 150 ppm까지 감소하는 것을 확인하였다. 제습의 경우 노점온도를 적용한 절대습도와 가스온도에 따른 상대습도를 분석하였으며, 제습설비가 유지보수가 잘되어 가동 중인 시설의 노점온도는 14℃, 절대습도는 12.6 g/m³이며, 상대습도는 35 %로 측정되었다. 따라서 유기성폐자원의 바이오가스화 시설의 단점을 보완하고 바이오가스 이용 최적화 방안을 마련하기 위하여 정밀모니터링을 실시하였다.

주제어: 병합 소화, 바이오가스, 발전, 스팀, 음식물류폐기물

3. 연구결과

3.2. 정밀모니터링 결과

3.2.1. 삼성분 및 유기물분해율 (VS 기준)

유기성폐자원에 따른 바이오가스화 시설의 사계절 평균 삼성분 결과를 Fig. 4.와 Table 5.에 명시하였다. 음식물/음폐수 바이오가스화 시설의 유입물 평균 TS 함량은 10.7 %, VS 함량은 9. 1%, VS 기준

평균 유기물분해율은 68.2 %로 나타났다. 단 유입방식의 차이로 DM 시설의 값을 제외하면 평균 TS 함량은 8.9 %, VS 함량은 7.6 %, VS 기준 평균 유기물분해율은 76.8 %로 나타났다. 가축분뇨 바이오가스화 시설의 유입물 평균 TS 함량은 8.6 %, VS 함량은 7.0 %, VS 기준 평균 유기물분해율은 66.8 %로 나타났으며, 하수슬러지 바이오가스화 시설의 유입물 평균 TS 함량은 4.5 %, VS 함량은 3.2 %, VS 기준 평균 유기물분해율은 46.2 %로 나타났다.

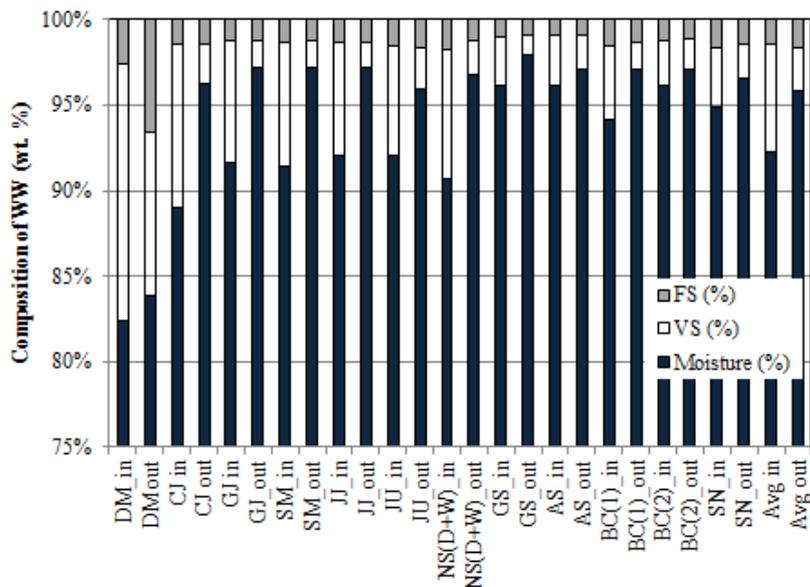


Fig. 4. Results of moisture contents, FS and VS.(four seasons)

Table 5. Results of TS, VS and VS removal efficiency(four seasons)

		Moisture (%)	TS (%)	VS (%)	VS/TS (%)	VS removal rate (%)
FW/FWL	in	89.3(90.1)*	10.7(8.9)*	9.1(7.6)*	84.8(84.8)*	68.2(76.8)*
	out	94.3(97.0)*	5.7(3.0)*	3.3(1.8)*	57.5(57.2)*	
AM	in	91.4	7.6	7.0	77.5	66.8
	out	96.4	3.6	2.2	60.0	
SS	in	95.5	4.5	3.2	70.5	46.2
	out	97.2	2.8	1.7	58.8	
Avg	in	92.2	7.8	6.3	77.6	58.8
	out	95.9	4.1	2.4	58.5	

* 샘플명 in : 소화조 유입, 샘플명 out : 소화조 유출

* FW/FWL : food waste/ food waste leachate, AM : animal manure, SS : sewage sludge

* (00)* DM시설 제외 값

3.2.2. CODcr 및 영양성분 (단백질, 지방, 탄수화물)

화학적 산소요구량 (CODcr)은 유입물 농도와 연계수질 부하에 관련된 하수처리장의 대표적인 수질 지표이다. 유기성폐자원에 따른 바이오가스화 시설의 사계절 시료 CODcr 분석 결과는 Fig. 5.에 도식화하였다. 음식물/음폐수를 혐기 소화하는 경우 평균 유입 147,253 mg/L, 유출 59,627 mg/L로 59.5 %의 CODcr 제거율을 보였다. 가축분뇨는 평균 유입 124,520 mg/L, 유출 61,054 mg/L로 51.0 %의 CODcr 제거율을 보였다. 하수슬러지는 평균 유입 49,905

mg/L, 유출 46,743 mg/L로 6.33 %의 CODcr 제거율을 보였다.

유기성폐자원에 따른 유입물의 영양성분 분석 결과는 Fig. 6.와 같다. 음식물/음폐수의 평균 유입 성상은 단백질 2.7 g/100 g (30.7 %), 지방 0.7 g/100 g (8.0 %), 탄수화물 5.4 g/100 g (61.3 %)를 차지하였다. 혐기소화조 유출액의 평균 영양성상은 단백질 3.2 g/100g (55.2 %), 지방 1.4 g/100 g (24.1 %), 탄수화물 1.2 g/100 g (20.7 %)를 차지하였다. 가축분뇨의 평균 유입 성상은 단백질 3.4 g/100 g (65.4 %), 지방 0.7 g/100 g (13.5 %), 탄수화물 1.1 g/100 g (21.2 %)를

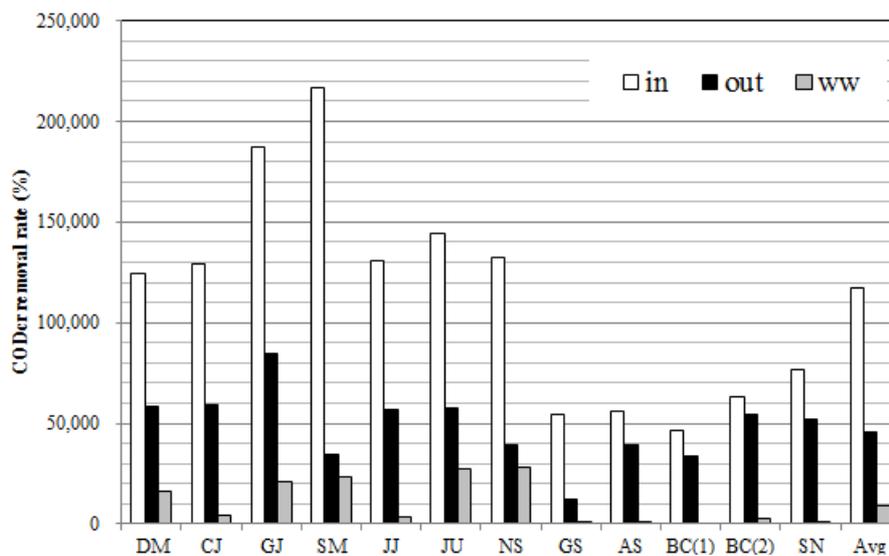


Fig. 5. Results of CODcr in biogasification facilities.(four seasons)

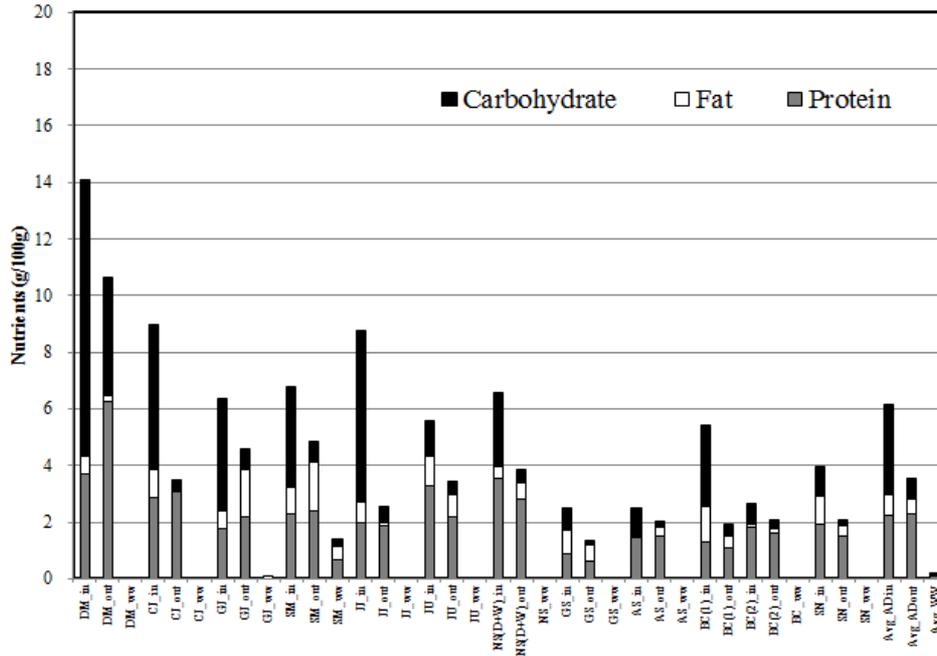


Fig. 6. Results of organic constituents in biogasification facilities.

차지하였다. 혐기소화조 유출액의 평균 영양성상은 단백질 2.0 g/100 g (54.1 %), 지방 1.2 g/100 g (32.4 %), 탄수화물 0.5 g/100 g (13.5 %)를 차지하였다. 하수슬러지의 평균 유입 성상은 단백질 1.5 g/100 g (41.7 %), 지방 1.1 g/100 g (30.6 %), 탄수화물 1.0 g/100 g (27.8 %)를 차지하였다. 혐기소화조 유출액의 평균 영양성상은 단백질 1.3 g/100 g (59.1 %), 지방 0.5 g/100 g (22.7 %), 탄수화물 0.4 g/100 g (18.2 %)를 차지하였다.

3.2.3. 질소 (TN, NH₃-N), 인 (TP, PO₄-P), 휘발성지방산

암모니아는 단백질을 함유한 폐기물의 혐기성 분해시 생성되는 물질이다. 암모니아성 질소 (NH₃-N)는 혐기소화조 내부에서 고농도로 유지될 경우 pH에 따라 독성을 미치는 정도가 상이한 저해 인자이다.^{24,25)} Table 6.와 같이, 폐기물 별 사계절 대상 시설의 혐기소화 전·후의 질소 농도를 비교하였을 때, 음식물/음폐수 시설의 총 질소 (TN)는 30.9 % 증가하였으며, NH₃-N은 감소하는 추세이다. 가축분뇨 시설의 총 질소 (TN)는 32.6 % 증가하였으며, NH₃-N은 감소하는 추세이다. 하수슬러지 시설의 총 질소 (TN)

는 6.1 % 감소하였으며, NH₃-N은 10.6 % 증가하였다. 연계처리되는 탈리여액의 평균 질소 농도는 음식물/음폐수가 TN 2,172 mg/L, NH₃-N 157 mg/L, 가축분뇨가 TN 5,668 mg/L, NH₃-N 483 mg/L, 하수슬러지가 TN 1,019 mg/L, NH₃-N 221 mg/L로 탈수과정에서 질소 계열 물질이 저감되는 것으로 판단된다.

인은 질소와 같이 후속 연계폐수처리와 관련된 분석 항목이다. 폐기물 별 사계절 대상 시설의 인 (TP, PO₄-P) 분석결과는 아래의 Table 6.에 도식화 하였다. 평균 총 인 (TP)의 농도는 음식물/음폐수가 유입 566 mg/L, 유출 2,792 mg/L, 탈리여액 1,265 mg/L로 나타났다. 가축분뇨는 유입 2,157 mg/L, 유출 4,030 mg/L, 탈리여액 2,614 mg/L로 나타났고, 하수슬러지는 유입 378 mg/L, 유출 843 mg/L, 탈리여액 522 mg/L로 나타났다. 인산염인 (PO₄-P)의 평균 농도는 음식물/음폐수가 유입 376 mg/L, 유출 111 mg/L, 탈리여액 27 mg/L로 나타났다. 가축분뇨는 유입 502 mg/L, 유출 178 mg/L, 탈리여액 134 mg/L로 나타났고, 하수슬러지는 유입 272 mg/L, 유출 121 mg/L, 탈리여액 56 mg/L로 나타났다.

산성을 띄는 유기화합물인 휘발성지방산(VFAs)은 혐기소화조 내부의 유기물 분해 과정이 균형을

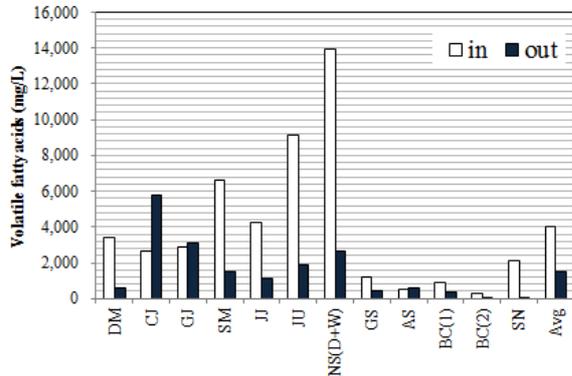


Fig. 7. Results of VFAs in biogasification facilities.

Table 6. Results of nitrogen and phosphorus in biogasification facilities(four seasons)

		TN (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	TP (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)
FW/ FWL	in	4,489	767	566	376
	out	5,878	527	2,792	111
	ww	2,172	157	1,265	27
AM	in	5,305	937	2,157	502
	out	7,034	631	4,030	178
	ww	5,668	483	2,614	134
SS	in	3,326	856	378	272
	out	3,122	947	843	121
	ww	1,019	221	522	56
Avg	in	4,140	832	753	354
	out	4,923	720	2,187	126
	ww	2,129	196	1,159	50

* 샘플명 in : 소화조 유입, 샘플명 out : 소화조 유출 ww : 탈리여액
* FW/FWL : food waste/ food waste leachate, AM : animal manure, SS : sewage sludge

유지하고 있는지 확인하기 위한 주요 인자이다. 만약 휘발성지방산이 소화조 내부에 고농도로 축적될 경우, 메탄생성균의 활동성이 저하되어 바이오가스화 과정에 억제 물질로 작용하게 된다.^{22),23)}

폐기물 별 사계절 대상 시설의 VFAs 농도를 분석하고 폐기물 별 VFAs 분석 결과는 Fig. 7.에 도식화하였다. 음식물/음폐수의 기기분석은 평균 유입 3,970 mg/L, 유출 2,418 mg/L로 나타났다. 수분석시 VFAs의 농도는 평균 유입 3,412 mg/L, 유출 3,798 mg/L로 기기분석의 수치보다 높은 값을 보였다.

가축분뇨의 기기분석은 평균 유입 11,535 mg/L, 유출 3,641 mg/L로 나타났다. 수분석시 VFAs의 농도는 평균 유입 16,511 mg/L, 유출 3,911 mg/L로 기기분석의 수치보다 높은 값을 보였다. 하수슬러지의 기기분석은 평균 유입 997 mg/L, 유출 297 mg/L로 나타났다. 수분석시 VFAs의 농도는 평균 유입 1,259 mg/L, 유출 637 mg/L로 기기분석의 수치보다 높은 값을 보였다.

3.2.4. 원소함량

유기성폐자원에 따른 유입물의 바이오가스화 시설의 사계절 평균 원소함량 분석 결과는 Table 7., Fig. 8.와 같다. 음식물/음폐수의 C/N 비 경우 평균 유입 10.5, 유출 4.5로 나타났고 가축분뇨 C/N 비는 평균 유입 11.2, 유출 8.9, 하수슬러지 C/N 비는 평균 유입 7.6, 유출 6.7로 나타났다. 분석결과 하수슬러지 처리시설의 C/N비가 음식물/음폐수와 가축분뇨 처리시설의 값보다 낮은 경향을 보였다. 이는 하수슬러지 단독으로 바이오가스화 할 때 낮은 C/N비로 소화의 저해요소를 갖지만, 고영양원(탄소)인 음식물/음폐수와 가축분뇨는 탄소함량이 더 높아 바이오가스 발생에 도움 줄 것으로 판단된다.^{18),22),23)}

Table 7. Results of elements contents in biogasification facilities(four seasons)

		C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)	C/N ratio
FW/ FWL	in	44.7	5.5	4.4	0.3	30.0	10.5
	out	30.8	4.0	4.2	0.8	17.7	4.5
AM	in	43.6	5.4	4.1	0.6	23.7	11.2
	out	32.7	4.0	3.8	1.2	18.3	8.9
SS	in	36.3	4.7	5.2	1.0	23.2	7.6
	out	28.7	3.9	4.4	1.5	20.3	6.7
Avg	in	41.0	5.2	4.7	0.7	26.1	9.4
	out	30.3	4.0	4.2	1.2	18.9	7.4

* 샘플명 in : 소화조 유입, 샘플명 out : 소화조 유출
* FW/FWL : food waste/ food waste leachate, AM : animal manure, SS : sewage sludge
* O(산소)는 산소+미량원소의 합

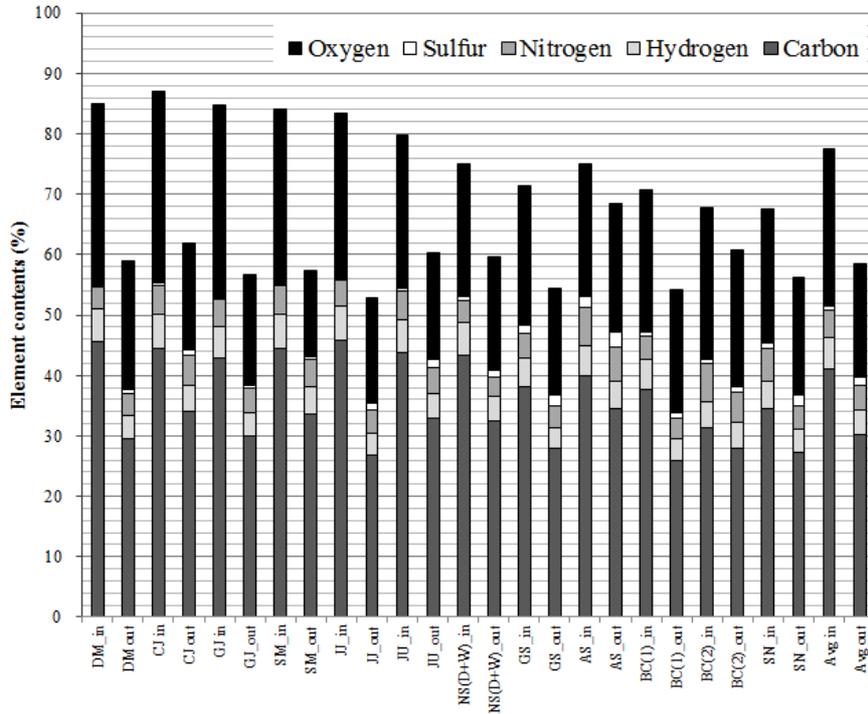


Fig. 8. Results of elements contents in biogasification facilities(fours asons)

3.3. 바이오가스 분석 결과

3.3.1. 메탄가스 발생량

Angelidaki and Sanders (2004)²⁴⁾ 제시한 Table 8. 의 기질별 이론적 메탄 수율을 활용하여 이론적인 메탄가스 발생량을 산정하였다. 영양성분 조성식에 따른 잠재적인 이론 메탄가스 발생량은 각각 단백질 0.496 Nm³CH₄/kgVS, 탄수화물 0.415 Nm³CH₄/kgVS, 지방 1.014 Nm³CH₄/kgVS이며, CODcr의 경우 0.350

Nm³CH₄/kgCODcr으로 모두 동일한 수치를 가진다.

유기성폐자원에 따른 유입물기질의 이론적인 메탄가스 발생량과 실제 현장에서의 발생된 수치를 사계절 평균을 기준으로 Table 9.에 비교하였다. 유기성폐자원 별 시료의 단백질, 지방, 탄수화물의 평균 물 비율로 재환산된 이론적 메탄가스 발생량은 음식물/음폐수 폐기물이 0.457 Nm³CH₄/kgVS, 0.350Nm³CH₄/kgCODcr로 나타났고, 가축분뇨 폐기물이 0.491 Nm³CH₄/kgVS, 0.350 Nm³CH₄/kgCODcr, 하수

Table 8. Comparison between theoretical and practical methane yield

Organic constituents	Composition formula	Methane yield (Nm ³ CH ₄ /kgVS)	Methane yield (Nm ³ CH ₄ /kgCODcr)	Methane content (%)
Protein**	C ₅ H ₇ O ₂	0.496	0.350	50
Carbohydrate	(C ₆ H ₁₀ O ₅)n	0.415	0.350	50
Fat	C ₅₇ H ₁₀₄ O ₆	1.014	0.350	70
Average	-	0.503	0.350	-

* I. Angelidaki, W. Sanders, Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants, Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 2004, 3, 117-129.

** 단백질의 질소는 NH₃로 전환됨

*** 최종 이론적 메탄가스 발생량은 바이오가스화 시설에서 처리되는 유기성폐자원 성분별 평균 물 비율 적용
물 비율-단백질 : 지방 : 탄수화물 = 0.635 : 0.061 : 0.304

Table 9. Comparison between theoretical and practical methane yield

구분	구분	VS ¹⁾ (%)	CODcr ¹⁾ (mg/L)	Methane yield (A) ²⁾ (Nm ³ CH ₄ /kgVS)	Methane yield (B) ²⁾ (Nm ³ CH ₄ /kgCODcr)
FWL	실측치	9.1	157,765	0.207	0.251
	실측치/분해율 ³⁾	-	-	0.303 (=0.207/0.682)	0.409 (=0.251/0.614)
	이론치 ⁴⁾	-	-	0.457	0.350
AM	실측치	7.0	138,489	0.250	0.251
	실측치/분해율 ³⁾	-	-	0.375 (=0.250/0.668)	0.383 (=0.251/0.655)
	이론치 ⁴⁾	-	-	0.491	0.350
SS	실측치	3.2	70,118	0.199	0.251
	실측치/분해율 ³⁾	-	-	0.430 (=0.199/0.462)	0.556 (=0.251/0.451)
	이론치 ⁴⁾	-	-	0.501	0.350
Arg	실측치	6.3	114,454	0.211	0.251
	실측치/분해율 ³⁾	-	-	0.358 (=0.211/0.588)	0.398 (0.251/0.631)
	이론치 ⁴⁾	-	-	0.472	0.350

- 1) 17년도 정밀모니터링의 사계절 평균으로 적용
- 2) 건조 가스 및 표준상태 (0 °C, 1기압) 기준
- 3) 100 % 분해 가정시 실측치를 근거로 한 추정치 (유기물분해율 VS 58.8 %, CODcr 63.1 % 적용)
- 4) 영양 분석은 겨울/봄 평균 수치

Table 10. Estimation of biogas and methane production by organic wastes inflow rate

구분	시설	유입량 (ton/year)	유입수 ¹⁾ VS (%)	가스발생량 (Nm ³ /year)	메탄 ²⁾ [CH ₄] (%)	가스발생량 (Nm ³ /ton)	메탄발생량 (Nm ³ CH ₄ /kgVS)
FWL	DM	33,091	14.9	3,956,056	63.5	119.6	0.51
	GJ	87,600	7.1	5,299,412	54.6	60.5	0.47
	CJ	48,910	9.5	4,747,259	63.8	97.1	0.65
	SM	156,585	7.2	13,465,659	56.4	86.0	0.67
	Avg	81,547	9.7	6,867,097	59.6	84.2	0.52
AM	NS	11,250	7.6	389,159 ³⁾	58.2	34.6	0.27
	Avg	11,250	7.6	389,159	58.2	34.6	0.27
SS	BC	734,380	3.5	9,722,674	61.8	13.2	0.24
	SN	1,417,660	3.4	24,472,201	66.4	17.3	0.34
	GS	167,613	2.9	2,898,420	65.7	17.3	0.39
	Avg	749,710	3.2	10,056,066	64.2	16.0	0.32
Arg		288,671	6.8	6,540,229	60.8	22.7	0.20

- 1) 17년도 정밀모니터링의 사계절 평균으로 적용
- 2) 현장측정데이터 활용
- 3) 3개월 바이오가스 발생량

슬러지가 0.501 Nm³CH₄/kgVS, 0.350 Nm³CH₄/kgCODcr 으로 나타났다.

실제 현장에서 발생하는 메탄가스 발생량은 건조 가스 및 표준상태 (0 °C, 1기압)를 기준으로 재산출 하였다. 음식물/음폐수 폐기물 평균 메탄가스 발생량

실측치는 VS 기준 0.207 Nm³CH₄/kgVS, CODcr 기준 0.251 Nm³CH₄/kgCODcr로 나타났으며, 평균 유기물 분해율인 68.2 % (VS)와 61.4 % (CODcr)를 적용할 경우, 0.303 Nm³CH₄/kgVS, 0.409 Nm³CH₄/kgCODcr 이다. 가축분뇨 폐기물 평균 메탄가스 발생량 실측치

는 VS 기준 0.250 Nm³CH₄/kgVS, CODcr 기준 0.251 Nm³CH₄/kgCODcr로 나타났으며, 평균 유기물분해율인 66.8 % (VS)와 65.5 % (CODcr)를 적용할 경우, 0.375 Nm³CH₄/kgVS, 0.383 Nm³CH₄/kgCODcr이며, 하수슬러지 폐기물 평균 메탄가스 발생량 실측치는 VS 기준 0.199 Nm³CH₄/kgVS, CODcr 기준 0.251 Nm³CH₄/kgCODcr로 나타났으며, 평균 유기물분해율인 46.2 % (VS)와 45.1 % (CODcr)를 적용할 경우, 0.430 Nm³CH₄/kgVS, 0.556 Nm³CH₄/kgCODcr이다.

유기성폐자원 별 바이오가스화 시설에 연간 유입물 투입량과 발생된 바이오가스량을 요청하였고, 그에 따른 유입물 투입량 대비 바이오가스 생산량(Nm³/ton)과 VS 별 메탄생산량(Nm³CH₄/kgVS,)을 추산하여 사계절 평균을 Table 10.에 나타냈다. 음식물/음폐수 폐기물의 유입물 투입량 대비 바이오가스 발생량은 84.2 Nm³/ton이며, 메탄생산량은 0.52 Nm³CH₄/kgVS,으로 나타났으며, 가축분뇨의 바이오가스발생량은 34.6 Nm³/ton이며, 메탄생산량은 0.27 Nm³CH₄/kgVS,, 하수슬러지 바이오가스 발생량은 16.0 Nm³/ton이며, 메탄생산량은 0.32 Nm³CH₄/kgVS,으로 나타났다.

유기성폐자원에 따른 유입물의 기질의 이론적인 메탄가스 발생량과 실제 현장에서의 발생된 수치와 연간 바이오가스 발생량을 통한 메탄발생량 비교시 계산값이 대부분 비슷한 추세로 유사한 점이 있으나, 음식물/음폐수 폐기물의 메탄발생량이 상이한 것으로 나타났다.

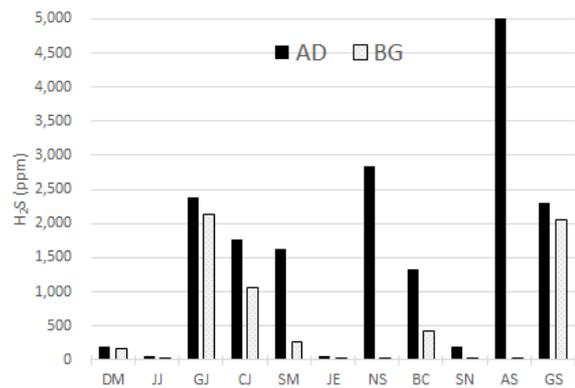
3.3.2. 가스성분 함량(CH₄, CO₂, O₂, H₂S, NH₃)

유기성폐자원 별 바이오가스화 시설의 바이오가스 성분 함량 측정 결과는 Table 11., Table 12.과 같다. 소화조 후단에서 측정한 평균 결과, 음식물/음폐수의 경우 CH₄ 61.7 %, NH₃ 622.6 ppm, H₂S 1,208.6 ppm으로 측정되었고, 가축분뇨의 경우 CH₄ 65.7 %, NH₃ 614.0 ppm, H₂S 1,448 ppm, 하수슬러지의 경우 CH₄ 65.5 %, NH₃ 681.3 ppm, H₂S 3,459 ppm으로 측정되었다.

탈황 및 제습 전처리 후단에서 즉 발전기 앞단에서 측정한 평균 결과, 음식물/음폐수의 경우 CH₄ 60.8 %, NH₃ 393.02 ppm, H₂S 722.6 ppm으로 측정되었고,

가축분뇨의 경우 CH₄ 61.75 %, NH₃ 7 ppm, H₂S 16.5 ppm, 하수슬러지의 경우 CH₄ 69.35 %, NH₃ 325.0 ppm, H₂S 629.75 ppm으로 측정되었다.

시설 별 황화수소와 암모니아는 탈황 및 제습처리의 종류 및 운영방식에 따른 차이가 큰 것으로 확인되었으며, 소화조 후단에서 측정시 철염투입 유무에 따라 황화수소의 농도가 큰 차이를 나타내고 있다. DM, JJ, JE, SN 시설에서는 소화조에 직접 철염을



* AD : after digester, BG : before generator

Fig. 9. Measurement of H₂S in biogas by AD and BG point.

Table 11. Measurement of biogas by organic waste type in after digester

Treatment materials	Facility	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	NH ₃ (ppm)	H ₂ S (ppm)
FW/FWL	DM	64.0	38.6	0.2	136.0	194.0
	JJ	66.2	35.7	0.2	5.0	56.0
	Avg	65.1	37.2	0.2	70.5	125.0
AM	GJ	54.1	44.7	0.2	over	2381.0
	CJ	62.0	38.4	0.3	over	1775.0
	SM	62.2	38.2	0.2	972.0	1637.0
	Avg	61.7	39.1	0.2	622.6	1208.6
SS	JE	63.4	35.2	0.5	228.0	55.0
	NS	68.0	25.8	1.0	over	2841.0
	Avg	65.7	30.5	0.8	614.0	1448.0
SS	BC	63.3	36.6	0.2	600.0	1334.0
	SN	65.7	32.0	0.2	125.0	195.0
	AS	67.3	29.7	0.6	over	over
	GS	65.7	34.8	0.2	over	2307.0
Avg	65.5	33.3	0.3	681.3	3459.0	

* 측정범위 초과(over)의 경우 측정 최대값인 NH₃ : 1,000 ppm, H₂S : 10,000 ppm으로 설정

투입하는 것을 확인하였다. 또한 안산시설의 경우 공단폐수 유입으로 인해 황화수소 값이 10,000 ppm 을 초과할 것으로 예상되어진다.

Fig. 9.과 같이 황화수소의 전처리로 인해 황화수소 감소율은 JJ시설 96.4 %, SM시설 84.4 %, NS시설

99.9 %, SM시설 91.3 %, AS시설 99.8 %로 높은 비율을 나타내었다. 반면 GJ, BC, GS 시설의 경우 바이오가스 활용으로 보일러를 운영하여 탈황처리가 미흡한 것으로 판단된다. 바이오가스로 전기를 생산하는 발전기와 달리 보일러 운영시 스팀이 생산되며, 발전기는 바이오가스 내 황화수소(H₂S)와 수분(H₂O)이 결합하여 황산(H₂SO₄)이 발생되어 발전기 내부를 마모 및 부식시켜 유지보수 기간이 단축되지만 보일러는 그러한 영향이 미비하다.

Table 12. Measurement of biogas by organic waste type in before generator

Treatment materials	Facility	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	NH ₃ (ppm)	H ₂ S (ppm)
FW/FWL	DM	63.5	37.7	0.2	1.1	170.0
	JJ	65.7	35.6	0.3	0.0	2.0
	GJ	54.6	38.1	2.0	over	2130.0
	CJ	63.8	38.6	0.2	727.0	1056.0
	SM	56.4	35.1	2.0	237.0	255.0
	Avg	60.8	37.0	0.9	393.0	722.6
AM	JE	65.3	36.3	0.3	14.0	31.0
	NS	58.2	25.1	1.4	0.0	2.0
	Avg	61.8	30.7	0.9	7.0	16.5
SS	BC	61.8	36.3	0.2	273.0	428.0
	SN	66.4	31.9	0.3	13.0	17.0
	AS	-	-	-	14.0	20.0
	GS	65.7	34.7	0.2	over	2054.0
	Avg	64.6	34.3	0.2	325.0	629.8

* 측정범위 초과(over)의 경우 측정 최대값인 NH₃ : 1,000 ppm, H₂S : 10,000 ppm으로 설정

3.3.3. 수분 함량(노점온도, 절대습도, 상대습도)

유기성폐자원 별 바이오가스화 시설의 바이오가스 수분함량 측정 결과는 Table 13., Table 14.과 같다. 소화조 후단에서 측정한 평균 결과, 음식물/음폐수의 경우, 노점온도 26.8 °C, 절대습도 25.7 g/m³, 상대습도 82.9 %(30.3°C) 으로 측정되었고, 가축분뇨의 경우 노점온도 28.7 °C, 절대습도 28.0 g/m³, 상대습도 82.7 %(32.4°C), 하수슬러지의 경우 노점온도 24.8 °C, 절대습도 22.6 g/m³, 상대습도 77.2 %(29.3°C)으로 측정되었다.

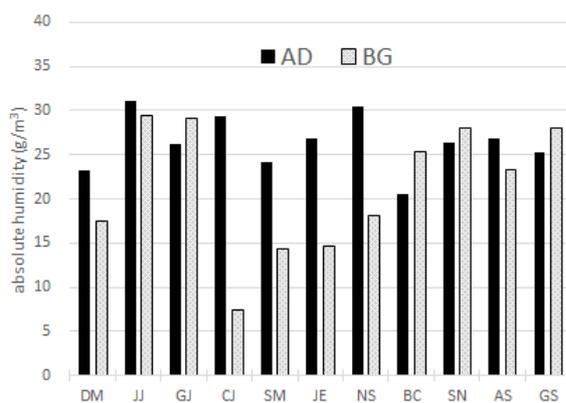
탈황 및 제습 전처리 후단에서 즉 발전기 앞단에서 측정한 평균 결과, 음식물/음폐수의 경우, 노점온도 19.6 °C, 절대습도 18.4 g/m³, 상대습도 59.5 %(30.9°C) 으로 측정되었고, 가축분뇨의 경우 노점온도 16.4 °C,

Table 13. Measurement of moisture of biogas by organic waste type in after digester

Treatment materials	Facility	dew point tem. (°Ctd)	adsolute humidity (g/m ³)	relative humidity (%)	temperature (°C)
FW/FWL	DM	23.2	20.1	61.4	31.5
	JJ	31.1	32.3	99.8	31.1
	GJ	26.2	24.7	93.8	27.2
	CJ	29.4	29.2	81.9	32.9
	SM	24.2	21.9	77.6	28.7
	Avg		26.8	25.7	82.9
AM	JE	26.8	24.8	65.3	34.2
	NS	30.5	31.3	100.0	30.5
	Avg		28.7	28.0	82.7
SS	BC	20.6	17.5	62.9	28.3
	SN	26.3	24.8	84.2	29.3
	AS	26.9	25.0	87.1	29.2
	GS	25.2	23.2	74.6	30.2
	Avg		24.8	22.6	77.2

Table 14. Measurement of moisture of biogas by organic waste type in before generator

Treatment materials	Facility	dew point tem. (°Ctd)	absolute humidity (g/m ³)	relative humidity (%)	temperature (°C)
FW/FWL	DM	17.5	14.2	35.1	35.3
	JJ	29.4	29.6	99.4	29.5
	GJ	29.1	29.1	96.9	29.7
	CJ	7.5	7.4	21.3	32.4
	SM	14.4	11.9	44.6	27.5
Avg		19.6	18.4	59.5	30.9
AM	JE	14.7	11.7	23.6	39.3
	NS	18.1	14.9	49.9	29.7
Avg		16.4	13.3	36.7	34.5
SS	BC	25.4	23.6	84.1	28.4
	SN	28.0	27.1	83.8	31.1
	AS	23.3	22.8	72.2	28.8
	GS	28.0	27.1	83.8	31.1
Avg		26.2	25.1	81.0	29.9



* AD : after digester, BG : before generator

Fig. 10. Measurement of absolute humidity of biogas in AD and BG point.

절대습도 13.3 g/m³, 상대습도 36.7 % (34.5°C), 하수슬러지의 경우 노점온도 26.2 °C, 절대습도 25.1 g/m³, 상대습도 81.0 % (29.9°C)으로 측정되었다.

유기성폐자원 별 바이오가스화 시설의 지점 별 바이오가스 수분함량 측정 결과는 Fig. 10.과 같이 제습시설이 유지보수가 잘되는 DM, CJ, SM, JE, NS 시설은 절대습도 값이 발전기 전단에서 감소하는 것으로 분석되었으며, CJ시설의 경우 감소율이 약 74.8 %로 가장 많이 감소하였다.

Fig. 11.와 같이 제습시설의 유지보수가 잘되는 시

설의 수분함량은 절대습도 25.5 g/m³에서 전처리 후 12.0 g/m³으로 약 51.1 % 감소하였고, 상대습도도 77.2 %에서 34.9 %로 감소하였다. 반면 제습시설이 미흡한 시설인 JJ, GJ, BC, SN, AS, GS는 절대습도 24.6 g/m³에서 전처리 후 26.5 g/m³으로 증가하였고, 상대습도도 83.7 %에서 86.7 %로 증가하였다.

유럽연합(EU)의 경우 바이오가스의 활용방안으로 천연가스 공급망에 주입하기 위한 법적토대를 마련하고 있으며, 궁극적인 목표로는 수송배관에 주입하고자 하고 있다.²⁵⁾ 이와 관련하여 Directive 2003/55/EC of the European and of the Council에서는 회원국의 대체 천연가스를 수송관에 주입하기 위한 품질기준 등을 마련하도록 규정하고 있다. 그에 따라 스웨덴은 노점온도를 대기온도에 -5 °C, 스위스는 상대습도 60 %, 독일은 노점온도를 지표면 온도보다 낮게 설정하는 등 가스 수분함량을 제어하고 있다. 노점온도의 경우 수송용관에 영향으로 지표면온도보다 낮게 설정하였다.

제습 전처리가 잘되는 시설의 발전기 유입전의 노점온도는 약 14°C이며, 절대습도는 약 12.0 g/m³이다. 그리고 제습 전처리가 미흡한 시설의 노점온도는 약 27°C이며, 절대습도는 약 25.50 g/m³이다. 바이오가스의 발전기 주입 전 가스온도는 평균 31°C이며, 발전기 운전 적정 수분함량이 상대습도 60 %일

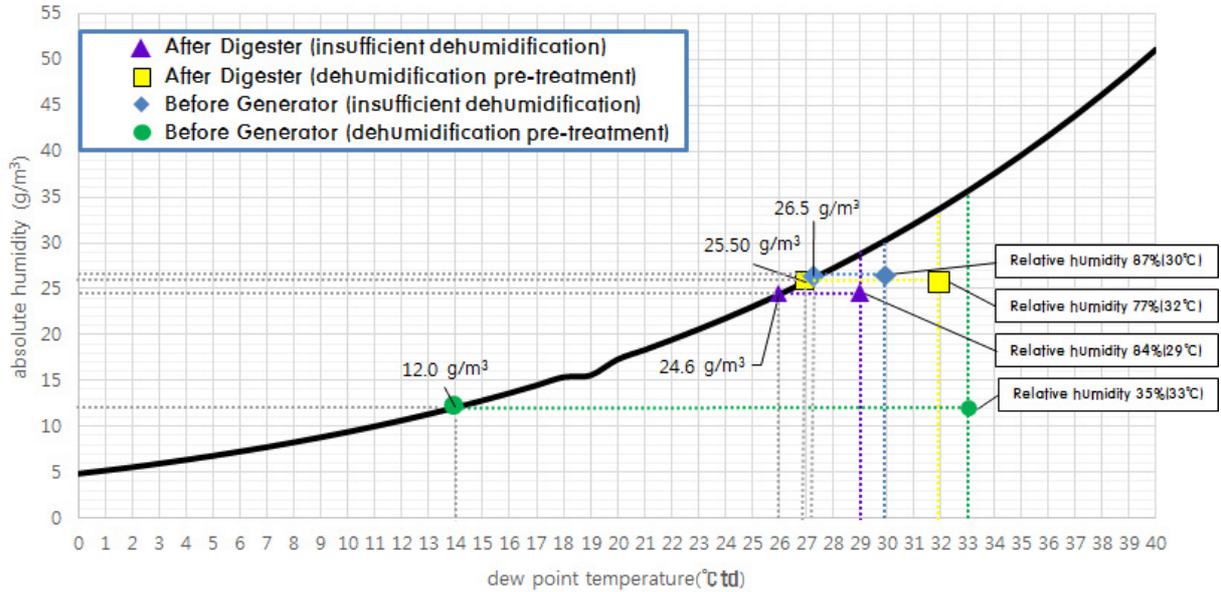


Fig. 11. Absolute humidity and relative humidity from pre-treatment process.

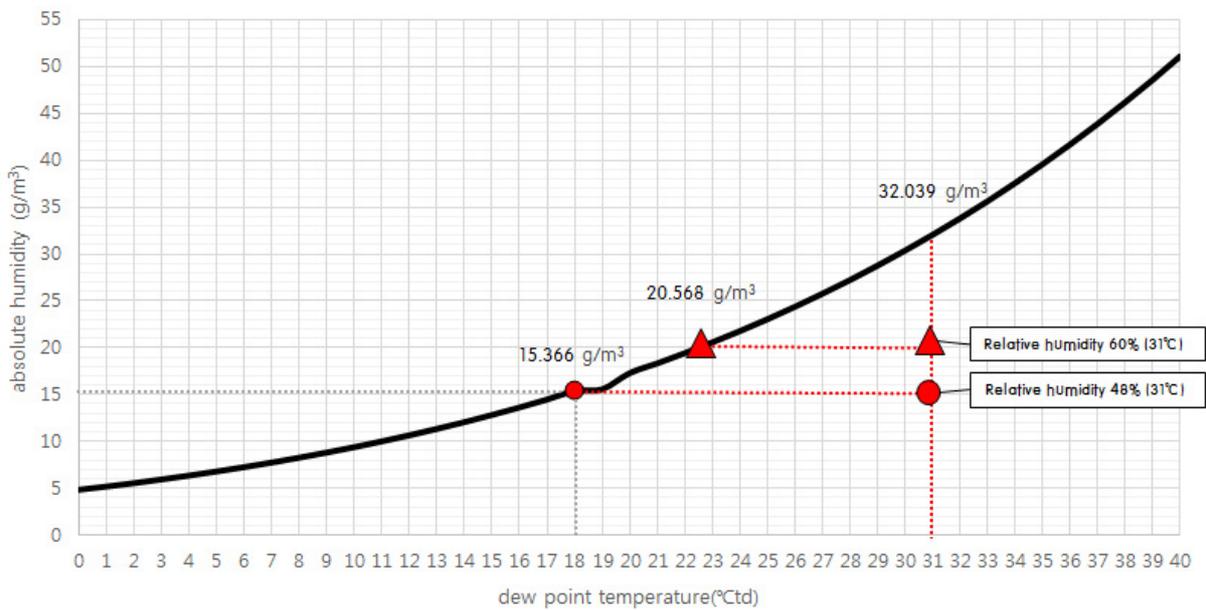


Fig. 12. Criterion by absolute humidity and relative humidity.

때, Fig. 12.의 포화수증기량 그래프에 대입하여 노점 온도는 약 22°C이며 절대습도는 20.57 g/m³이다.

반면 노점온도 기준으로 제습 전처리가 적정수준으로 처리 할 경우 약 14°C를 만족하고 있으므로 절대습도 약 15.4 g/m³를 만족하며 평균 가스온도인 31°C 기준으로 상대습도는 약 48%를 유지할 수 있다.

3.4. 분자생물학적 균유전체 (Metagenome) 분석

유기성폐자원 바이오가스화 11개소의 혐기소화조 내부의 최우점 미생물종 (Bacteria & Archaea)의 계절별 변화를 보기위한 분석결과 Fig. 13. 와 같이 CJ 시설의 겨울철 proteinphilum 우점도가 37.8 %로 매우

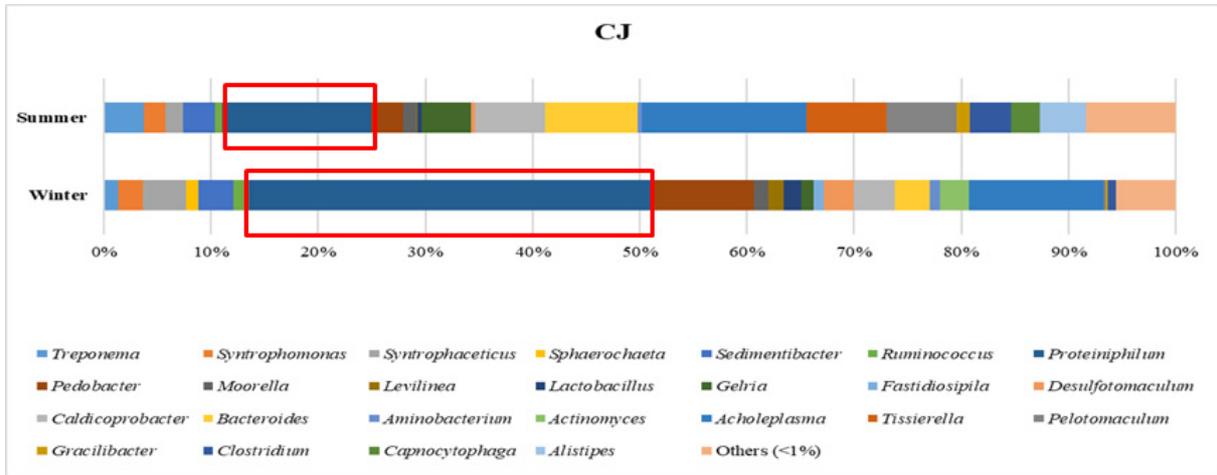


Fig. 13. Results of taxonomic assignment(bacteria) in CJ facility.

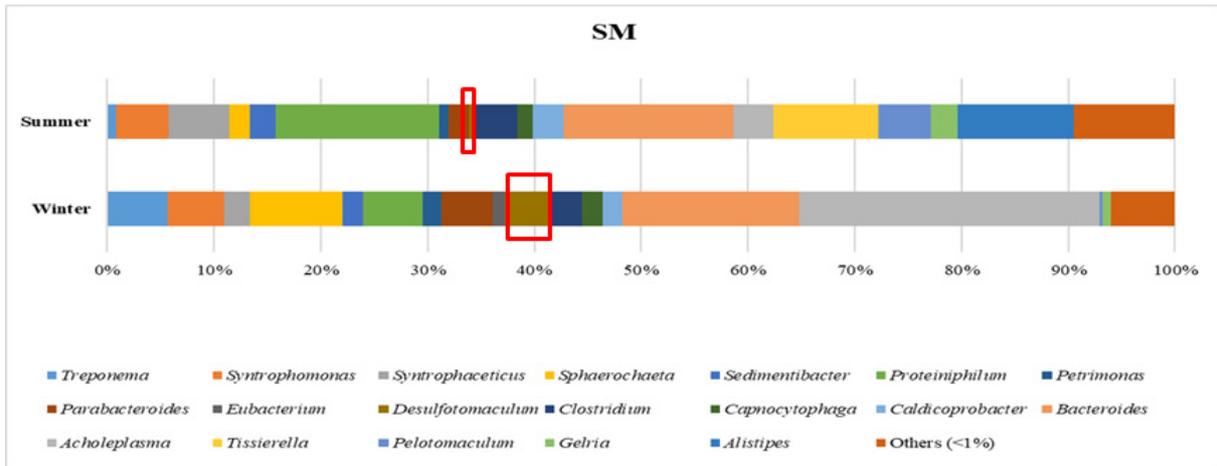


Fig. 14. Results of taxonomic assignment(bacteria) in SM facility.

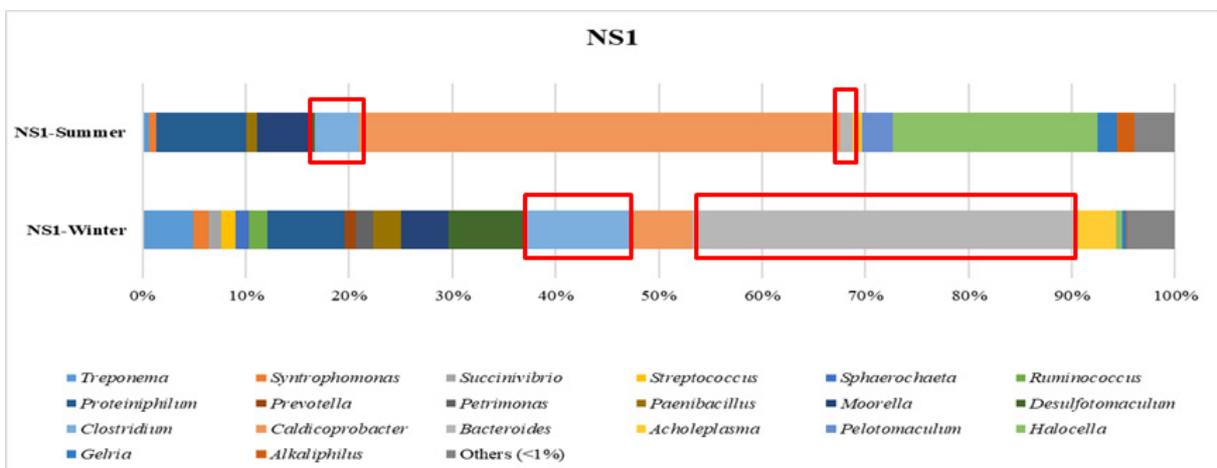


Fig. 15. Results of taxonomic assignment(bacteria) in NS facility.

높으며 단백질의 영향으로 암모니아 농도가 6.240 mg/L로 매우 높은 결과를 보이고 여름철에 우점도가 13.9%로 낮아졌다.

Fig. 14.과 같이 SM 시설의 겨울철 황환원균인 *Desulfotomaculum*의 우점도가 4.1% 까지 증가하여 황화수소 농도가 증가하게 되는 것으로 확인되었다.

Fig. 15.과 같이 NS 시설의 겨울철에 *Clostridium* (10.3 %) *Bacteroides*(37.1 %)이 높은 우점도를 보이며 여름철보다 산발효가 소화조에서 더욱 많이 진행되는 것으로 사료된다.

편집자 주

이 특집원고는 총 3편으로 구성되어 있으며, 1, 2 편은 유기물자원화 26권 1호에 게재되었으며, 3편은 유기물자원화 26권 2호에 게재될 예정입니다.

References

1. Ministry of Environment, A study on the expansion plans of integrated digestion for feces and urine and sewage. (2014).
2. Ministry of Environment, 2015 The status of waste generation and treatment in Korea. (2016).
3. Ministry of Environment, 2015 The status of sewage. (2016).
4. Ministry of Environment, 2016 The status of food waste treatment facilities. (2014).
5. Ministry of Environment, 2015 The status of livestock manure in Korea. (2017).
6. Ministry of Environment, Research of estimate unit load for livestock. (2008).
7. Gyeonggi Research Institute, A study on waste management for prohibiting ocean dumping. (2013).
8. Ministry of Environment, Economic analysis of waste-to-energy project. (2008).
9. C. Y. Lee, W. J. Chung, and J. T. Kim, "A study on the development trends of wastewater sludge treatment technology", Journal of the Korean Geo-Environmental society, 17(8) pp. 5~15. (2016).
10. J. S. Hong, and H. G. Kim, "Analysis of R&D investment of waste reduce, recycle and energy recovery technology", Journal of energy engineering, 21(3), pp. 315~324. (2012).
11. Ministry of Environment, Result of evaluation operations management for public sewage treatment facility. (2011).
12. Ministry of Environment, 2014 Status of organic waste energy utilization facilities. (2014).
13. National Assembly Budget Office, The problems and improvement project of installation to bio-gasification facility for organic waste-An economic feasibility. (2012).
14. Ministry of Environment, Official testing method on wastes. (2012).
15. Ministry of Food and Drug Safety, Official food testing method General testing method. (2017).
16. Ministry of Environment, Official testing method on water. (2015).
17. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation (USA), Standard methods for the examination of water and wastewater, 22. (1998).
18. National Institute of Environmental Research, Translation of guidelines for biogas production and use in Germany. (2014).
19. Tchobanoglous, G., Theisen, H. and Vigil, S., Integrated solid waste management, McGraw-Hill. (1993).
20. National Institute of Environmental Research, Guidelines for operation management of food waste biogasification facilities. (2014).
21. K. F. Jarrell, M. Saulnier, and A. Ley, "Inhibition of methanogenesis in pure cultures by ammonia, fatty acids and heavy metals, and protection against heavy metal toxicity by sewage sludge", Journal of Microbiology, 33, pp. 551-555. (1987).
22. Y. Hong-Wei, and D. E. Brune, "Anaerobic co-digestion

- of algal sludge and waste paper to produce methane”, *Journal of Bioresource Technology*, 98(1), 130-134. (2007).
23. Y. Chen, J. Cheng, K. S. Creamer, “Inhibition of anaerobic digestion process: a review”, *Journal of Bioresource Technology*, 99(10), 4044-4064. (2008).
24. S. K. Khanal, *Anaerobic biotechnology for bioenergy production principles and applications*, Wiley-Blackwell. (2008).
25. Korea Gas Safety Corporation, *Research on the establishment plan of proper quality standard of alternative natural gas for the generation of electricity*. (2010).
24. S. K. Khanal, *Anaerobic biotechnology for bioenergy*