

혼합 소화공정을 통한 하수 슬러지와 음식물 병합 처리

하정협[†] · 박종문^{*}

평택대학교 환경융합시스템학과, *포스텍 화학공학과
(2017년 8월 24일 접수, 2017년 8월 29일 심사, 2017년 9월 4일 채택)

Simultaneous Treatment of Sewage Sludge and Food Wastewater Using Combined Digestion Process

Jeong Hyub Ha[†] and Jong Moon Park^{*}

Department of Integrated Environmental Systems, Pyeongtaek University, 3825 Seodong-daero, Pyeongtaek-si, Gyeonggi-do 17869, Korea

*Department of Chemical Engineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang 37673, Korea
(Received August 24, 2017; Revised August 29, 2017; Accepted September 4, 2017)

초 록

본 연구에서는 하수 슬러지 및 음식물의 효율적인 병합처리를 위해 고온호기 전처리의 적용가능성을 알아보고자 고온호기-중온혐기 연계공정의 소화효율과 메탄가스 생성량에 미치는 영향을 비교 검증하였다. 또한, 유기물 부하량 증가에 따른 공정 내 변화 양상을 관찰하기 위해 실험실 규모의 고온호기-중온혐기 소화장치를 제작하여 음식물을 증류수로 희석하는 비율을 1/3 (Run I), 2/3 (Run II) 및 원액(Run III)으로 줄여가며 혐기소화 공정 내 변화 양상을 관찰하였다. 실험 결과 별도의 pH 조절 없이 고온호기-중온혐기 연계공정 소화조 내에서 pH가 7~8으로 안정하게 유지됨을 알 수 있었다. Volatile solid (VS)는 순응 기간 후 고온호기-중온혐기 연계공정에서 52.24% (Run I), 66.59% (Run II) 및 72.53% (Run III)의 제거효율을 보이며, 중온혐기 소화조(R3)에 비교하여 높은 VS 제거율을 보였다. 또한, 고온호기-중온혐기(R1-R2) 연계공정에서 약 1.6배 향상된 메탄 생성률이 관찰되었으며, 메탄수율의 경우에도 고온호기-중온혐기(R1-R2) 연계공정에서 현저하게 높은 값을 유지하였다.

Abstract

In this study, in order to find the feasibility of thermophilic biological pre-treatment for the co-digestion of food wastewater and sewage sludge, digestion efficiency of the combined thermophilic aerobic and mesophilic anaerobic process and its effect on methane production were investigated. Also, a lab-scale co-digestion process was operated to observe parameter changes according to the increase of organic loading rates using different dilution ratios of distilled water and food wastewater (1/3 [Run I], 2/3 [Run II] in addition to using the raw food wastewater [Run III]). The results indicated that co-digestion process maintained quite stable and constant pH during entire experiments. With regard to VS removal, the higher removal was observed in the combined process and the removal efficiency was 52.24% (Run I), 66.59% (Run II) and 72.53 (Run III), respectively. In addition, the combined process showed about an 1.6-fold improved methane production rate and significantly higher methane yield than that of using single anaerobic digestion process.

Keywords: sewage sludge, food wastewater, thermophilic anaerobic digestion, mesophilic anaerobic digestion, methane production rate

1. 서 론

우리나라는 런던 협약과 '96 의정서'에 따른 하수슬러지를 포함한 폐기물의 해양배출기준을 대폭 강화하고 있으며 이에 따라 2011년 2

월부터 하수슬러지의 해양배출이 전면 금지되었으며, 음식물류 폐기물의 경우에는 해양투기가 2013년부터 금지되어 유기성폐기물의 효과적인 처리기술 개발이 시급한 상황이다. 이를 해결하기 위한 기술로서 친환경적이며 동시에 청정에너지원인 메탄을 생산할 수 있는 혐기소화공정이 최근 주목받고 있으나[1,2], 2013년 환경부에서 발표한 전국 하수슬러지 처리시설 현황에 따르면 상대적으로 적은 수(총 38개소 가운데 하수슬러지 소화조가 17개소)의 유기성폐자원 에너지 활용시설이 운영되고 있으며[3], 음식물의 경우 2012년 환경부의 자료에 따르면 음식물을 혐기성 소화조에서 처리하여 에너지를 회수하는 시설은 전국에 5개소에 불과한 실정이다[4].

[†] Corresponding Author: Pyeongtaek University, Department of Integrated Environmental Systems, 3825 Seodong-daero, Pyeongtaek-si, Gyeonggi-do 17869, Korea
Tel: +82-31-659-8309 e-mail: jhha@ptu.ac.kr

Table 1. Characteristics of Sewage Sludge Used in this Study (Average ± Standard Deviation)

Parameter	Sewage sludge
pH	6.75 ± 0.14
TS (g/L)	58.67 ± 1.69
VS (g/L)	40.48 ± 2.06
TCOD (g/L)	76.25 ± 3.55
SCOD (g/L)	5.48 ± 0.15
Total organic acids (g COD/L)	1.24 ± 0.08

Table 2. Characteristics of Food Wastewater Used in this Study (Average ± Standard Deviation)

Parameter	Run I (1/3 dilution)	Run II (2/3 dilution)	Run III (Raw food wastewater)
pH	4.36 ± 0.02	4.32 ± 0.15	4.30 ± 0.03
TS (g/L)	45.24 ± 0.42	89.58 ± 1.13	133.65 ± 2.69
VS (g/L)	40.95 ± 0.95	81.08 ± 2.25	121.62 ± 1.05
TCOD (g/L)	50.20 ± 1.28	99.54 ± 1.64	148.72 ± 3.22
SCOD (g/L)	31.20 ± 0.39	64.58 ± 2.02	94.65 ± 0.69
Total organic acids (g COD/L)	24.24 ± 2.03	48.19 ± 2.15	72.64 ± 3.48

Table 3. Operating Condition of Lab-scale Semi-continuous Digestion Process

Parameter	Thermophilic aerobic digester (R1; TAD)	Mesophilic anaerobic digester (R2; MAD)	Single mesophilic anaerobic digester (R3; Control)
Total Volume (L)	1	13	7
Working volume (L)	0.3	11.4	6
HRT (d)	1	19	20
Temperature (°C)	55	35	35
Air rate (L/min)	5	-	-

하수슬러지와 음폐수는 모두 다량의 유기물을 포함하여 혐기성소화에 의해 처리가 가능하지만, 단순공정으로 이를 처리할 경우 하수슬러지는 단단한 세포벽의 분해가 어려운 문제점이 있고[5,6], 음폐수의 경우에는 유분과 염분을 비롯해 미생물의 성장을 방해하는 각종 난분해성 물질을 다량 포함하고 있으므로 기존의 일반적인 혐기성소화 공법의 적용으로는 효율적인 처리가 어렵다[7]. 따라서, 이러한 단점들을 극복하고 하수슬러지와 음폐수를 동시에 효율적으로 처리하기 위한 복합 유기성폐기물 소화공정이 개발되었다[8]. 고온호기-중온 혐기 복합처리공정은 기존의 혐기소화공정보다 증진된 메탄 생성량을 보이면서, 전단의 고온 호기성 소화공정에서 하수슬러지의 단단한 세포벽을 빠르게 가용화하여 혐기성 미생물이 쉽게 고농도 폐수를 처리할 수 있게 소화효율을 높인 공정이다.

본 연구에서는 하수 슬러지와 음폐수의 효율적인 복합처리를 위해 실험실 규모의 연속적인 고온호기(55 °C) 및 중온혐기(35 °C) 복합소화공정을 사용하였고 그 적용 가능성을 평가하였다. 복합소화공정에서 음폐수는 바로 혐기성소화공정에 공급하였으며, 하수슬러지는 고온호기공정에서 생물학적으로 전처리하여 혐기성소화공정에 공급되도록 하였다. 공정의 효율성을 평가하기 위하여 고온호기-중온혐기 복합소화공정의 고품 유기물 제거 효율, 메탄생성, 메탄수율 및 공정의 안정성을 관찰하였다.

2. 실험

2.1. 실험재료

본 연구에서 사용된 고온호기성 식종균은 D시 하수처리장에 위치한 고온호기 pilot plant ((주) 팬아시아 워터)에서 채취한 후 접종하였으며, 혐기반응조 식종균은 D시 하수처리장에 위치한 중온혐기 소화조에서 채취한 후 접종하였다. 실험에 사용된 음폐수는 P시 음식물류 자원화 시설에서 선별, 파쇄 및 자원화 과정에서 발생하는 폐수가 집하된 장소에서 채취한 원료를 사용하였으며, 하수슬러지의 경우 D시 하수처리장에서 발생하는 잉여농축 슬러지(2차슬러지)를 이용하여 실험이 진행되었고, 채취한 음폐수 및 하수 슬러지는 1.0 mm 체를 이용한 이물질 및 고형물의 균질화 작업 후 3 L 플라스틱 용기에 담아 -25 °C에서 사용 전까지 보관하였다. 본 연구에 사용된 하수 슬러지 및 음폐수의 자세한 물리·화학적 성상은 Table 1와 2에 나타내었다.

2.2. 실험장치 및 운전

실험실 규모의 복합 처리 공정 모식도는 Figure 1과 같다. 효율적인 하수슬러지/음폐수 통합소화를 위해 lab-scale semi-continuous 소화조를 제작 후 90일 이상 운전하였다. 실험실규모의 반응조 크기의 한계 때문에 일 4회로 기질을 나누어 공급하는 semi-continuous 시스템을 선택하였으며, 메탄 생성율의 향상을 위해 고온호기 전처리시 가용화

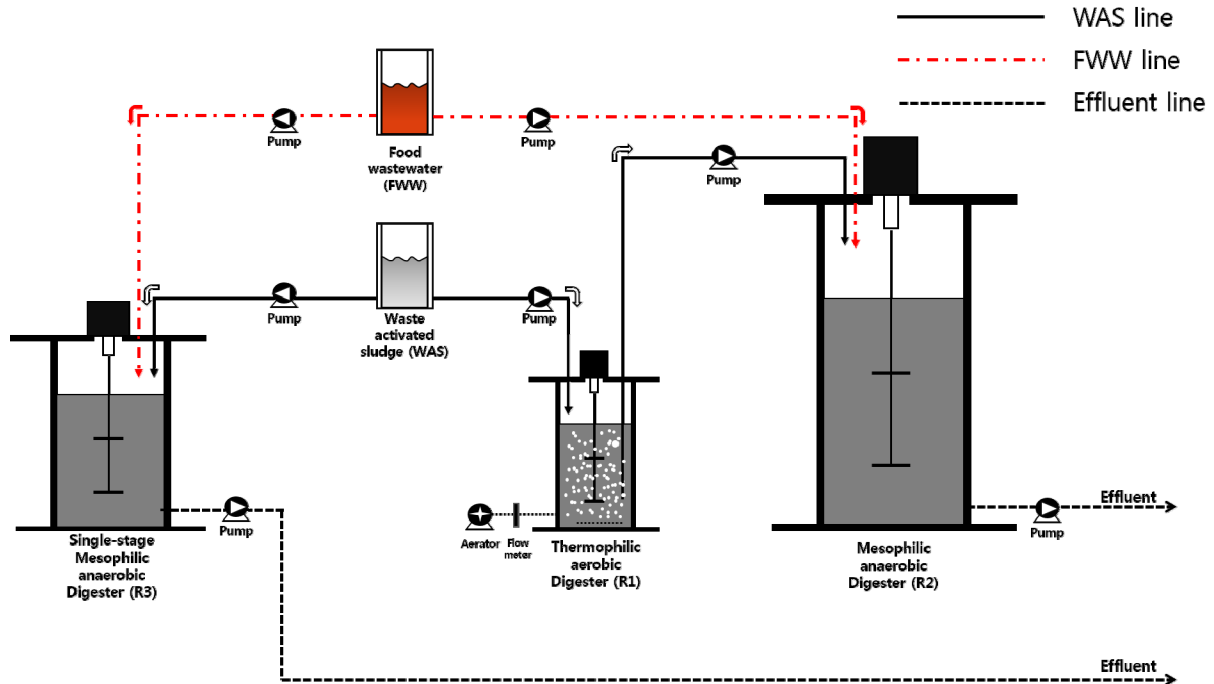


Figure 1. Schematic diagram of lab-scale semi-continuous digestion reactors.

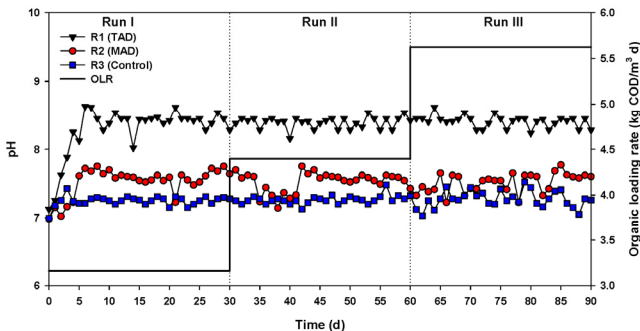


Figure 2. Variation of pH during the lab-scale semi-continuous digestion.

물의 손실이 예상되는 음폐수의 경우에는 중온혐기소화조(R2)로 바로 투입하고, 전처리가 필요한 하수 슬러지의 경우 고온호기 전처리(R1) 후 혐기성 소화조로 투입하였다. 대조군으로 사용하기 위해 같은 기질을 대상으로 단상 중온 혐기성 소화조(R3)를 추가로 운전하였다. Lab-scale semi-continuous 시스템 운전 중 기질의 성상이 변하는 것을 방지하기 위해 하수슬러지 및 음폐수를 3 L 분량씩 나누어 동결보관(-4 °C)하고, 사용 시 해동하여 냉장보관(4 °C) 한 상태로 공급되도록 하였다. 본 연구에 사용된 lab-scale semi-continuous 시스템의 운전 조건은 Table 3에 나타내었으며 투입되는 음폐수를 증류수로 희석하는 비율을 Table 2에서와 같이 1/3 (Run I), 2/3 (Run II) 및 원액(Run III)으로 줄여가며 유기물 부하량 증가에 따른 공정 내 변화 양상을 관찰하였다.

2.3. 분석방법

Total solids (TS), volatile solids (VS), soluble chemical oxygen demand (SCOD) 및 total chemical oxygen demand (TCOD)는 Standard

Method[9]에 준하여 분석하였으며, 유기산(organic acid; OA) 분석에는 HPLC (Agilent Technology 1100 series)를 이용하였다. 바이오가스 생성량 및 메탄함유량은 수위차 및 GC (Model 6890N, Agilent)을 통해 분석하였다. 각 반응조의 pH 변화 양상은 pH (405-DPAS-SC-K85, Mettler Toledo)미터를 이용하여 연속적으로 모니터링 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 반응조의 pH 안정성

고온호기 및 중온혐기성 소화시 적절한 pH유지는 관련 미생물의 활성도 측면에서 중요하며, 이는 공정 효율 및 안정성과 직접적인 관련이 있다. 일반적으로 고온호기성 미생물의 경우 pH 6.5-9에서 최적의 효율을 나타내는 것으로 알려져 있으며, 안정적인 중온혐기 소화조를 위한 최적의 pH는 6.5-8이다[10]. 본 연구에서는 각 소화조 내 pH 변화 양상을 관찰함으로써 슬러지 및 음폐수 병합소화에 대한 고온호기-중온혐기성 통합소화의 안정성을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

Figure 2는 슬러지 및 음폐수 병합소화 기간 동안의 고온호기(R1) 및 중온혐기 통합소화조(R2) 내 pH 변화 양상을 나타낸다. 고온호기 소화조(R1) 내 pH는 다양한 부하율의 증가에도 불구하고 batch-mode 고온호기 소화조 운전 때와 동일하게 8.0 이상의 pH를 유지하였다. 반면, 중온혐기소화조(R2)의 경우 부하율이 증가함에 따라 순유기기간(30-42 d) 동안 pH가 7.0까지 감소하였으나, 그 후 안정적인 값을 유지하였다. 또한, 두 중온혐기 소화조의 90일 운전기간 동안 pH는 7.0-7.8로 유지되어 모든 소화조가 안정적으로 운전되었음을 알 수 있었다.

3.2. 고형물 및 SCOD제거 양상

실험기간 동안 R1 (TAD, 고온호기), R2 (MAD, 중온혐기) 및 R3 (control) 내 고형물 농도(VS) 변화 양상은 Figure 3과 같다. 본 실험에

Table 4. Organic Acid Concentrations of Lab-scale Semi-continuous Digestion Process (Average ± Standard Deviation)

Parameter (g COD/L)	Run I (1/3 dilution)			Run II (2/3 dilution)			Run III (Raw food wastewater)		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
Total VFAs	1.48 ± 0.01	-	-	1.50 ± 0.02	-	-	1.49 ± 0.02	0.82 ± 0.02	1.46 ± 0.01
Acetic acid	1.48 ± 0.01	-	-	1.50 ± 0.02	-	-	1.49 ± 0.02	0.69 ± 0.01	0.84 ± 0.04
Propionic acid	-	-	-	-	-	-	-	0.13 ± 0.01	0.36 ± 0.01
Butyric acid	-	-	-	-	-	-	-	-	0.26 ± 0.05

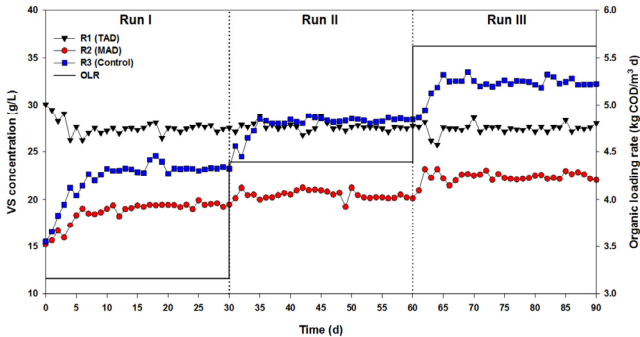


Figure 3. Change in VS concentration during the lab-scale semi-continuous digestion.

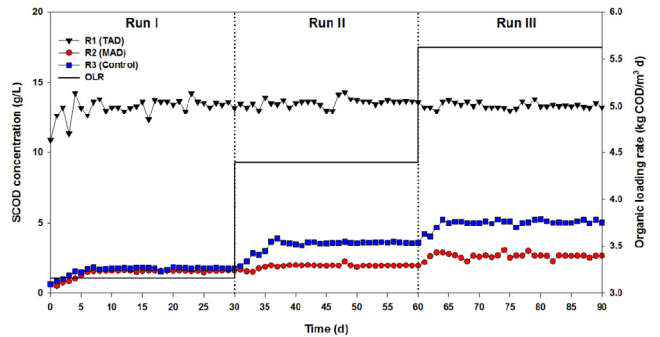


Figure 5. Changes in SCOD concentration during the lab-scale semi-continuous digestion.

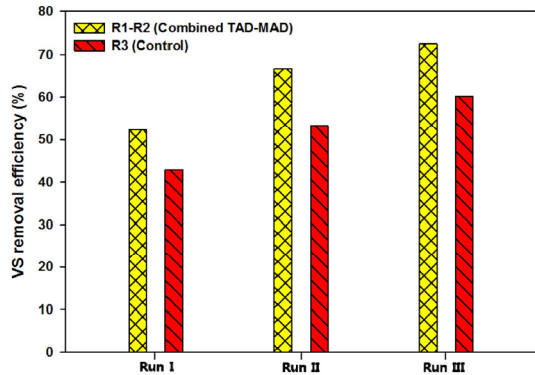


Figure 4. Removal of VS during the lab-scale semi-continuous digestion.

서는 고온호기-중온혐기성 통합소화 내에서 고온호기 소화조로 유입되는 슬러지의 농도는 일정하며 소화조 내 체류시간이 일정하기 때문에 고온호기 소화조(R1)에서는 일정한 VS농도가 유지되었다. 중온혐기(R2)로 유입되는 OLR조절은 FWW와 증류수의 혼합비로 조절했기 때문에 OLR이 증가함에 따라서 유입 VS의 농도가 계단식으로 상승하였다. 고온호기 소화조는 비록 1일이라는 짧은 체류시간에서 운전되었지만 유입 슬러지 대비 약 33%라는 많은 양의 VS가 고온호기 소화조에서 제거되었다. 두 혐기성 소화조 내 VS농도는 유입 음폐수 내 VS농도가 증가함에 따라 같이 증가하는 경향을 보였고 그 변화 폭이 단상 중온혐기 소화조(R3)에서 더욱 컸다. Figure 4에서 볼 수 있듯이 하수 슬러지/음폐수 병합처리 내 VS제거율은 고온호기-중온혐기 (R1-R2) 연계공정이 단상 중온혐기 소화조(R3)에 비해 높은 값을 유지하였고, Figure 4에서 보여진 바와 같이 음폐수의 희석율을 낮춤에 따라 Run I, II 및 III에서의 VS제거율은 연계공정(R1-R2)에서 각각 52.24, 66.59%

및 72.53%로 변화했으며, 단상 중온혐기 소화조(R3)에서는 42.81, 53.18% 및 60.25%로 변화하였다.

고온호기 소화조(R1) 내의 활성도가 높은 미생물에 의한 유기고형물의 가용화에 의해 Figure 5에서 보여진 바와 같이 고온호기 소화조(R1) 내 SCOD 농도는 유입 슬러지(약 5.5 g/L)의 SCOD보다 2.5배 증가한 약 13 g/L을 유지하였다. 하지만 두 중온혐기 소화조에서는 상대적으로 낮은 SCOD 농도가 유지되었으며, 단상 중온혐기 소화조(R3)보다 고온호기 소화조와 연계된 R2에서 더 낮은 SCOD 농도가 유지되었다. 이러한 결과는 고온호기 소화조를 통한 풍부한 가용유기물의 공급으로 인한 R2 내 미생물들의 활성도가 높아진 결과라고 할 수 있다.

3.3. 유기산 변화 양상

유기성 고형물 소화 시 유기산 축적은 고온호기 및 혐기 소화조 내 pH 감소의 주 원인이며, 메탄생성의 부정적인 영향을 미칠 수 있다. Table 4는 반응조 내 유기산 농도 변화를 나타내고 있다. Batch-mode 시스템에서의 고온호기 소화조(R1)에서 약 1.50 g COD/L의 acetic acid가 측정되었다. 최근 유기성 폐기물을 대상으로 한 회분식 고온호기성 소화에 관한 연구에 의하면 유기산 생성이 가능한 것으로 보고되었고, 여기서 생성된 유기산은 반응조 내 bacillus 종에 의해 분해되는 것으로 알려졌다[11]. 고온호기 소화조와 달리 상대적으로 긴 HRT를 가지고 있는 두 중온 혐기성 소화조에서는 Run II에서까지 유기산이 검출되지 않았으나, 음폐수의 원액이 투입된 Run III에서는 acetic 및 propionic acid가 R2에서 검출되었으며, 단상 중온혐기 소화조(R3)에서는 추가적으로 butyric acid까지 검출되었다. 이러한 현상은 위 Table 2에서 나타낸 바와 같이 높은 유기산을 함유하고 있는 음폐수를 희석 없이 투입했기 때문으로 예상된다.

기존 연구에 따르면 음폐수 처리를 위한 혐기 소화조의 경우 고질적인 문제점으로 유출수 내 고농도의 organic acids가 축적되는 것을 꼽고 있다[7]. 본 연구에서도 두 혐기성 소화조 내에서 유기산이 검출

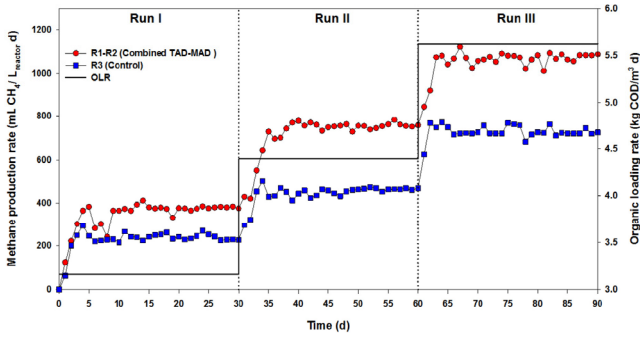


Figure 6. Production of methane during the lab-scale semi-continuous digestion.

되긴 하였지만 기존 문헌에 따르면 6 g/L의 유기산 농도에서도 안정적인 혐기 소화조 운전이 보고된 바 있다[12]. 위 Figure 2에서와 같이 안정적으로 pH가 유지되는 점을 고려할 때 Run III에서 두 중온 혐기 소화조 내 유기산 검출은 메탄생성에 저해인자로 작용하지 않을 것으로 예상된다.

3.4. 메탄생성

실험 기간 중 고온호기-중온혐기(R1-R2) 연계공정 운전 기간 중 메탄생성율은 Figure 6에 나타내었다. 고온호기 소화조에 연계된 R2에서 단상 중온혐기 소화조(R3)보다 높은 메탄생성율을 보이고 있다. 유입 슬러지에 고온호기 소화조를 활용하여 생물학적 전처리를 가하면 반응조 내의 SCOD의 양이 늘어나게 된다. 이러한 SCOD 성분은 혐기 소화조 내의 미생물이 매우 소화하기 쉬운 물질로서, SCOD 성분이 증가함에 따라 가수분해 반응이 활발해지고, 연쇄적으로 산 생성과 메탄 생성반응까지 활성이 올라가게 된다. 이에 따라 메탄가스의 생성량이 크게 증가하게 되는 것이다. 이러한 연구결과는 다른 연구그룹의 실험결과에서도 확인되었다[13,14]. 또한, 음폐수의 희석율이 감소함에 따라 고온호기-중온혐기(R1-R2) 연계공정은 Run I, II 및 III에서 각각 약 380 mL CH₄/L_{reactor} d, 755 mL CH₄/L_{reactor} d 및 1085 mL CH₄/L_{reactor} d의 메탄생성율을 보였다. 이는 단상 중온혐기 소화조(R3)에서 얻은 227 mL CH₄/L_{reactor} d, 465 mL CH₄/L_{reactor} d 및 728 mL CH₄/L_{reactor} d보다 약 1.6배 향상된 결과이다.

Figure 7에서 나타난 소화조 내 총 제거된 COD를 기준으로 계산된 메탄수율의 경우에도 고온호기 소화조와 연계된 R2에서는 Run I, II 및 III에서 각각 약 168 mL CH₄/g COD_{removed}, 225 mL CH₄/g COD_{removed} 및 242 mL CH₄/g COD_{removed}의 메탄수율을 보여 단상 중온혐기 소화조(R3)에서 얻은 129 mL CH₄/g COD_{removed}, 170 mL CH₄/g COD_{removed} 및 195 mL CH₄/g COD_{removed}에 비해 높은 값을 유지하고 있다. 이러한 단상 중온혐기 소화조(R3) 대비 고온호기-중온혐기(R1-R2) 연계공정의 메탄생성율 및 수율 증가는 고온호기 소화 전처리를 통해 가용화물로 전환된 하수 슬러지의 공급이 주 요인이라 할 수 있다.

4. 결 론

하수 슬러지 및 음폐수의 효율적인 병합처리를 위해 고온호기 전처리의 전처리의 적용가능성을 알아보기로 고온호기-중온혐기 연계공정을 설치 및 운영한 결과, 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서 별도의 pH 조절 없이, 순응 기간 후 고온호기-중온 혐기 연계공정에서 pH는 7~9으로 안정적인 값을 유지하였다.

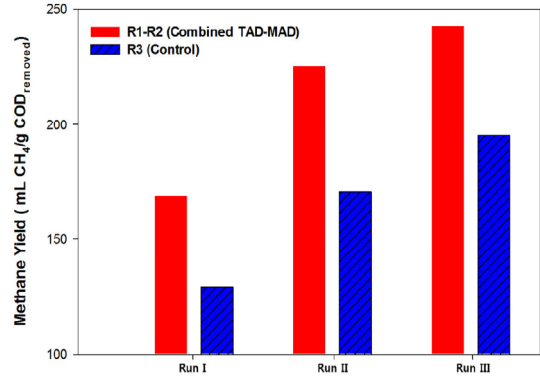


Figure 7. Methane yield during the lab-scale semi-continuous digestion.

(2) 순응 기간 후 고온호기-중온혐기 연계공정 내 고형물 농도는 일정한 값을 유지하는 것을 관찰하였다. 안정된 고온호기-중온혐기(R1-R2) 연계공정에서 중온혐기 소화조(R3)에 비해 높은 VS 제거율을 보였다.

(3) 고온호기-중온혐기 연계공정은 순응 기간 후 안정적인 메탄 생성을 보였으며, 고온호기-중온혐기(R1-R2) 연계공정에서 중온혐기 소화조(R3)에 비해 약 1.6배 향상된 메탄 생성물이 관찰되었다.

(4) 본 연구에서는 각 반응조의 체류시간이 아닌 유기물 부하를 변수로 설정하였기 때문에 다양한 조건의 체류시간 및 유기성 폐자원 종류에 따른 공정 효율의 변화에 대한 추가 실험이 필요할 것으로 사료된다.

References

1. M. Kim, Y. H. Ahn, and R. E. Speece, Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion; mesophilic vs. thermophilic, *Water Res.*, **36**, 4369-4385 (2002).
2. H. M. Jang, J. H. Ha, M. S. Kim, J. O. Kim, Y. M. Kim, and J. M. Park, Effect of increased load of high-strength food wastewater in thermophilic and mesophilic anaerobic co-digestion of waste activated sludge on bacterial community structure, *Water Res.*, **99**, 140-148 (2016).
3. Korea Ministry of Environment, Bioenergy facilities and status using organic wastes, Seoul, South Korea (2013).
4. Korea Ministry of Environment, Treatment plan and bioenergy production for organic wastes and food wastewater, Seoul, South Korea (2012).
5. H. M. Jang, S. S. Choi, and J. H. Ha, Comparison of single-stage thermophilic and mesophilic anaerobic sewage sludge digestion, *Appl. Chem. Eng.*, **27**, 532-536 (2016).
6. H. Y. Cho, S. K. Park, J. H. Ha, and J. M. Park, An innovative sewage sludge reduction by using combined mesophilic anaerobic and thermophilic aerobic process with thermal-alkaline pretreatment, *J. Environ. Manag.*, **129**, 274-282 (2013).
7. H. M. Jang, S. S. Choi, J. H. Ha, and J. M. Park, Influence of food wastewater loading rate on the reactor performance and stability in the thermophilic aerobic process, *Appl. Chem. Eng.*, **24**, 279-284 (2013).
8. H. M. Jang, S. K. Park, J. H. Ha, and J. M. Park, Microbial community structure in thermophilic aerobic digestion used as a sludge

- pretreatment for mesophilic anaerobic digestion and enhancement of methane production, *Bioresour. Technol.*, **145**, 80-89 (2013).
9. APHA, *Standard Methods for the Examination of water and Wastewater*, 20th ed., American Public Health Association (APHA), Washington DC, USA (1998).
 10. J. T. Novac, S. Banjade, and S. N. Murthy, Combined anaerobic and aerobic digestion for increased solids reduction and nitrogen removal, *Water Res.*, **45**, 618-624 (2011).
 11. H. M. Jang, J. W. Lee, J. H. Ha, and J. M. Park, Effects of organic loading rates on the reactor performance and microbial community changes in the thermophilic aerobic process treating high-strength food wastewater, *Bioresour. Technol.*, **148**, 261-269 (2013).
 12. G. Parkin and W. F. Owen, Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludge, *J. Environ. Eng.*, **112**, 867-920 (1986).
 13. S. Hasegawa, N. Shiota, K. Katsura, and K. Akashi, Solubilization of organic sludge by thermophilic aerobic bacteria as a pretreatment for anaerobic digestion. *Water Sci. Technol.*, **41**, 163-169 (2000).
 14. P. Juteau, D. Tremblay, C. B. Ould-Moulaye, J. G. Bisaillon, and R. Beaudet, Swine waste treatment by self-heating aerobic thermophilic bioreactors, *Water Res.*, **38**, 539-546 (2004).