

해조류 첨가를 통한 음식물쓰레기의 혐기성소화 효율 증대

신상룡, 이모권, 권오태*, 김지훈*, 한규현*, 김동훈†

인하대학교 사회인프라공학과, 인천과학고등학교*

Enhanced Anaerobic Digestion Efficiency of Food Waste by Seaweed Addition

Sang-Ryong Shin, Mo-Kwon Lee, Oh-Tae Kwon*, Ji-Hoon Kim*,
Gyu-Hyeon Han*, Dong-Hoon Kim†

Department of Civil Engineering, Inha University, Republic of Korea
Incheon Science High School*

(Received: Aug. 14, 2017 / Revised: Aug. 31, 2017 / Accepted: Sep. 7, 2017)

ABSTRACT: In this study, we investigated the effect of seaweed (SW) addition on the anaerobic digestion of food waste (FW). Anaerobic batch experiments were carried out at various substrate concentrations (2.5 to 10.0 g VS/L) and mixing ratios (FW:SW=100:0, 75:25, 50:50, 25:75 and 0:100 on VS basis) of FW and SW. The methane yield of FW alone was 394, 377, 276, 49 mL CH₄/g VS_{added} at each substrate concentration (2.5 to 10.0 g VS/L). In cases of co-digestion, methane yield decreased (up to 15 %) with increasing mixing ratio of SW at low substrate concentration (2.5 to 5.0 g VS/L), while it increased (up to 240 %) at high substrate concentration (7.5 to 10.0 g VS/L). The synergistic effect was calculated based on the amount of methane generated from the single-feedstock digestion of FW and SW. The synergistic effect was not found at 2.5 and 5.0 g VS/L. However, the synergistic effect increased (up to 25% = synergistic increment/total methane production at 10.0 g VS/L, FW:SW=50:50) with increasing the ratio of seaweed at 7.5 and 10.0 g VS/L. At 10.0 g VS/L of FW alone, the accumulated amount of organic acids was 7,426 mg COD/L, which was decreased to 2,346 mg COD/L by seaweed (FW:SW=50:50) addition. The reason for the synergistic effect was to control the production rate of the organic acids by adding SW that has a relatively lower biodegradability compared to FW.

Keywords: Food waste, Seaweed, Organic acids, Co-digestion, Synergistic effect

초록: 본 연구는 해조류 첨가를 통한 음식물쓰레기의 소화효율 증대효과를 알아보기 위해 다양한 농도(2.5~10.0 g VS/L)와 혼합비율(FW:SW=100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100, VS 농도 기준)에서 회분식 실험을 수행하였다. 음식물쓰레기의 단일소화의 경우 농도가 증가함(2.5~10.0 g VS/L)에 따라 메탄전환율이 394, 377, 276, 49 mL CH₄/g VS_{added}로 감소하는 경향을 보였다. 음식물쓰레기에 해조류의 첨가 비율이 높아질수록 낮은 기질농도(2.5~5.0 g VS/L)에서는 메탄전환율이 감소하였으나(최대 15% 감소) 높은 기질농도(7.5~10.0 g VS/L)에서는 메탄전환율이 증가하였다(최대 240% 상승). 또한 음식물쓰레기와 해조류의 단일소화 시 발생된 메탄가스의

† Corresponding author(e-mail : dhkim77@inha.ac.kr)

양을 기반으로 상승효과에 의한 메탄발생량을 계산한 결과, 2.5, 5.0 g VS/L에서는 상승효과가 없었고, 7.5, 10.0 g VS/L의 경우에는 해조류의 비율이 높아질수록 상승효과가 최대 25 % (= 상승효과에 의한 메탄발생량/혼합소화 시 실제 발생한 메탄발생량, 기질농도 10.0 g VS/L, 혼합비율 50:50)까지 상승하였다. 음식물쓰레기의 농도가 10.0 g VS/L로 높은 경우 단일소화 시(FW=SW=100:0) 유기산 축적량이 7,426 mg COD/L까지 증가하였고, 해조류를 첨가하면(FW:SW=50:50) 유기산 축적량이 2,346 mg COD/L로 감소하였다. 이는 비교적 생분해도가 낮은 해조류를 첨가함으로써 유기산 생산속도의 조절을 통해 유기산이 축적되는 것을 억제하여 상승효과가 발생한 것으로 판단된다.

주제어: 음식물쓰레기, 해조류, 유기산, 혼합소화, 상승효과

1. 서론

우리나라의 음식물쓰레기 발생량은 2014년 기준으로 하루 약 13,222톤이 발생하며 이는 전체 생활폐기물 발생량의 약 26%에 해당한다.¹⁾ 현재 음식물쓰레기는 대부분 재활용(퇴비화 및 사료화) 처리되고 있지만 염분함량이 높아 퇴비나 사료의 품질저하로 수요처가 적고 재활용 처리 시 많은 양의 음식물쓰레기 탈리액(음폐수)이 발생하게 되어 이를 처리하기 위해 많은 비용이 소요된다.²⁾ 특히, 런던협약에 의해 2013년부터 음폐수의 해양투기가 전면 금지되면서 음식물쓰레기의 육상처리 부담이 더욱 늘어난 상황이다. 따라서 음식물쓰레기의 기존의 재활용 처리방법을 대체할 수 있는 육상처리기술개발이 시급한 상황이며, 혐기성소화는 유기성폐기물의 감량과 동시에 바이오에너지를 회수할 수 있는 장점을 지니고 있기 때문에 큰 각광을 받고 있다.³⁾

혐기성소화는 가수분해, 산 생성, 메탄 생성의 3단계로 이루어져 있으며 기질의 특성에 따라 가수분해와, 메탄생성단계가 율속단계로 알려져 있다. 일반적으로 생분해도가 낮은 슬러지와 가축분뇨의 경우 가수분해단계의 속도가 다른 단계에 비해 느리기 때문에 전체반응속도를 좌우하는 율속단계가 되며⁴⁾, 생분해도가 높은 음식물쓰레기의 경우 고세균에 의한 메탄생성단계가 율속단계가 된다.⁵⁾ 이에 따라 음식물쓰레기는 농도가 높은 경우 산생성 단계와 메탄생성단계의 불균형으로 인해 혐기성소화 효율이 낮아지게 되고 이를 극복하기 위해 다른 기질과의 혼합소화가 연구되어져 왔다. 혼합소화는 서로 다른 특징을 가지는 유기성폐기물을 혼합하여 적정 C/N 비,

영양물질의 보충, 유해물질의 희석 등의 효과를 통해 단독기질의 단점을 보완하여 소화효율을 증가시키는 방법으로 기존에는 음식물쓰레기를 하수슬러지, 축산분뇨와 같은 다른 유기성폐기물을 첨가하여 혼합소화 하는 연구가 많이 보고되었다.^{6), 7)}

한편, 해조류는 육상식물에 비해 생장성이 우수하고 가용 재배면적이 넓으며, 리그닌성분이 거의 없어 바이오에너지 생산원료로 큰 각광을 받고 있으며, 바이오디젤, 바이오에탄올, 바이오가스 등을 생산하는 연구가 활발히 이루어지고 있다.^{8), 9)} 해조류(갈조류)의 구성성분은 일반적으로 30~40 %의 탄수화물, 35~40 %의 무기질, 15 %의 단백질, 5 %의 지질로 구성되어 있으며, 슬러지류, 가축분뇨, 미세조류, 농업부산물에 비해 탄수화물의 함량이 높아 생분해도가 높은 편이다. 하지만 해조류는 음식물쓰레기보다 생분해도가 낮다고 알려져 있는데, 이는 음식물쓰레기의 탄수화물에는 전분의 함량이 높은 반면, 해조류의 다당류에는 전분에 비해 분해가 어려운 셀룰로스의 함량이 높기 때문이다.^{10), 11), 12)} 이러한 특징으로 인해 해조류는 다른 유기성폐기물과 혼합소화 시 소화효율을 증가시킬 수 있을 것이라고 판단된다. 그러나 위에서 언급한 바와 같이 해조류를 이용해 바이오에너지를 생산하는 연구가 활발히 진행되고 있는 반면, 해조류를 유기성폐기물과의 혼합소화에 대한 연구는 많이 진행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 음식물쓰레기와 해조류의 다양한 기질농도와 혼합비율 조건의 혼합소화를 통해 고농도의 음식물쓰레기 혐기성소화 시 낮은 소화효율의 증대효과에 대한 연구를 진행하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 식중슬러지 및 기질

본 연구에서 사용된 식중슬러지는 I 지역 하수처리장 혐기성소화조에서 유출되는 소화슬러지와 D 지역 맥주공장의 폐수처리공정에 이용되는 그레놀슬러지를 동일한 부피비로 혼합하였고, 그레놀슬러지는 혼합 시 균일성을 높이기 위해 믹서로 분쇄 후, 2 mm체로 걸러 사용하였다. 혼합소화에 이용된 기질로는 I 지역의 대학 내에 위치한 학생식당의 음식물쓰레기를 믹서로 분쇄 후 2 mm체로 거르고, 해조류는 거대 해조류의 하나인 다시마(*Laminaria japonica*)를 사용하였다. 다시마는 흐르는 물에 염분을 씻어낸 후 105°C에서 2시간동안 건조시켜 믹서로 분쇄하여 가루형태로 만들어 증류수 1 L에 혼합하여 사용하였다. 식중슬러지와 기질의 성상은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Characteristics of seeding source, food waste, and seaweed

Item	Seed sludge	Food waste	Seaweed
TS (g/L)	31.3	83.6	26.3
VS (g/L)	27.4	77.2	20.7
TCOD (g/L)	37.8	104.6	26.9

2.2. 실험방법

본 연구에서는 유효부피 100 mL(총 부피 280 mL)의 serum bottle에 식중슬러지의 농도를 7.5 g VS/L, 혼합기질의 농도를 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 g VS/L, 각 혼합기질의 농도에서 음식물쓰레기와 해조류의 비율을 VS 기준으로 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100으로 하였다. 초기 pH를 2 N KOH 용액으로 7.8±0.1로 조절 후, 질소가스(99.999%)로 충분히 치환하여 진탕 배양기의 온도를 35°C, 교반속도는 150 rpm로 하여 실험을 진행하였다.

2.3. 분석방법

식중슬러지, 기질에 대한 TS(Total solids), VS(Volatile solids) 및 TCOD(Total chemical oxygen

demand)는 standard methods에 따라 측정하였고,¹³⁾ pH는 pH meter(HM-30R, DDK-TOA)로 측정하였다. 바이오가스 발생량은 가스포집용 실린지를 이용하여 채취한 후 표준압력-온도 조건 STP(Standard temperature and pressure, STP)으로 환산하였고, 메탄가스의 함량은 serum bottle의 기상부분의 가스를 GAS-TIGHT SYRINGE로 0.5 mL 채취하여 열전도도 검출기(Thermal conductivity detector, TCD)가 장착된 가스크로마토그래피(Gas chromatography, GOWMAC serise 580, USA)를 이용하여 측정하였다. 컬럼은 6 ft × 1/8 inch stainless steel column with porapak Q(80/100 mesh)를 이용하였고, GC 측정 조건으로 INJECTOR, COLUMN, DETECTOR의 온도를 각각 50, 80, 90°C로 하였다. 운반기체는 고순도 질소(N₂, 99.999%)가스를 사용하였으며 유속은 30 mL/min으로 유지하였다. 유기산의 분석은 실험 후 반응기 내부의 상등액을 0.2 µm 멤브레인으로 여과 후 Aminex HPX-87H(BioRad, USA)컬럼이 장착된 HPLC(Model VP, Shimadzu Co., Japan)로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 메탄가스 발생량

다양한 혼합기질의 농도에서 음식물쓰레기와 해조류의 비율별 누적 메탄발생량을 Fig. 1에 나타내었고, 메탄전환율은 Table 2에 나타내었다. 음식물쓰레기의 단일소화(FW:SW=100:0)의 경우 각 기질농도에서 메탄전환율이 422, 395, 282, 103 mL CH₄/g VS_{added}로서 이는 이론적 메탄전환율(COD 기준)의 89%, 83%, 60%, 22%에 해당한다. 한편, 음식물쓰레기와 해조류의 혼합소화(FW:SW=75:25, 50:50, 25:75)의 경우 기질 농도 2.5, 5.0, g VS/L에서는 음식물쓰레기의 단일소화(FW:SW=100:0) 시 메탄발생량이 106, 198 mL로 가장 높았고 해조류의 비율이 증가할수록 메탄발생량이 감소하는 경향을 보였다. 예를 들어 5.0 g VS/L(FW:SW=25:75)에서 음식물쓰레기의 단일소화(FW:SW=100:0)와 비교하여 최대 약 15% 감소하는 것으로 나타났다. 반면, 7.5, 10.0 g VS/L에서는 음식물쓰레기의 단일소화(FW:SW=

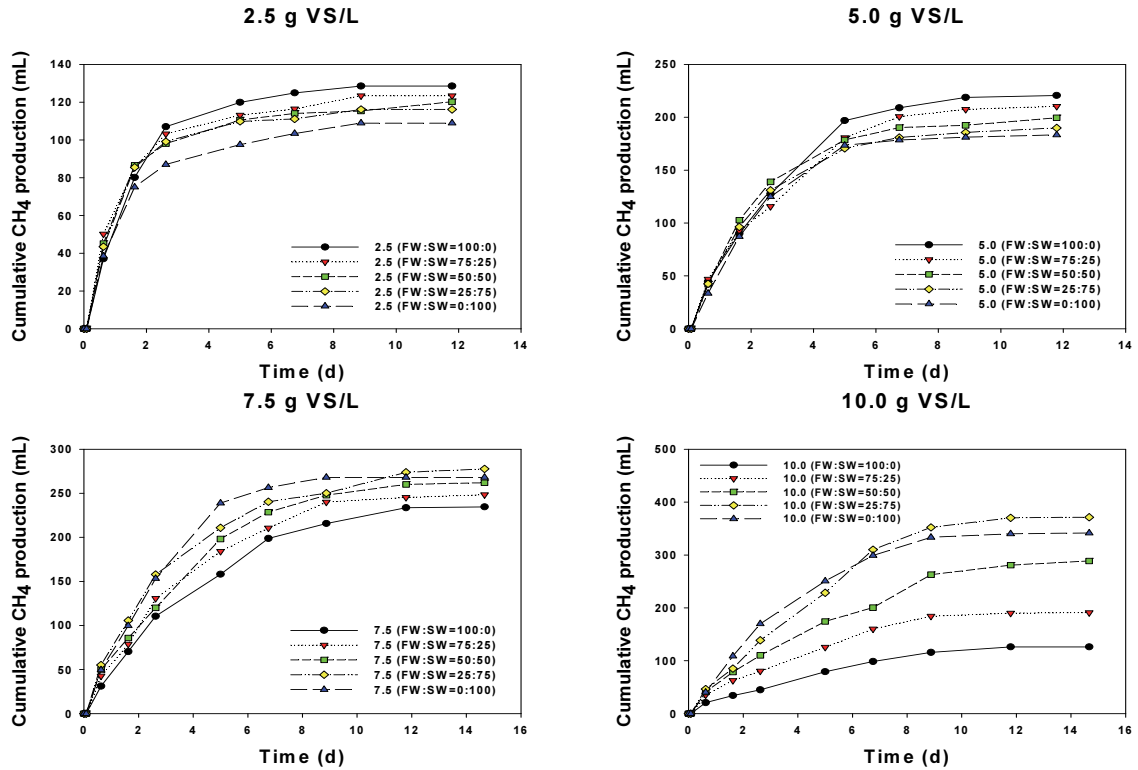


Fig. 1. Cumulative CH₄ production at various VS substrate concentrations and mixing ratios of food waste and seaweed.

Table 2. The results of the anaerobic co-digestion of food waste and seaweed

	2.5 ^a (100:0) ^b	2.5 (75:25)	2.5 (50:50)	2.5 (25:75)	2.5 (0:100)	5.0 (100:0)	5.0 (75:25)	5.0 (50:50)	5.0 (25:75)	5.0 (0:100)
Theoretical CH ₄ production (mL)	119	117	116	115	114	237	235	232	230	227
Actual CH ₄ production (mL)	106	101	97	93	86	198	187	177	167	160
Yield (mL CH ₄ /g VS _{added})	422	402	389	372	344	395	375	353	334	320
Organic acids (mg COD/L)	43	18	45	69	63	83	94	93	101	104
	7.5 (100:0)	7.5 (75:25)	7.5 (50:50)	7.5 (25:75)	7.5 (0:100)	10.0 (100:0)	10.0 (75:25)	10.0 (50:50)	10.0 (25:75)	10.0 (0:100)
Theoretical CH ₄ production (mL)	356	352	348	345	341	474	469	465	460	455
Actual CH ₄ production (mL)	212	226	239	255	245	103	169	266	349	319
Yield (mL CH ₄ /g VS _{added})	282	301	319	340	327	103	169	266	349	319
Organic acids (mg COD/L)	3,425	2,715	254	206	142	7,426	6,535	2,329	1,518	320

^a g VS/L
^b (FW:SW)

100:0) 시 누적 메탄발생량이 급격히 감소하였고 해조류의 첨가 비율이 증가할수록 메탄발생량이 증가하는 경향을 보이고, 혼합비율 FW:SW=25:75에서 음식물쓰레기 단일소화에 비해 약 240 % 증가하였다. 메탄발생량의 증가는 단순히 소화효율이 다른 기질을 혼합하였기 때문에 발생할 수 있고, 상승효과에 의해 발생할 수 있다. 하지만, 고농도 음식물쓰레기의 단일소화보다 해조류 첨가를 통한 혼합소화 시 큰 폭으로 증가하였기 때문에 메탄전환율의 증가는 단순히 소화효율이 다른 기질을 혼합하였기 때문은 아닌 것으로 판단된다. 따라서 증가된 메탄발생량이 두 기질의 상승효과에 의한 것인지 수치상으로 정확한 고찰이 필요하다.¹⁴⁾

3.2. 상승효과

음식물쓰레기와 해조류의 단일소화 시 발생한 실제 메탄발생량(Actual CH₄ production)을 기반으로 혼합비율별 추정 메탄발생량(Estimated CH₄ production)을 계산하였다. 그리고 실제 메탄발생량과 비교하여 추가적으로 생산된 메탄발생량을 상승효과에 의한 메탄발생량(Extra CH₄ production)으로 정의하였다.

상승효과에 의한 메탄발생량은 다음과 같이 계산하였다.¹⁵⁾

$$Extra\ CH_4 = M_a - ((A \times C_1) + (B \times C_2))$$

여기서,

Extra CH₄ = 상승효과에 의해 발생한 메탄가스 발생량 (mL)

M_a = 실제 발생한 메탄가스 발생량 (mL)

A = 음식물쓰레기의 단일소화 시 메탄가스 발생량 (mL)

B = 해조류의 단일소화 시 메탄가스 발생량 (mL)

C₁ = 주입된 음식물쓰레기의 비율

C₂ = 주입된 해조류의 비율

((A×C₁)+(B×C₂)) = 이론적 메탄가스 발생량 (mL)

혼합소화의 경우(FW:SW=75:25, 50:50, 25:75), 2.5, 5.0 g VS/L에서는 상승효과에 의한 메탄발생량을 계

산한 결과, 0, 1, 3 mL, -1, -2, -3 mL로 상승효과가 미미하거나 발생하지 않았다. 한편, 7.5, 10.0 g VS/L에서는 해조류의 비율이 증가할수록 상승효과에 의한 메탄발생량이 6, 11, 18 mL, 11, 55, 84 mL로 증가하였다(Fig. 2). 2.5, 5.0 g VS/L에서는 해조류의 비율이 증가할수록 메탄발생량도 감소하고 상승효과도 없는 것으로 나타났지만, 7.5, 10.0 g VS/L에서는 해조류의 첨가로 인해 메탄발생량도 증가하고 상승효과에 의한 메탄발생량도 크게 증가하는 것으로 나타났고, 10.0 g VS/L, FW:SW=50:50에서 최대 25 % (= 혼합소화 시 상승효과에 의한 메탄발생량/혼합소화 시 실제발생한 메탄발생량)상승하였다.

3.3. 상승효과의 원인

위에서 살펴본 결과, 해조류의 첨가를 통한 상승효과는 음식물쓰레기의 농도가 낮은 경우에는 발생하지 않고 오히려 소화효율이 감소하였고, 높은 농도에서만 상승효과가 발생하여 소화효율이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 실험종료 후 남은 유기산의 농도를 측정된 결과(Table 2), 낮은 농도(2.5, 5.0 g VS/L) 음식물쓰레기의 단일소화 시 유기산의 축적량이 100 mg COD/L 이하로 매우 낮았고, 유기산 축적에 의한 저해효과가 거의 없는 상황에서 해조류를 첨가하였기 때문에 별다른 효과가 없는 것으로 판단된다. 반면, 높은 기질농도(7.5, 10.0 g VS/L) 음식물쓰레기의 단일소화 시 축적된 유기산의 양이 각각 3,425 mg COD/L, 7,426 mg COD/L로 높았다. 이는 생성된 유기산이 메탄생성균에 의해 메탄으로 전환되지 못하고 축적된 것으로 음식물쓰레기의 다당류는 대부분 분해되기 쉬운 전분으로 이루어져 있어 농도가 높을 경우 반응초기에 빠른 산 생성으로 인한 pH 감소로 메탄생성균의 활성도를 저해시켜 유기산을 소비하지 못하면서 혐기성소화 효율을 낮춘 것으로 판단된다.^{11), 16), 17)} 반면, 해조류의 첨가 비율이 증가할수록 유기산 축적량이 2,754, 206, 142 mg COD/L, 6,535, 2,329, 1,518 mg COD/L로 감소되는 것으로 나타났는데, 이는 해조류의 다당류가 대부분 비교적 분해되기 어려운 셀룰로스로 이루어져 있어 음식물쓰레기에 비해 반응초기 산 생성 단계의 속도가 느리기 때문에 산 생성 단계와 메탄생성

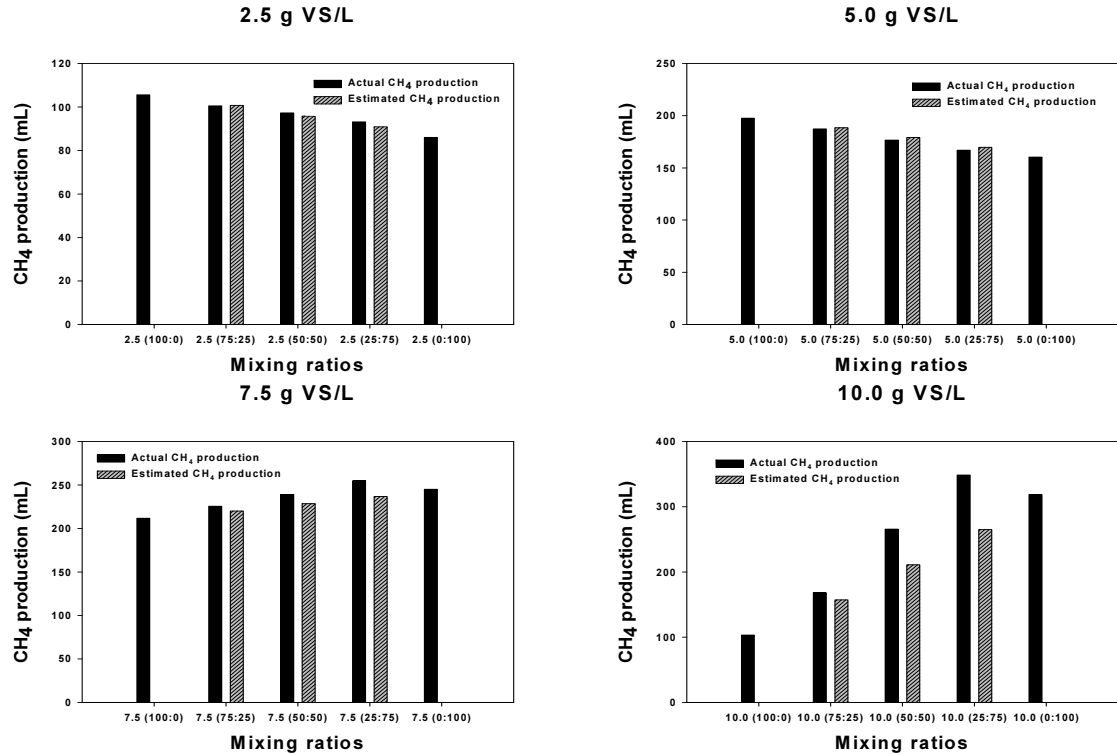


Fig. 2. The amount of actual and estimated CH₄ production at various VS concentrations and mixing ratios(FW:SW).

단계의 균형을 이루었기 때문에 반응 초기 유기산의 축적을 감소시켜 전체 소화효율을 증가시켰다고 판단된다.^{12), 7)}

4. 결론

다양한 기질의 농도에서 음식물쓰레기와 해조류의 비율을 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100으로 하여 혼합소화 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 음식물쓰레기의 단일소화 시 기질 농도가 2.5~10.0 g VS/L로 증가할수록 메탄전환율이 422, 395, 282, 103 mL CH₄/g VS_{added}로 감소하였다.

2. 해조류를 첨가하여 혼합소화 시 해조류의 비율이 증가할수록 낮은 기질 농도(2.5~5.0 g VS/L)에서는 메탄전환율이 최대 15 % 감소한 반면, 높은 기질 농도(7.5~10.0 g VS/L)에서는 최대 240 % 증가하였다.

3. 상승효과에 의한 메탄생산량을 계산해본 결과, 2.5, 5.0 g VS/L에서는 상승효과가 미미하거나 발생하지 않았다. 반면, 7.5, 10.0 g VS/L에서는 해조류에 비율이 높아질수록 상승효과에 의한 메탄생산량이 증가하는 경향을 나타내었다. 10.0 g VS/L (FW:SW=50:50)에서 가장 큰 상승효과를 나타내었고, 이는 혼합소화 시 실제 발생한 메탄발생량의 25 %에 해당한다.

4. 이는 음식물쓰레기의 빠른 산 생성 속도를 해조류의 첨가를 통해 조절하여 메탄생성단계와 균형을 이루었기 때문에 초기 유기산의 축적이 감소하면서 상승효과가 발생한 것으로 판단된다.

References

- [환경부, 전국 폐기물 발생 및 처리현황] Ministry of Environment, "Status of waste production and disposal in Korea", (2015)
- [박중웅, 최동혁, "음폐수를 탄소원으로 이용시

- 생분해 및 탈질특성에 미치는 영향”, 한국도시환경학회지] Park, J.W., Choi, D.H., “Effect of Biodegradation and Denitrification Characteristics using Carbon Source with Food Wastes Leachate”, Journal of Korean Society of Urban Environment, 11(1), pp. 41~48. (2011).
3. Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., Tan, T., “Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 38, pp. 383~392. (2014).
 4. [김동진, “혐기성소화에서의 바이오가스 생산 증진을 위한 슬러지 전처리 기술”, 청정기술] Kim, D.J., “Pre-treatment technology of wastewater sludge for enhanced biogas production in anaerobic digestion”, CLEAN TECHNOLOGY, 19(4), pp. 355~369. (2013).
 5. [최재민, 김정광, 이채영, “수거 형태에 따른 음식물류 폐기물의 혐기성 분해 특성”, 유기물자원화] Choi, J.M., Kim, J.K., Lee, C.Y., “Biodegradation characteristics of food waste on various collection systems”, Journal of the Korea Organic Resource Recycling Association, 23(1), pp. 23~28. (2015).
 6. Edner, J.H., Labatut, R.A., Lodge, J.S., Williamson, A.A., and Trabold, T.A., “Anaerobic co-digestion of commercial food waste and dairy manure: Characterizing biochemical parameters and synergistic effects”, Waste Management, 52, pp. 286~294. (2016).
 7. Li, Q., Li, H., Wang, G., and Wang, X., “Effects of loading rate and temperature on anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge in a high frequency feeding system, looking in particular at stability and efficiency”, Bioresource Technology, 237, pp. 231~239. (2017).
 8. [박재일, 우희철, 이재화, “해양조류로부터 바이오에너지 생산 : 현황 및 전망”, 화학공학] Park, J.I., Woo, H.C., Lee, J.H., “Production of Bio-energy from Marine Algae: Status and Perspectives”, Korean Chem. Eng. Res, 46(5), pp. 833~844. (2008).
 9. [김정민, 이영호, 정성훈, 이진태, 조무환, “해조류 혐기성 발효를 이용한 메탄생산”, 청정/대체(절약)에너지기술] Kim, J.M., Lee, Y.H., Jung, S.H., Lee, J.T., Cho, M.H., “Production of Methane from Anaerobic Fermentation of Marine Macro-algae”, CLEAN TECHNOLOGY, 16(1), pp. 51~58. (2010).
 10. [김정환, 김연희, 김성구, 김병우, 남수완, “해양 미생물 유래 해조 다당류 분해 효소의 특성 및 산업적 응용”, 한국미생물·생명공학회지] Kim, J.H., Kim, Y.H., Kim, S.K., Kim, B.W., Nam, S.W., “Properties and Industrial Applications of Seaweed Polysaccharides-degrading Enzymes from the Marine Microorganisms”, Korean J. Microbiol. Biotechnol, 39(3), pp. 189~199. (2011).
 11. Ohkouchi, Y., Inoue, Y., “Direct production of L(+)-lactic acid from starch and food wastes using *Lactobacillus manihotivorans* LMG18011”, Bioresource Technology, 97, pp. 1554~1562. (2006).
 12. [박은영, 정승미, 김용진, 이동훈, “바이오에탄올 생산을 위한 해조류의 가수분해 방법에 대한 고찰”, 한국폐기물자원순환학회지] Park, E.Y., Jeong, S.M., Kim, Y.J., Lee, D.H., “Review on hydrolysis methods of the macroalgae for production of bioethanol”, Journal of Material Cycles and Waste Management, 29(4), pp. 323~333. (2012).
 13. APHA., “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”, 21th Edition. (2005).
 14. Yun, Y.M., Cho, S.K., Kim, H.W., Jung, K.W., Shin, H.S., and Kim, D.H., “Elucidating a synergistic effect of food waste addition on the enhanced anaerobic digestion of waste activated sludge”, Korean J. Chem. Eng., 31(8), pp. 1542~1546. (2014).
 15. [신상룡, 이모권, 김민균, 홍성민, 김동훈, “해조류 첨가를 통한 하수슬러지 산발효 효율 증대”, 유기물자원화] Shin, S.R., Lee, M.K., Kim, M.G.,

- Hong, S.M., and Kim, D.H., "Enhanced Acidification Efficiency of Sewage Sludge by Seaweed Addition", *Journal of the Korea Organic Resource Recycling Association*, 25(1), pp. 15~21. (2017).
16. Liu, G., Liu, X., Li, Y., He, Y., Zhang, R., "Influence of pH Adjustment and Inoculum on Anaerobic Digestion of Kitchen Waste for Biogas Producing", *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 5(3), pp. 1~6. (2011).
17. Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., Tan, T., "Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, pp. 383~392. (2014).