



음폐수의 혐기성 소화 효율 향상을 위한 열가수분해 하수슬러지와 병합처리성 검토

Co-digestion of food waste recycling wastewater with thermally hydrolyzed sewage sludge for the improvement of anaerobic treatment efficiency

허 준
Heo Jun

인하대학교 공학대학원 환경공학과
Department of Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Inha University

pp. 319-327

pp. 329-337

pp. 339-349

pp. 351-362

pp. 363-375

pp. 377-390

pp. 391-402

pp. 403-411

pp. 413-425

pp. 427-437

ABSTRACT

The object of this study is to feasibility assesment for co-digestion efficiency of food waste recycling wastewater(FWR) with thermal hydrolysis process dehydration cake (THP Sludge). As a result of THP pre-treatment experimental conditions to 160°C and 30 minutes, the solubility rate(conversion rate of TCOD to SCOD) of the THP sludge increased by 34%. And the bio-methane potential in the THP sludge increased by about 1.42 times from 0.230 to 0.328 m³ CH₄/kg VS compared to the non-pre-treatment. The substrates of the co-digestion reactor were FWR and THP sludge at a 1:1 ratio. Whereas, only FWR was used as a substrate in the digestion reactor as a control group. The experimental conditions are 28.5 days of hydraulic retention time(HRT) and 3.5 kg VS/m³-day of organic loading rate(OLR). During the 120 days operation period, the co-digestion reactor was able to operate stably in terms of water quality and methane production, but the FWR digestion reactor deteriorated after 90 days, and methane production decreased to 0.233 m³ CH₄/kg VS, which is 67% of normal condition. After 120 days of the experiment, organic loading rate(OLR) of co-digestion reactor was gradually increased to 4.5 kg VS/m³-day and operated for 80 days. Methane production during 80 days was evaluated to be good at the level of 0.349 m³ CH₄/kg VS. As a result of evaluating the dehydration efficiency of the sludge before/after 150-180°C THP using a filter press, it was confirmed that the moisture content of the sludge treated before THP at 180°C was 75% and improved by 8% from 83-85% level. Therefore, it is expected that the co-digestion reactor of FWR and THP sludge will ensure stable treatment water quality and increase bio-methane production and reduction effect of dehydration sludge volume.

Key words: Thermal hydrolysis process, Anaerobic digestion, Sewage sludge, Food waste recycling wastewater, Co-digestion

주제어: 열가수분해, 혐기소화, 하수슬러지, 음폐수, 병합처리

Received 26 October 2022, revised 9 November 2022, accepted 11 November 2022.

*Corresponding author: Heo Jun (E-mail: paint-jun@hanmail.net)

• 허준 (석사과정) / Heo Jun (Master Student)
인천광역시 미추홀구 인하로 100, 22212
100, Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22212, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

유기성폐기물은 교토 의정서에 의한 온실가스 감축 의무화 및 런던협약에 의거한 해양투기가 전면 금지됨에 따라 처리방안이 새로운 문제로 대두되고 있다. 이에 따라 정부는 유기성폐기물을 폐자원으로 인식하고 ‘폐자원 및 바이오매스 에너지대책(2008)’을 수립하여 전국적으로 바이오가스화 시설을 확충하는 사업을 추진하고 있다 (Sudokwon Landfill Site Management Corporation, 2021). 그 대상은 하수슬러지, 음식물류폐기물, 가축분뇨 등이며 유기성폐기물의 바이오가스화는 해양투기가 금지된 시점에서 가장 적합한 육상처리 방안으로서 신재생 에너지를 생산 및 활용하는 측면에서도 관심이 높아지고 있다.

음식물류폐기물의 경우 연간 약 550만톤(21년 기준)이 발생하고 있으며, 그 중 50%(252만톤)가 사료화, 26%(131만톤)가 퇴비화, 14%(71만톤)가 바이오가스화, 나머지 10%(51만톤)가 탈수, 파쇄 등의 공정으로 처리되고 있다 (Ministry of Environment, 2021). 음식물류폐기물에서 분리된 음폐수(FWR : Food waste recycling wastewater)는 대부분 바이오가스화 시설에 반입되어 혐기성 소화를 실시하고 있으며 정부는 2025년까지 14% 수준의 바이오가스화 시설을 30%까지 확충하는 계획을 가지고 있다 (Ministry of Environment, 2021). 음식물류 폐기물은 고농도의 유기물을 함유하고 있어 혐기성 소화조에 의한 처리가 효율적이지만 낮은 pH, 높은 염도, 계절별 성상편차 문제 등으로 인해 운전조건을 설정하는 데 많은 어려움이 발생한다 (Hong, 2016; Ministry of Environment, 2016). 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 음폐수를 가축분뇨, 농축슬러지 등 유기성폐자원과 병합 혐기성 소화 처리하는 방법이 새롭게 제시되고 있으며 병합처리를 실시할 경우 기존 처리시설을 그대로 사용할 수 있기 때문에 바이오가스화 시설 신규건설 등의 경제적 손실을 줄일 수 있다. 하지만 가축분뇨의 경우 계절별 TS 변동 및 저류조 유무 등의 조건에 따라 유입물의 성상이 크게 변화하는 단점이 있으며, 농축슬러지 역시 슬러지 농축한계로 유기물부하량(OLR : Organic loading rate) 조절이 쉽지 않다는 단점이 있다 (Ministry of Environment, 2016). 이러한 단점을 최소화 하 방법으로 하수슬러지와 음폐수의 병합처리가 새로운 대안으로 제시되고 있다.

하수슬러지 발생량은 하수관거정비 및 하수처리장

건설사업의 지속적인 추진으로 매년 증가하고 있는 추세이다. 국내 하수슬러지는 2020년 기준 하수처리장 4,281개소에서 연간 약 421만 톤이 발생하고 있으며, 그 중 44%(186만톤)를 매립, 소각, 고화, 건조, 탄화, 퇴비화 등으로 자체처리, 나머지 46%(193만톤)는 외부위탁 처리(매립)를 시행하고 있다 (Ministry of Environment, 2020). 그러나 이러한 방법은 높은 처리비용, 침출수 발생, 매립장 포화 등의 문제점을 가지고 있다. 상기 문제를 해결하기 위해 최근 하수슬러지를 기계적, 열적, 화학적 처리를 통해 가용화 후 혐기성 소화를 실시하여 슬러지를 감량하고 메탄생성률을 증가시킬 수 있는 기술이 활발하게 연구되고 있으며, 그 중 열가수분해 기술은 160°C 이상의 고온 압력반응기 내에서 고상의 슬러지를 효과적으로 가용화 시킬 수 있는 기술이다. 열가수분해는 고온, 고압 반응이라는 비교적 까다로운 운전조건에도 불구하고 가수분해 작용의 촉진을 통해 유기물을 가용화시켜 혐기성 소화의 수리학적 체리시간 감소와 메탄생성률을 향상을 촉진시킬 수 있다는 장점 때문에 많은 연구와 실증실험이 수행되고 있다 (Kim, 2021; Oh, 2013; Seo, 2012). 열가수분해를 적용하여 하수슬러지를 전처리할 경우 가수분해 촉진에 의한 메탄생산량 증가, 처리시간 단축, 휘발성 고형물 감량효율 증가, 탈수성 증가로 인한 함수율 개선 등의 효과가 있는 것으로 평가되었다. 그러나 열가수분해 하수슬러지 단독처리 또는 열가수분해 탈리액을 대상으로 혐기성 소화효율을 평가하거나 180°C 이상 고온에서의 탄화반응을 이용한 슬러지 탈수성 개선 및 고형연료화 등 단일기질에 대한 열가수분해 적용성을 평가할 수 있는 연구(Lim, 2015; Seo, 2012)가 주를 이루고 있었으며 병합처리 효율을 평가하기 위한 연구는 아직 활발하게 진행되지 않는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 음폐수 혐기성 소화조의 단점을 보완하고 하수슬러지 처리에 대한 새로운 방안을 제시하기 위해 다양한 온도의 열적처리를 통해 하수슬러지를 가용화시키고 이를 음폐수와 병합 혐기성 소화를 실시하여 그 효율과 탈수성 등을 평가하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 음폐수 및 하수슬러지의 성상

본 연구에 사용된 혐기소화 미생물, 음폐수, 농축슬



Table 1. Characteristics of samples

Characteristics	Unit	Sewage sludge cake	Thickened sludge	FWR	Inoculum
pH	-	-	7.3	3.8	7.2
Moisture content	%	82.1	95.2	88.6	97.5
TCOD	mg/L	179,444	16,338	201,500	30,152
SCOD	mg/L	27,030	1,785	184,241	21,594
TS	mg/L	171,215	45,131	114,050	38,984
VS	mg/L	154,242	21,206	99,800	25,852
T-N	mg/L	9,810	1,240	4,200	3,958
NH ₃ -N	mg/L	1,463	820	3,850	3,058

러지 및 하수슬러지는 A시의 에너지자원화 시설과 하수처리장에서 발생한 시료로서 pH, 함수율, COD, T-N, TS, VS 등을 분석하였다. 사용된 기질 및 혐기슬러지의 성상은 Table 1과 같다.

2.2 열가수분해

열가수분해 반응기는 Fig. 1과 같이 유효용적 5, 50 L 2가지 용량의 stainless steel 재질로 제작하였다. 5 L 반응기는 BMP 열가수분해 시료제조, 50 L 반응기는 연속식 혐기소화 열가수분해 시료제조에 활용하였다. 반응기 내부의 적절한 온도유지를 위해 전기가열 방식을 이용한 이중 자켓을 설치하였으며 실험 중 온도 유지 및 슬러지의 혼합을 위해 반응기 내부에 기계식 교반기를 설치하였다.

BMP 평가를 위해 하수슬러지(함수율 82%)와 농축

슬러지(함수율 95%)를 5:1(2 kg : 0.4 kg)로 혼합, 함수율 약 85%의 슬러지를 제조하였다. 농축슬러지를 혼합한 이유는 하수슬러지의 함수율이 낮아 고체 상태로 존재하기 때문에 교반기를 사용하더라도 유동성이 없어 슬러지 전체에 균일한 가수분해 반응을 기대하기 어렵기 때문이다. 다만 직접 가열방식이 아닌 스팀을 활용한 열가수분해 방식을 적용할 경우에는 함수율 조절을 위한 상기 혼합공정을 생략할 수 있을 것으로 판단된다. 제조된 시료를 5L 반응기에 주입하여 반응온도 150~180°C(150, 160, 170, 180°C), 반응시간 30분으로 설정하여 운전하였다.

2.3 잠재적 메탄발생량 (BMP : Biochemical Methane Potential)

BMP는 혐기소화 잠재적 메탄발생량을 측정하는 방

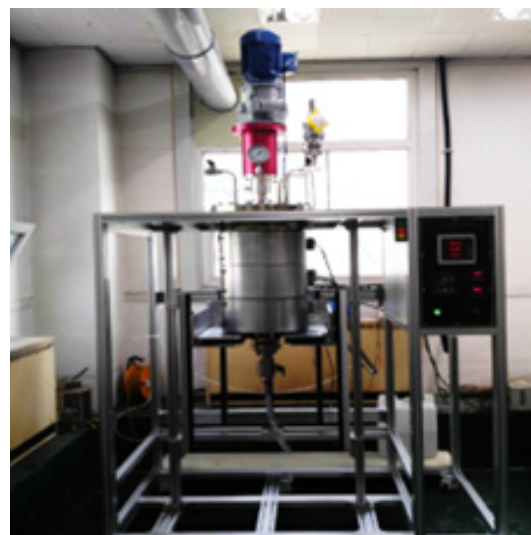


Fig. 1. Lab. scale thermal hydrolysis system(5L/50L).

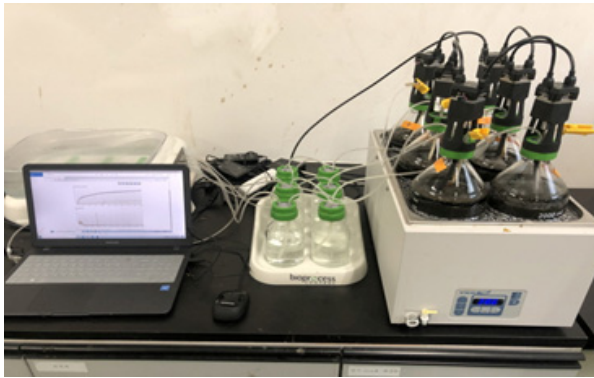


Fig. 2. BMP test equipment.

법이다(Owen et al., 1979). 본 연구에서는 조건별 열가수분해 슬러지에 대한 잠재적 메탄발생량을 측정하였으며 정확한 측정을 위해 Fig. 2와 같이 Bioprocess社의 자동 바이오메탄포텐셜 측정기 AMPTS II를 활용하였다. 측정방법은 반응기에서 발생한 바이오가스가 gas flow meter를 통과하여 그 부피를 detector에 기록하는 방식이다.

BMP test 전 채취한 혐기소화액의 잔여가스 및 유기물을 충분히 제거하기 위해 38°C에서 10일간 배양한 후 Inoculum(접종액)으로 사용하였다. Substrate(기질)와 Inoculum의 비율(S/I ratio)은 휘발성고형물(VS; Volatile Solid)을 기준으로 설정하였으며 그 비율은 0.8로 조절하였다. 또한 Inoculum 자체에서 발생하는 메탄발생량 보정을 위해 접종액만을 투입한 바탕시료(blank) 1개를 각 실험마다 운영하였다. BMP를 위한 반응기 유효용적은 2L이며 이산화탄소에 의해 메탄발생량이 과대평가 되는 것을 방지하기 위해 계측기 전단에 NaOH bubble trap을 설치하였다. 모든 tube를 체

결한 밀폐상태에서 상층부에 질소를 충전하여 혐기조건을 조성하였다. 교반기 운전은 60초를 기준으로 좌/우로 회전할 수 있도록 설정하여 슬러지의 원활한 혼합을 유도하였다.

2.4 혐기소화

열가수분해 슬러지와 음폐수의 병합처리 효율을 평가하기 위한 혐기성 소화조 반응기를 Fig. 3과 같이 구성하였다. 주요 구성요소는 유효용적 10L의 아크릴 반응기, 온도를 38~39°C로 유지하기 위한 이중자켓, 히터 및 펌프, 시료를 주입하기 위한 정량펌프(Peristaltic pump), 샘플을 채취하기 위한 Sample port, 그리고 메탄발생량을 측정하기 위한 CO₂(NaOH) trap과 메탄 측정장치이다. 반응기는 2 set를 제작하여 음폐수 단독처리와 음폐수/열가수분해 슬러지 병합처리에 대한 평가를 실시하였으며 평가항목은 메탄발생량과 처리수질 등이다. 실험에 필요한 음폐수와 열가수분해 슬러지를 1:1로 혼합하여 병합처리 시료를 준비하였다. 각 시료에 대한 혐기소화 조건은 Table 2 및 3과 같다. A시에서 운영 중인 음폐수 바이오가스화 시

Table 2. Operating conditions of anaerobic digesters

Condition		Unit
OLR	Digester Volume	10 L
	FWR	3.43 kg VS/m ³ -day
	THP Sludge + FWR	3.75 kg VS/m ³ -day
Flow rate		350 mL/day
Temp.		38.5~39.0 °C
HRT (Hydraulic retention time)		28.6 days

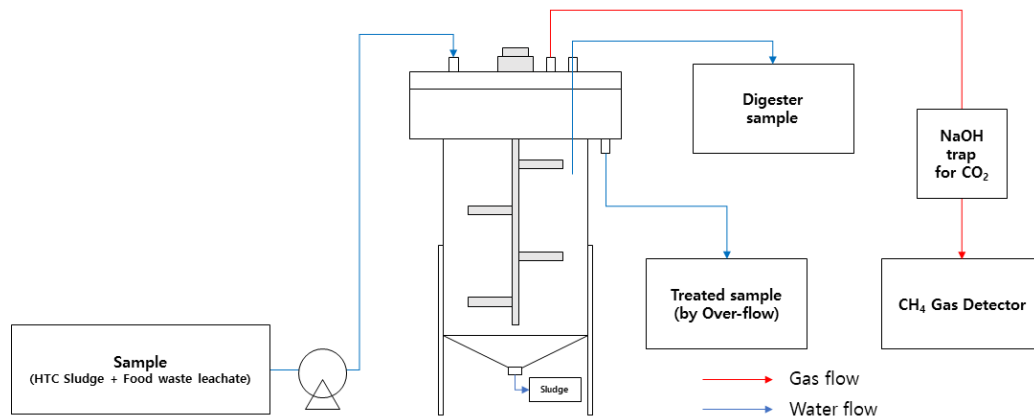


Fig. 3. Schematic diagram of anaerobic process.



Table 3. Characteristics of FWR and FWR combined with THP sludge

Characteristics	Unit	THP sludge + FWR (1:1)	FWR
pH	-	4.1	3.8
Moisture content	%	88.3	88.6
TCOD	mg/L	197,743	201,500
SCOD	mg/L	131,450	184,241
TS	mg/L	121,005	114,050
VS	mg/L	107,944	99,800
T-N	mg/L	7,312	4,200
NH ₃ -N	mg/L	2,656	3,850

설에서는 음폐수 유기물 부하량이 3.5 kg VS/m³-day 이상일 때 미생물 활동저하에 따른 메탄발생량 저하, 수질 악화 등의 문제가 발생된다고 보고되고 있다. 따라서 최대 부하량이라고 판단되는 조건을 설정하였으며 그 조건은 음폐수 3.43 kg VS/m³-day, 음폐수/열가수분해 슬러지 3.75 kg VS/m³-day이다. 수리학적 체류시간은 두 반응조 모두 동일하게 28.5일로 설정하였다. 정량펌프를 이용하여 일정한 유량으로 시료를 반응조 내에 주입하고 교반기를 가동하여 시료와 혐기성 슬러지의 균일한 혼합을 유도하였으며 혐기소화 처리수는 유입유량에 의해 overflow되어 배출된다. 소화조에서 발생한 바이오 가스는 소화조 상단에 장착된 tube를 통해 Gas detector로 유입되어 계측 값이 계수된다. 실험 중 배관이나 소화조 접합부 등의 leak를 확인하기 위해 수시로 bubble test를 실시하여 바이오가스 누설여부를 확인하였다.

혐기성 소화조의 운전기간은 총 200일간 실시하였다. 음폐수 단독처리 혐기성 소화조는 90일을 기점으로 소화효율이 저하되어 120일이 경과한 후 운전을 종료하였으나, 대조군인 병합처리 소화조의 경우 동기간동안 안정적 처리가 가능함을 확인하였으며, 120일 경과 후 유기물 부하량을 4.50 kg VS/m³-day 까지 점차 증가시켜 80일 동안 추가운전을 실시하였다. 이때 수리학적 체류시간은 23.8일이다.

혐기소화 탈리액 시료 분석은 총 고형물(TS; Total solid), 휘발성 고형물(VS; Volatile solid), 총 화학적 산소요구량(TCOD; Total chemical oxygen demand), 용존성 화학적 산소요구량(SCOD; Soluble chemical oxygen demand), 총질소(TN; Total nitrogen), 휘발성 지방산(VFA; Volatile fatty acid) 등이며 표준분석법에 따라 분석을 수행하였다.



Fig. 4. Membrane filter press.

Table 4. Specification of filter press

Parameter	Spec.
Type	Membrane squeezing type
Plate size (mm)	250*250
Chamber amount (ea)	10
Filter area (m ²)	0.4
Cake thickness (mm)	17.5
Filter cloth	PP450D
Air Permeability (cm ³ /cm ² /s)	0.3

2.5 필터프레스

슬러지의 탈수성을 평가하기 위해 Chamber volume 7L, 필터 면적 0.4 m² 투과도 0.3 cm/s 규모의 필터프레스를 제작하였다 (Fig. 4, Table 4). 150~180°C 범위의 열가수분해 슬러지를 필터프레스에 주입하여 약 10 bar의 압력으로 여과판에 squeezing한 후 여액과 케이크를 분리하고 케이크의 함수율을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열가수분해 가용화율에 따른 시료 선정

열가수분해 전/후 슬러지 형상은 Fig. 5와 같다. 처리가 완료된 시료를 분석한 결과(Table 5) SCOD가 크게 증가한 것을 확인할 수 있는데 이는 열가수분해를 통해 슬러지 세포벽이 파괴되고 이와 더불어 유기성 물질의 가용화가 이루어진 것으로 판단할 수 있다 (Eq. 1, 2). 가용화율은 체류시간 30분 조건에서 온도

별 150°C : 29.6%, 160°C : 33.9%, 170°C : 34.8%, 180°C : 34.0%로 각각 평가되었으며 160°C 이상에서는 슬러지 가용화율이 ±1% 수준으로 큰 편차를 보이지 않았다. 따라서 에너지 비용을 고려하여 160°C를 슬러지 열가수분해 최적 온도로 결정하였다.

다음으로는 반응시간에 의한 가용화율의 변화를 평가하기 위해 최적 온도 조건인 160°C에서 반응시간을 60분으로 증가시켜 추가 실험을 실시하였다. 그러나 반응시간의 증가에도 가용화율은 33.8% 수준으로 큰 변화가 없었기 때문에 최적 운전조건을 160°C, 30분으로 설정하였다.

$$PCOD_s = TCOD_s - SCOD_s \quad (1)$$

$$Solubilization\ COD = \frac{SCOD_t - SCOD_s}{PCOD_s} \times 100 \quad (2)$$

COD_s = 탈수슬러지 COD

COD_t = 온도별 열가수분해 슬러지 COD

가용화율의 적합성을 정확히 평가하기 위해 각 시료에 대해 30일간 잠재적메탄발생량을 측정하였으며 그 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 기존 혐기소화 방식인

농축슬러지의 경우 약 0.122 m³ CH₄/kg VS의 메탄발생량을 나타냈으며, 전처리를 하지 않은 하수슬러지는 0.230 m³ CH₄/kg VS, 열가수분해 하수슬러지는 150°C, 0.298 m³ CH₄/kg VS / 160°C, 0.321 m³ CH₄/kg VS / 170°C, 0.306 m³ CH₄/kg VS / 180°C, 0.311 m³ CH₄/kg VS 분포를 각각 나타내었다. 이는 Table 4에서 나타난 것처럼 열가수분해 전처리를 통한 슬러지의 가용화로 인해 메탄발생량이 증가할 수 있음을 의미한다. 또한 전통적인 혐기소화방식의 경우 잠재적메탄발생량의 80% 수준의 메탄을 생성하는데 최소 15일 이상이 소요되었으나 열가수분해 전처리를 실시한 슬러지는 BMP 초기단계에서 메탄생성이 매우 빠르게 진행되어 잠재적메탄발생량의 80% 수준을 달성하기 까지 7~10일이 소요되었다. 이는 열가수분해 전처리를 통해 율속단계인 가수분해를 촉진시켜 혐기성 소화조의 수리학적 체류시간 단축 즉, 소화조 용량 감소 등을 실현할 수 있음을 의미한다. 열가수분해 전처리가 메탄 발생에 긍정적인 영향을 미쳤지만 BMP 실험 결과 가용화 온도 별 최종 메탄생성량 및 시간별 메탄 발생량은 큰 차이를 나타내지 않았다. 따라서 본 연구에서는 에너지 비용과 기타 조건 등을 고려하여

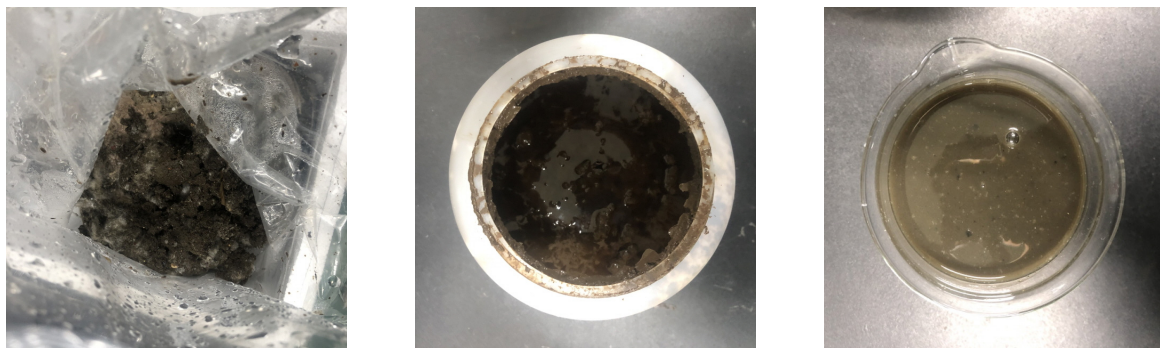


Fig. 5. Sludge cake / THP sludge / Thickened sludge.

Table 5. Analysis results according to THP conditions

THP Condition		TS	VS	TCOD _{cr}	SCOD _{cr}	Solubilization COD	TN	NH ₃ -N	NH ₄ ⁺
Temp(°C)	Time (min)	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	%	mg/L	mg/L	mg/L
-	-	171,215	154,242	179,444	27,030	-	9,810	1,463	1,692
150	30	125,474	116,113	190,471	72,224	29.65	10,211	1,305	1,884
160		127,951	116,087	193,985	78,659	33.87	10,424	1,463	2,125
170		126,284	114,578	191,422	79,987	34.75	10,627	1,823	2,653
180		125,659	113,985	190,532	78,854	34.00	10,644	1,913	2,867
160		60	121,594	110,473	177,862	78,510	33.78	10,890	1,895

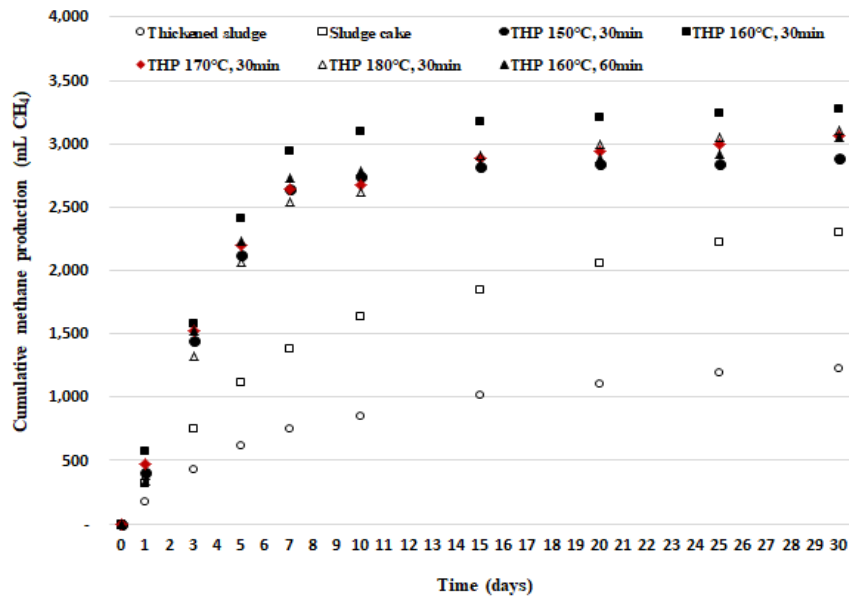


Fig. 6. Cumulative methane production curve of each sample.

연속식 혐기성 소화조의 투입시료 조건은 160°C, 30 분으로 최종적으로 선정하였다.

3.2 음폐수 단독처리, 음폐수/열가수분해 하수슬러지 병합처리 메탄발생량 평가

음폐수와 음폐수/열가수분해 슬러지 병합처리 메탄 발생량 평가를 위해 연속식 혐기성 소화조를 200일 간 운전하였다(Fig. 7). 음폐수 단독처리와 음폐수/열가수분해 슬러지 병합처리의 운전초기부터 90일 동안

평균 메탄발생량은 0.359 m³ CH₄/kg VS로 유사하게 나타났다. 그러나 음폐수 단독처리 혐기성 소화조의 경우 90일을 기점으로 메탄발생량이 현저하게 감소하기 시작하여 120일 경과한 시점에서 0.233 m³ CH₄/kg VS 수준을 나타내었다. 이때 병합처리 혐기성 소화조의 메탄발생량은 0.348 m³ CH₄/kg VS으로 정상운전 상태를 유지하였다. 운전일 120일을 기준으로 음폐수 단독처리 혐기성 소화조 메탄발생량은 병합처리 혐기성 소화조 대비 67.0% 수준으로 현저한 효율저하가

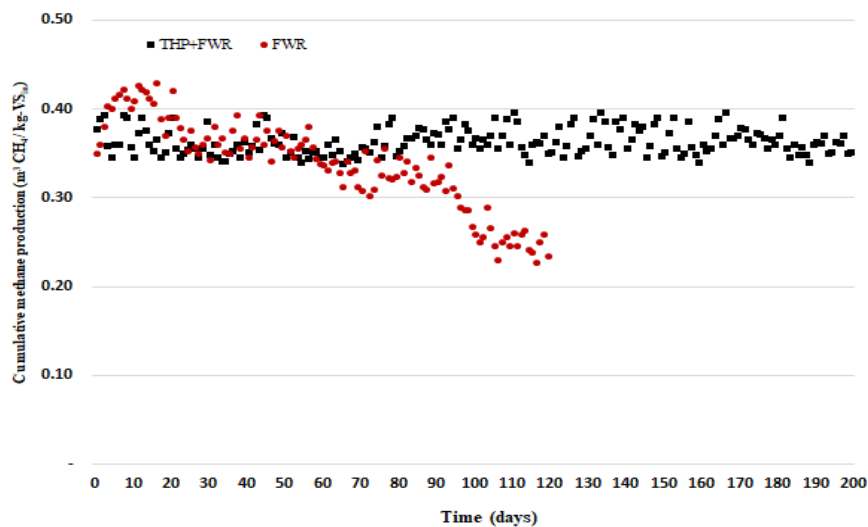


Fig. 7. Daily methane production of FWR & THP+FWR.

pp. 319-327

pp. 329-337

pp. 339-349

pp. 351-362

pp. 363-375

pp. 377-390

pp. 391-402

pp. 403-411

pp. 413-425

pp. 427-437

나타났다.

120일 이후 음폐수 단독처리 혐기성 소화조의 시료 투입을 중단하였으며, 병합처리 혐기성 소화조의 경우 200일까지 운전을 진행하였다. 이때 유입 유량을 150일까지 서서히 증가시키고, 이후 동일한 조건에서 실험을 진행하였으며 그 결과 150일이 경과한 시점의 유기물 부하는 $4.53 \text{ kg VS/m}^3\text{-day}$ 이었다. 150일 이후 수리학적 체류시간은 23.8일로 감소하였지만 병합처리 혐기성 소화조의 메탄발생량은 정상상태를 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 열가수분해를 통해 동일 용량의 소화조에서 부하량을 증가시켜 수리학적 체류시간을 단축시키고 이와 더불어 메탄생산량을 증가시킬 수 있음을 의미한다.

3.3 혐기소화 처리수 수질 평가

음폐수 혐기성 소화조의 메탄발생량이 감소한 원인을 파악하기 위하여 수질분석 데이터를 검토하였다. 수질 분석항목은 pH, COD, TN, VFA, VS 등이며, 그 결과는 Fig. 8에 나타낸 바와 같다. 음폐수 단독처리 혐기성 소화조의 메탄발생량이 저감되는 시점인 90일을 기점으로 처리수 COD, VS, VFA 농도가 큰 폭으로 증가하기 시작하였으며 반대로 pH는 감소하는 추세를 나타내었다.

소화조 운전 120일 경과 후 음폐수 단독처리 혐기성 소화조 처리수의 COD는 $25,784 \text{ mg/L}$, 병합처리 혐기성 소화조 처리수 COD는 $20,624 \text{ mg/L}$ 로 나타났다. 초기 소화조 유출수의 COD 농도가 $21,500 \text{ mg/L}$ 이었

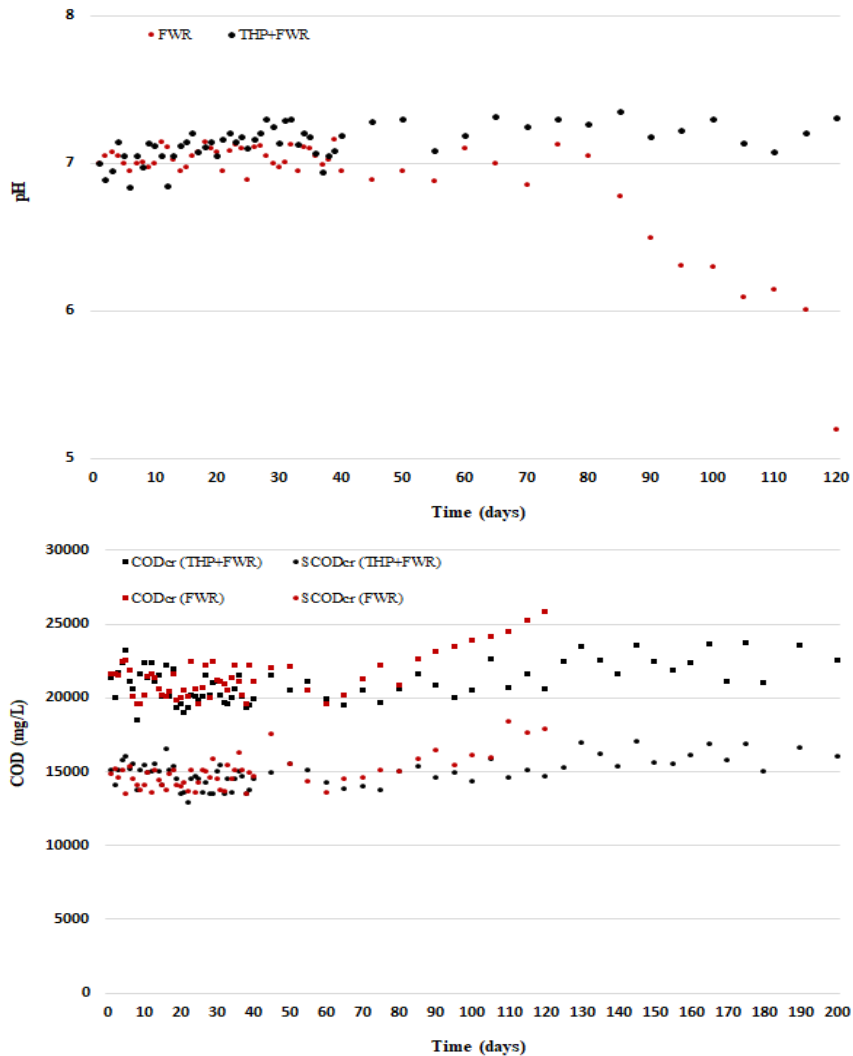


Fig. 8. Variations of pH, COD, TN, VFA, and VS of the digesters.

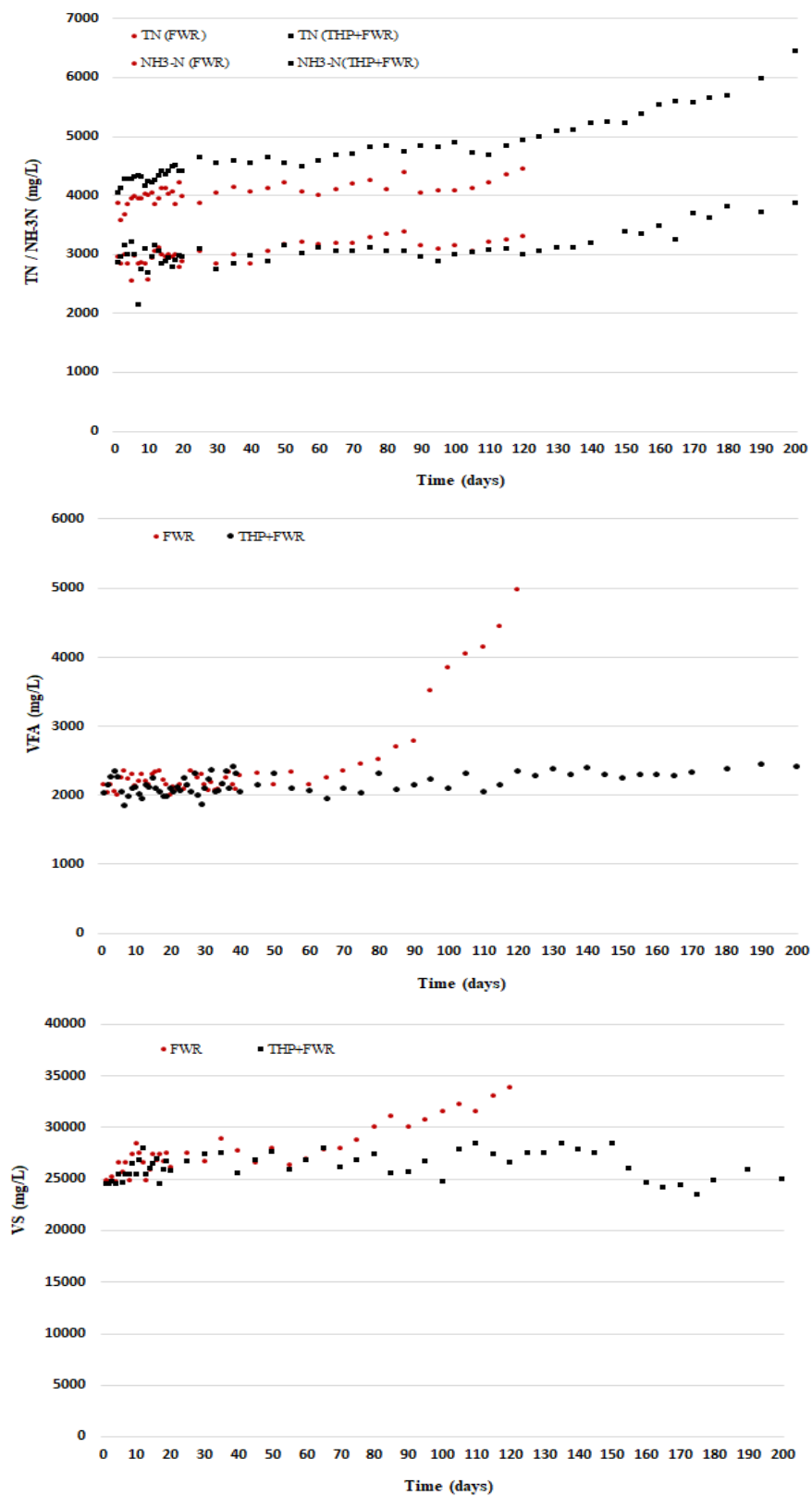


Fig. 8. Continued.

pp. 319-327

pp. 329-337

pp. 339-349

pp. 351-362

pp. 363-375

pp. 377-390

pp. 391-402

pp. 403-411

pp. 413-425

pp. 427-437

던 것을 고려하면 병합처리 혐기성 소화조의 경우 초기와 비슷하게 안정적인 수질을 나타내고 있으나, 음폐수 단독처리 혐기성 소화조는 초기 대비 약 25% 수질이 악화된 것을 확인할 수 있었다. VS도 초기 24,500 mg/L에서 120일 경과 후 음폐수 단독처리 혐기성 소화조 처리수 33,885 mg/L, 병합처리 혐기성 소화조 처리수 26,584 mg/L로 음폐수 단독처리 혐기성 소화조의 처리수가 약 27% 높은 수준으로 나타났다. 이때 VS 제거율은 각각 66.1% 및 75.24% 수준으로 음폐수 단독처리 혐기성 소화조의 처리효율이 낮은 것을 확인할 수 있었다.

VFA의 경우 초기 2,100 mg/L 수준에서 120일 경과 후 음폐수 단독처리 소화조가 4,985 mg/L까지 상승한 반면 병합처리 소화조는 2,250 mg/L 수준을 유지하였다. 그 결과 단독처리 소화조의 pH는 5.20으로 운영이 불가능한 상태까지 저하 되었으나 병합처리 소화조의 pH는 7.31로 안정적인 값을 유지하였다. VFA 축적과 더불어 pH가 감소하는 것은 음폐수 단독처리 혐기성 소화조에서 종종 발생하는 현상이다. 그 원인으로는 고농도 염분, 암모니아성 질소의 독성, 필수 미량영양물질의 결핍 등이 제시되었다(Lee, 2015). 본 연구에서도 동일한 유기물 부하에서 음폐수 단독처리의 경우 VFA 축적으로 반응조가 실패하였지만, 병합처리의 경우 정상적인 운전이 가능하였다. 음폐수의 단독처리의 문제점과 그 해결방안은 다음에 자세히 토의하였다.

한편 총질소(TN)와 암모니아성 질소(NH₃-N)의 경우 초기 소화조 농도가 각각 4,200 및 3,200 mg/L이었으며, 120일이 경과한 시점에서 음폐수 단독처리 혐기성 소화조는 4,350 및 3,298 mg/L, 병합처리 혐기성 소화조는 4,781 및 3,152 mg/L 으로 증가하였다. 이는 병합처리 혐기성 소화조 내에 하수슬러지의 고농도 질소가 축적되었기 때문인 것으로 판단되며, 투입슬러지(THP+FWL)의 총질소가 7,312 mg/L인 것을 감안하였을 때 처리수 총질소는 약 7,000 mg/L 수준으로 유지될 것으로 평가되었다. 또한 열가수분해 전처리에 의해 하수슬러지의 질소가 유기물 발효로 축적되어 소화조 내 암모니아성 질소가 증가하면서 생성된 NH₄HCO₃가 알칼리도로 작용해 pH 변동폭을 최소화하고 안정적으로 유지된 것으로 평가되었다. 다만 투입슬러지(THP+FWL)의 총질소가 7,000 mg/L 수준으로 유지될 것으로 예상되기 때문에 열가수분해 하수

슬러지 병합처리를 실시할 경우 후속 연계폐수처리 공정에서 총질소 저감에 대한 고려가 반드시 수반되어야 할 것으로 증가하였다. 이는 병합처리 혐기성 소화조 내에 하수슬러지의 고농도 질소가 축적되었기 때문인 것으로 판단되며, 투입슬러지(THP+FWR)의 총질소가 7,312 mg/L인 것을 감안하였을 때 처리수 총질소는 약 7,000 mg/L 수준으로 유지될 것으로 평가되었다. 또한 열가수분해 전처리에 의해 하수슬러지의 질소가 유기물 발효로 축적되어 소화조 내 암모니아성 질소가 증가하면서 생성된 NH₄HCO₃가 알칼리도로 작용해 pH 변동폭을 최소화하고 안정적으로 유지된 것으로 평가되었다. 다만 투입슬러지(THP+FWR)의 총질소가 7,000 mg/L 수준으로 유지될 것으로 예상되기 때문에 열가수분해 하수슬러지 병합처리를 실시할 경우 후속 연계폐수처리 공정에서 총질소 저감에 대한 고려가 반드시 수반되어야 할 것으로 판단된다.

음폐수 단독처리의 어려움과 그 해결방안은 여러 연구자에 의해 제시되었다. Choi(2009)에 의하면 음폐수 혐기성 소화조의 적정 수리학적 체류시간을 80일로 설정하여 소화조의 200일 이상 안정적인 운영이 가능한 것으로 보고되었다. 그는 국내 음폐수 특성상 BOD, COD, VS 등 수질 변동폭이 매우 크고 유분, 리그닌 등 난분해성 물질과 저해물질이 함유되어 있기 때문에 적정 체류시간이 통상적인 소화조 보다 매우 길어야 한다고 제시하였다. 본 연구에서 음폐수의 짧은 수리학적 체류시간으로 90일 동안 운전이 가능하였던 것은 음폐수의 수질을 최대한 일정하게 유지하여 사용하였기 때문으로 판단된다. 실제 음폐수를 채취했던 A시 바이오가스화 시설은 VFA 상승, pH 저하 등으로 인한 소화조의 문제가 발생하여 설계 부하량의 60% 수준으로 음폐수를 주입하고 있는 실정이다. 이와 비슷하게 2014년 감사원에서 실시한 음식물류 폐기물 바이오가스화 시설 설치사업 감사결과(kbmaeil, 2015)에 따르면 소화조 성능검사 시 설계용량 대비 5~60% 수준의 음폐수를 주입하거나 반입용량을 규제하여 가동률을 고의로 낮춘 경우, 운전경험 부재로 인한 시설중단, 바이오가스 생산량 저하로 인한 임의적인 병합처리 실시 등의 사례들이 보고되어 있다. 이렇듯 음폐수 혐기성 소화조의 가장 큰 이슈는 부하량에 의한 소화조 내 VFA상승 등의 문제와 더불어 발생하는 효율저하라고 할 수 있다 (Yun, 2013). 이를 개선하기 위해서는 유기물 부하량을 줄



이고 수리학적 체류시간을 길게 하여 소화조가 부하 변동에 적응하고 난분해성 물질이 충분히 분해될 수 있도록 유도하는 것이다. 그러나 이는 현실적으로 적용하기가 매우 어려운 상황이며 최선의 방안은 병합처리를 실시하여 효율저하를 감소시키는 것이다. 본 연구에서는 음폐수와 열가수분해 슬러지의 병합처리 운전을 통해 부하량에 의해 발생할 수 있는 문제해결과 더불어 수리학적 체류시간을 단축할 수 있음을 확인하였다. 선행 연구(Lee, 2022)에서도 나타난 것처럼 열가수분해 전처리는 가용화로 인해 메탄생성에 유리하게 작용되며, 소화조 내 NH₃와 CO₂에 의해 발생한 NH₄HCO₃가 알칼리도로 작용하여 소화조의 안정적인 유지가 가능한 것으로 나타났다. 또한 음폐수 단독처리 시 작용할 수 있는 리그닌, 유분, 염분 등 독성물질을 열가수분해 슬러지와 병합함으로써 희석에 의한 완충효과를 기대할 수 있다.

3.4 탈수성 평가

열가수분해의 탈수성 개선 효과를 평가하기 위해 필터프레스를 이용하여 슬러지와 탈리액을 분리시킨 후 함수율을 측정 및 평가하였다. 혐기성 소화조 처리수 슬러지를 대상으로 필터프레스 평가를 진행하는 것이 바람직하지만 소화조 용량이 10L 규모로서 필터프레스에 주입할 슬러지의 발생량이 적기 때문에 하수슬러지와 열가수분해 하수슬러지에 대한 탈수성을 비교, 평가하였다.

기존 하수슬러지의 함수율은 80~85% 수준을 유지하고 있다. 이 하수슬러지를 열가수분해한 시료를 대

Table 6. Results of sludge filter press

Pretreatment conditions		Moisture content (%)
None (Sewage Sludge)		83.2
THP	150°C, 30min	82.9
	160°C, 30min	82.4
	170°C, 30min	83.1
	180°C, 30min	75.4
	160°C, 60min	80.5

상으로 필터프레스 여과를 실시한 결과는 Table 6과 같다. 그 결과 150~170°C의 비교적 저온에서 전처리를 실시한 시료는 탈수효율이 증가하지 않았으며 180°C의 온도로 전처리를 실시한 하수슬러지는 75% 수준의 함수율을 나타내었다. 온도가 증가할수록 탄화도가 커지게 되고 이로 인해 소수성이 증가하여 탈수효율이 증가하는 것으로 판단된다(Kim, 2021). 슬러지 탈수성 개선을 목적으로 열가수분해 전처리를 도입하고자 할 경우 180~200°C 이상의 수열탄화 수준의 온도조건으로 전처리하는 것이 효과적일 것으로 평가되며 이를 위한 에너지비용 등의 검토가 필요할 것으로 판단된다.

3.5 경제성 평가

열가수분해 하수슬러지 병합처리 도입에 가장 적합한 시설은 음폐수 바이오가스화 시설로서 소화조에 문제가 발생하여 부하량을 감소시켜 운전하고 있는 시설이라고 판단된다. 바이오가스화 시설을 개선하기 위한 목적으로 열가수분해 플랜트를 도입하고자 할 경우 기

Table 7. Economic evaluation according to THP plant construction & operation

Parameter		Expense
Cash-out	Sludge transport cost	6.9
	Corporate tax	3.8
	Waste disposal cost	3.2
	Labor cost	1.7
	Administrative expense	1.2
	Electricity cost	0.6
	Repair charge	0.4
Cash-in	Cost of bringing sludge	27.7
	Utilization of Bio-gas	0.5
Construction cost of THP plant		70.0
		Hundred million won/year
		Hundred million won

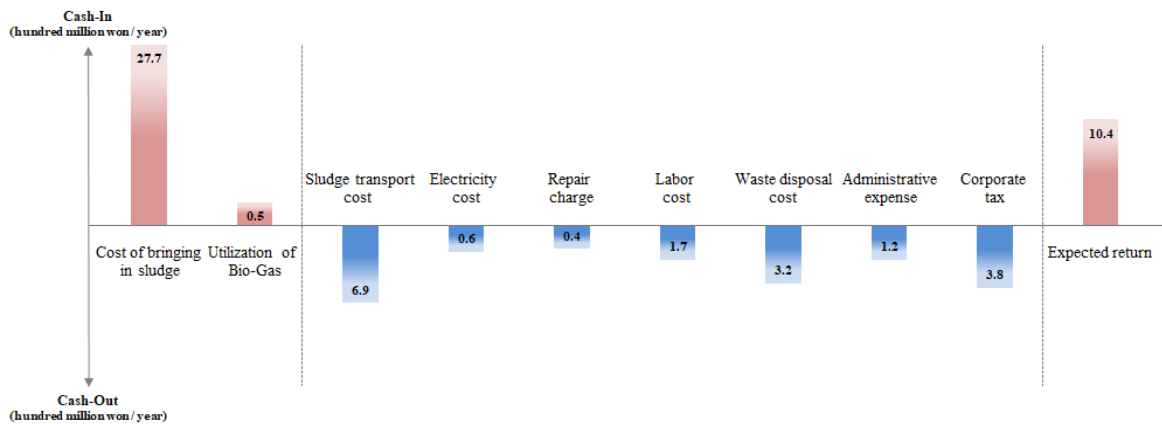


Fig. 9. Economic evaluation of facility introduction.

존 소화조, 발전기, 건조기 등의 시설을 활용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 설계용량 140 m³/day의 처리가 가능한 소화조에서 부하량 또는 운영미숙 등의 문제로 약 50% 수준인 음폐수 70 m³/day의 유량으로 처리하고 있어 병합처리를 검토 중인 시설을 가정하여 경제성 평가를 시뮬레이션 해 보았으며 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 열가수분해 반응기와 열교환기, 펌프 등 70 m³/day 용량의 plant 건설비는 약 70억원이 소요될 것으로 예상하였다. 시설 운영비는 연간 약 17.8억원이 소요되었으며, 슬러지 운반비가 38.8%, 법인세 21.3%, 건조슬러지 처분비 18.0%, 인건비 9.6%, 관리비 6.7%, 전력비 3.4%, 수선비 2.2%로 구분되었다. 수입은 하수슬러지 반입/처리비로 연간 27.7억원으로 산출하였는데 하수슬러지 처리단가 120,000원/톤, 처리용량 70톤/일, 연간 운전시간 330일을 적용하였다. 바이오가스 판매로 인한 예상 수익은 연간 약 0.5억원이며 429 kWh, 316.48 원/kWh, 운전시간은 동일하게 330 일/년을 적용하였다.

상기 데이터를 종합한 결과 병합처리 시 연간 기대이익은 10.4억원이 예상되며 설비 투자비 70억원을 고려하면 6.7년 경과 후 투자비를 회수할 수 있을 것이라고 평가되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 음폐수 단독 혐기소화조 운영 상 발생할 수 있는 문제를 해결하기 위해 하수슬러지 열가수분해 전처리를 적용한 병합 혐기소화 가능성을 평가하였다. BMP test 결과 하수슬러지 열가수분해 전처

리 최적 조건은 160°C, 30분으로 평가되었으며, 이때 가용화율은 약 34% 수준으로 나타났다. 유효용적 10L의 혐기성 소화조를 3.5 kg VS/m³-day의 OLR로 운전한 결과 음폐수 단독처리 소화조는 VFA 상승, pH 저하, 메탄발생량 감소 등의 문제로 인해 120일 경과 후 운전을 중단한 반면, 음폐수와 열가수분해 슬러지 병합처리 혐기성 소화조는 안정적인 처리가 가능하였다. 이후 병합처리 소화조의 OLR을 4.5 kg VS/m³-day 까지 증가시켜 80일 동안 추가 운전한 결과 수질과 메탄생산량의 변동 없이 안정적 처리가 가능함을 확인하였으며, 이때 수리학적 체류시간은 23.8일로 단독 처리 대비 19%의 처리시간 단축을 달성하였다. 이상의 결과로부터 음폐수와 열가수분해 하수슬러지를 병합 처리할 경우 높은 유기물 부하량에서도 안정적인 처리와 수리학적 체류시간 단축이 가능함을 확인하였다. 경제성 평가결과 음폐수 바이오가스화 시설에 열가수분해 70 m³/d 규모의 Plant를 도입하여 병합처리를 실시할 경우 투자비 70억원, 연간 기대이익 10.4억원으로서 투자비 회수기간 약 6.7년이 소요될 것으로 예상된다.

References

Choi, K.H. (2009). A Study on Optimization in Anaerobic Digestion of Food Wastes, Master's Thesis, Department of Environmental Engineering of University of Seoul, 56-57.
 Gyeongbuk Maeil Newspaper, <http://www.kbmaeil.com/news/articleView.html?idxno=357459> (July 19, 2015).
 Hong, Y.P., Kim, H.S., Kim, U.Y., and Shin, H.G., 2016, Study



- on the public food waste recycling facility operation(I) - Focusing on the current state of operation and the problems -, J. Korea Org. Resour. Recycl. Assoc., 24(1), 41-49.
- Kim, H.J. (2021). Optimization of dewatering ability and solubilization for sewage sludge using thermal hydrolysis process, PhD Thesis, department of civil and environmental system engineering Graduate School of Sungkyunkwan University, 40-42.
- Lee, S.J. (2015). Anaerobic Co-digestion of Food Waste Leachate and Sewage Sludge, Master's Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering Graduate School of Konkuk University, 15-17.
- Lee, S.Y. (2022). Enhancement of Anaerobic Digestion Using Thermal Hydrolysis and Solid-liquid Separation Combined Process, Master's Thesis, Department of Environmental Engineering of University of Seoul, 30-35.
- Lim, C.K. (2015). Improved Volatile Solids Reduction by Heat Treatment in Anaerobic Biogas Production from Organic Wastes, Master's Thesis, Department of construction systems engineering, Youngnam National University, 1-5.
- Ministry of Environment. (2021). Net-zero implementation plan in 2021, 4-5.
- Ministry of Environment. (2016). A study on optimization of operation in the biogas production facility of organic waste (III), 9, 20-21, 69.
- Ministry of Environment. (2020). Sewerage statistics in 2020. Available online: http://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do;jsessionid=hkG711ryUUq0c+4jQOVHwGY.mehome1?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=title&searchValue=%ED%86%B5%EA%B3%84&menuId=10260&orgCd=&condition.toInpYmd=null&condition.fromInpYmd=null&condition.deleteYn=N&condition.deptNm=null&seq=7809
- Ministry of Environment. (2021). Food Waste Treatment Facilities in 2021. Available online: http://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=title&searchValue=%EC%9D%8C%EC%8B%9D%EB%AC%BC%EB%A5%98&menuId=10265&orgCd=&condition.toInpYmd=null&condition.fromInpYmd=null&condition.deleteYn=N&condition.deptNm=null&seq=7916
- Oh, B.Y. (2013). Anaerobic Treatment of Leachate Solubilized from Thermal Hydrolysis of Sludge Cake, Master's Thesis, Department of Environmental Engineering, Chungnam National University, 2.
- Owens, J.M. and Chynoweth, D.P. (1979). Biochemical methane potential of municipal solid waste(MSW) components, Water. Sci. Technol., 27, 1-14
- Seo, D.I. (2012). Anaerobic Treatment of Sewage Sludge Thermally Hydrolyzed Liquid Containing High Nitrogen Concentration, Master's Thesis, Department of civil and environmental system engineering Graduate School of Hanyang University, 2-6.
- Sudokwon Landfill Site Management CORPORATION. (2021). Operation management technology of bio-gasification facilities for food waste leachate, 1.
- Yun, S.K. (2013). Garbage Wastewater Treatment by Thermophilic Anaerobic Digestion Coupled with Alternating Injection Mode Cross-flow Membrane Filtration, Master's Thesis, Department of Construction and Environmental Engineering Graduate School of Hanyang University, 60-66.

pp. 319-327

pp. 329-337

pp. 339-349

pp. 351-362

pp. 363-375

pp. 377-390

pp. 391-402

pp. 403-411

pp. 413-425

pp. 427-437