

음식물류 폐기물 특성 및 메탄 발생가능량 평가

이민규¹, 김 경², 신현곤³, 배기환⁴, 김충곤⁵, 박준석^{1,*}

¹강원대학교 지구환경시스템공학과
25913 강원도 삼척시 중앙로 346

²안양대학교 환경에너지공학과
14028 경기도 안양시 만안구 삼덕로 37번길 22

³신한대학교 에너지환경공학과
11340 경기도 동두천시 별마들로 40번길 30

⁴(주)도화엔지니어링 플랜트설계1팀
06178 서울 강남구 삼성로 438

⁵고등기술연구원
17180 경기도 용인시 처인구 백암면 고안로 51번길 175-28

(2019년 8월 12일 접수; 2019년 8월 19일 수정본 접수; 2019년 8월 26일 채택)

Estimation of Characteristics and Methane Production Rate of Food Waste

Min-Kyu Lee¹, Kyung Kim², Hyun-Gon Shin³, Ki-Hwan Bae⁴, Choong-Gon Kim⁵, and Joon-Seok Park^{1,*}

^{1,*}Department of Earth & Environmental Engineering, Kangwon National University
346 Joongang-ro, Samcheok-si, Gangwon-do 25913, Korea

²Department of Environmental Engineering, Anyang University
22, Samdeok-ro 37 beon-gil, Anyang-si, Gyeonggi-do 14028, Korea

³Department of Energy & Environmental Engineering, Shinhan University
30, Beolmadeul-ro 40 beon-gil, Dongducheon-si, Gyeonggi-do 11340, Korea

⁴Department of Plant Engineering, Dohwa Engineering Company, LTD.
438 Samsong-ro, Gangnam-gu, Seoul 06178, Korea

⁵Bio Resource Center, Institute for Advanced Engineering
175-28, Goan-ro 51 beon-gil, Baegam-myeon, Choin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17180, Korea

(Received for review August 12, 2019; Revision received August 19, 2019; Accepted August 26, 2019)

요 약

본 연구에서는 강원도 5개 지자체에서 발생된 음식물류 폐기물의 특성을 분석하고 메탄가스 발생량을 평가하였다. 시료는 2017년 7월과 9월에 걸쳐 총 2회 채취하였다. 메탄가스 발생가능량을 평가하기 위하여 BMP (biochemical Methane potential) 시험과 원소조성을 이용한 계산방법을 이용하였다. 음식물류 폐기물의 겉보기밀도는 평균 0.758 ~ 0.850 g cm⁻³, pH는 4.29 ~ 4.75이었다. 물리적 조성 중 주성분은 채소류가 56.43 ~ 72.81%로 가장 높았고, 과일류는 5.31 ~ 8.95%, 곡물류는 1.60 ~ 18.73%, 어육류는 4.47 ~ 12.11%, 여액은 1.76 ~ 3.64%이었다. 평균 수분함량은 69.30 ~ 75.87%, 가연분함량은 22.50 ~ 27.98%, 회분함량은 1.63 ~ 2.48%를 나타내었다. 또한 BOD₅는 17,690.3 ~ 33,154.9 mg L⁻¹, COD_{Cr}은 106,212.3 ~ 128,695.5 mg L⁻¹, 그리고 COD_{Mn}은 51,266.1 ~ 63,426.3 mg L⁻¹의 범위를 보였고 NaCl 함량은 0.81 ~ 1.17%의 범위를 나타내었다. 원소분석 결과 C, H, O, N, S 함량은 각각 44.87 ~ 48.16%, 7.12 ~ 7.57%, 40.13 ~ 43.78%, 3.22 ~ 4.14%, 그리고 0.00 ~ 0.02%를 나타내었다. 음식물류 폐기물의 VS 단위질량당 메탄수율을 살펴보면 BMP 시험에 의한 메탄가스 발생누적량(0.303 ~ 0.354 mCH₄³ kgVS⁻¹)은 원소조성과 생분해율을 반영하여 예측한 결과(0.294 ~ 0.352 mCH₄³ kgVS⁻¹)와 큰 차이가 없었다.

주제어 : 음식물류 폐기물, 메탄, BMP 시험, 메탄수율, 원소조성

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: wan5155@kangwon.ac.kr; Tel: +82-33-570-6578; Fax: +82-33-571-6571

doi: 10.7464/kscet.2019.25.3.223 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

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.

Abstract : This research was performed to evaluate the characteristics of food waste from 5 areas in Gangwon Province, Korea and to predict the CH_4 gas production rate. Food wastes were sampled in July and September, 2017. The amount of methane gas generation was evaluated through the biochemical methane potential (BMP) test and a calculation method using chemical composition. Average bulk density and pH of the food wastes were in the range of $0.758 \sim 0.850 \text{ g cm}^{-3}$ and $4.29 \sim 4.75$, respectively. By physical composition, vegetables were the highest with $56.43 \sim 72.81\%$ with fruits recording $5.31 \sim 8.95\%$, cereals $1.60 \sim 18.73\%$, fish and meat $4.47 \sim 12.11\%$, and filtrate $1.76 \sim 3.64\%$. The average water content was $69.30 \sim 75.87\%$, and VS and ash content were $22.50 \sim 27.98\%$ and $1.63 \sim 2.48\%$, respectively. In addition, BOD_5 , COD_{Cr} , and COD_{Mn} were in the ranges of $17,690.3 \sim 33,154.9 \text{ mg L}^{-1}$, $106,212.3 \sim 128,695.5 \text{ mg L}^{-1}$, and $51,266.1 \sim 63,426.3 \text{ mg L}^{-1}$, respectively. The NaCl content ranged from 0.81 to 1.17%. The results of elemental analysis showed that the contents of C, H, O, N, and S were $44.87 \sim 48.1\%$, $7.12 \sim 7.57\%$, $40.13 \sim 43.78\%$, $3.22 \sim 4.14\%$, and $0.00 \sim 0.02\%$, respectively. In a comparison of the methane production yield per VS mass of food waste, there was no significant difference between the cumulative amount ($0.303 \sim 0.354 \text{ mCH}_4^3 \text{ kgVS}^{-1}$) by the BMP test and the theoretical amount ($0.294 \sim 0.352 \text{ mCH}_4^3 \text{ kgVS}^{-1}$) calculated by chemical composition.

Keywords : Food waste, Methane, BMP test, Methane production yield, Chemical composition

1. 서 론

음식물류 폐기물은 가정이나 식당에서 배출되는 음식물쓰레기, 식품 제조와 유통 과정 등에서 발생하는 식품찌꺼기 등을 의미한다[1,2]. 음식물류 폐기물은 미생물 분해 가능한 유기물을 다량 함유하고 있어 유기성 폐기물로 분류된다[1,2]. 우리나라 음식물류 폐기물은 수분함량(약 70~80%)과 가연분함량이 높아 부패성이 높으며, 염분 농도가 0.5~2.0% (습윤 기준) 정도로 슬러지나 축산분뇨와 같은 유기성 폐기물에 비하여 수분, 가연분 및 염분이 높다[3-5]. Choi and Nam [6]은 음식물류 폐기물이 가정에서 약 71%, 음식점 및 농수산물 유통시장 등에서 29%가 발생되고 채소류 53.1%, 육류 및 어패류 18.6%, 곡물류 16.0%의 성상비율을 보이며, 평균 수분함량이 약 85%라고 하였다.

생활폐기물 중 음식물류 폐기물은 2006년부터 별도로 분리하여 집계하고 있다[7]. 전국 폐기물 발생 및 처리현황(환경부·한국환경공단)에 따르면 2007~2016년 동안 분리배출되는 음식물류 폐기물 발생량은 12,501~14,389 톤/일이었으며[7], 이는 전체 생활폐기물 중 25.7~27.7%에 해당한다. 환경부에서는 2005년부터 음식물류 폐기물 직매립을 금지하고 별도 분리수거하여 사료화, 퇴비화 등의 방법으로 재활용하도록 하고 있다[5,8]. 음식물류 폐기물의 2016년도 원단위 발생량은 $0.27 \text{ kg/인}^{-1} \text{ 일}^{-1}$ 이었으며[7], 분리배출된 음식물류 폐기물 중 96.9%가 재활용 방법으로 처리되었고 매립과 소각으로 처리되는 양은 각각 0.9%와 2.2%로 미미하였다[7].

음식물류 폐기물의 처리방법에는 소화, 소각 및 탄화 등이 있으나 발생량의 대부분은 사료화와 퇴비화에 의존하고 있다[9]. 음식물류 폐기물과 같은 유기성 폐기물을 이용한 퇴비 또는 사료의 생산은 그만큼 비료나 사료의 생산을 줄일 수 있으므로 화석연료의 사용과 같은 온실가스 배출을 간접적으로 줄일 수 있는 방법이다[10]. 음식물류 폐기물을 소각처리하는 경우에는 수분함량이 높고 발열량(음식물류 폐기물 평균발열량 : 715 kcal kg^{-1})이 낮기 때문에 소각온도 저하에 따른 보조연료 추가가 필요하고 소각시 발생하는 다이옥신 등의 대기오염물질로 인해 널리 활용되지 못하고 있는 실정이다

[1]. 또한 매립할 경우 침출수가 다량 발생하여 지하수를 오염시키는 등 2차 환경오염을 유발하며, 부패로 악취 및 유해가스가 발생하여 매립지 관리를 어렵게 하는 등 매립지 안정화를 지연시킨다[1].

이처럼 지금까지 음식물류 폐기물 재활용은 퇴비화와 사료화가 가장 주된 처리방안이었으나 퇴비화는 음식물류 폐기물의 염분농도가 높아 생산된 퇴비의 수요처 확보에 한계가 있었다[5]. 이 밖에 환경부와 농림축산식품부는 최근 아프리카 돼지열병을 예방하기 위해 2019년 7월 25일부터 돼지 등 가축에게 남은 음식물을 먹이로 주는 것을 제한하는 폐기물관리법 시행규칙을 시행하여 농가에서 끓이는 등 가공과정을 거치더라도 잔반을 가축 먹이로 사용해서는 안 되고 폐기물 재활용시설 설치를 승인받은 농가에서만 잔반 급여가 허용되도록 하였다[11]. 2000년 말부터는 자원 및 에너지 가격이 급등하고 지구온난화 등으로 인하여 온실가스 감축이 절실히 요구되고 있어 폐기물로부터 자원 및 에너지 회수의 필요성이 대두되었다[12]. 환경부는 2008년 10월 폐자원 및 바이오매스 에너지 대책과 동 대책의 실행 계획을 발표하고 폐자원 에너지화를 위한 각종 대책 추진에 박차를 가해 왔다[12]. 환경부는 가용 가연성 폐기물의 90% (345 만 톤 년^{-1}), 가용 유기성 폐기물의 36% (283 만 톤 년^{-1})를 에너지화하는 것을 목표로 관련 대책을 추진하고 있다[12]. 수도권매립지 등 총 14개소에 유기성폐자원 바이오가스화 시설이 설치되어 운영 중이며 평택, 창원 등 9개소에 음식물 등 유기성폐자원 바이오가스화 시설이 설계·시공 중에 있다[12]. 이러한 상황에서 음식물류 폐기물 등 생분해 용이한 가연성 폐기물을 효율적으로 처리하는 동시에 에너지자원을 얻을 수 있는 혐기성소화처리 방법이 대안으로 제시되고 있다. 혐기성소화는 음식물류 폐기물의 처리비용을 절감하고 효과적으로 부피를 감량함과 동시에 유용한 에너지원인 메탄가스를 다량으로 회수할 수 있는 다양한 장점을 가지고 있다.

이에 본 연구에서는 강원도 5개 지자체에서 발생하는 음식물류 폐기물의 삼성분, pH, 염분농도, 원소분석 등을 분석하여 특성을 파악하고 BMP (biochemical methane potential) 시험과 원소조성을 이용한 계산방법을 통하여 메탄가스 발생가

능량을 평가하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1. 시료 채취

강원도에 위치한 5개 지자체에서 운영하고 있는 음식물류 폐기물 처리시설에서 각각 시료를 채취하였으며, 각 지자체 명은 각각 A, B, C, D, E로 표기하였다. 시료는 2017년 7월과 9월에 걸쳐 총 2회 채취하였다. 저장호퍼에서 음식물류 폐기물을 꺼내어 현장에서 겔보기밀도, 물리적 조성을 측정한 후 다시 혼합하여 대표 시료를 채취하였으며, 채취한 시료는 얼음을 채운 아이스박스에 담아 실험실로 운반한 후 즉시 냉장 보관하고 실험분석에 사용하였다.

2.2. 분석 방법

음식물류 폐기물 특성을 평가하기 위하여 pH, 삼성분(수분, 가연분, 회분), BOD₅, COD_{Cr}, COD_{Mn}, 염분, 그리고 원소 조성을 분석하였다. 분석은 기본적으로 폐기물공정시험기준(2016)[13]과 수질오염공정시험기준(2014)[14]에 따랐으며 원소조성은 원소분석기(FlashEA 1112, Thermo Scientific, USA)를 이용하였고 모두 3반복(triplicate) 실시 후 평균값을 사용하였다. 염분은 이온크로마토그래피(ICS-2100, Thermo Scientific, USA)를 이용하여 Cl⁻이온을 한 번씩만 분석하였다.

2.3. BMP 시험방법

BMP (biochemical methane potential) 시험은 일반적으로 serum bottle를 이용하여 bottle 내부에 분해과정에 필요한 혐기성 미생물 및 영양물질을 주입하고, 온도, pH 등 최적의 조건을 유지해 주면서 가스 발생량과 조성을 파악하는 방법이다[15]. BMP 시험은 총 5개 지자체(A, B, C, D, E)에서 1차 시료채취한 음식물류 폐기물을 대상으로 하였으며, 각 시료마다 2개의 반응기를 준비하여 실험을 실시하였다. 영양배지 140 mL를 serum bottle에 넣어 멸균하고 상온으로 냉각시킨 후 A하수처리장에서 채취한 식중슬러지를 영양배지 부피의 10%로 주입하였다[15]. Serum bottle에 2 g VS (가연성)/L을 기준으로 하여 각 시료(음식물류 폐기물)를 집어넣고, 혐기성 미생물의 최적 pH인 7.0으로 맞추기 위해 0.1 N NaOH와 0.1 N HCl을 넣어 조절하였다[15]. 여기에 미생물 반응에 의한 급격한 산형성에 따른 pH 저하를 억제하기 위해 중탄산염(NaHCO₃)을 넣어준 후 질소가스로 충분히 퍼징(purging)하고

35 °C 항온조에서 시험을 실시하였다[15]. 발생가스는 TCD가 장착된 GC (6000M, Younglin, Korea)를 이용하여 CH₄, CO₂, O₂, N₂의 농도를 분석하고 표준상태(0 °C, 1기압)로 환산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 음식물류 폐기물 특성

음식물류 폐기물의 겔보기밀도와 pH를 Table 1에 나타내었다. 겔보기밀도는 1차와 2차에서 큰 차이를 볼 수 없었으며 평균 0.758 ~ 0.850 g cm⁻³의 범위를 보였다. 1차와 2차의 평균 pH는 4.29 ~ 4.75의 범위를 나타내었다. 음식물류 폐기물과 같은 유기성 폐기물은 저장호퍼에서 시간이 지남에 따라 가수분해가 진행되는데 이 때 생성되는 유기산이 pH를 저하시킨다. 충주시 음식물류 폐기물의 pH는 4.84 ~ 4.89라고 보고된 연구가 있다[16].

음식물류 폐기물의 물리적 조성을 분석하기 위하여 주성분은 채소류, 과일류, 곡물류, 어육류, 기타로 구분하였으며, 이 물질은 플라스틱(대부분이 음식물류 폐기물을 담아 배출하는 비닐류), 종이, 목재, 조개 및 뼈류와 기타로 분류하였다. 채소류는 1차 조사와 2차 조사에서 큰 차이가 없었으나 한여름에 해당하는 기간에 실시된 1차 조사(7월 12 ~ 13일) 결과는 2차 조사(9월 7 ~ 8일)에 비하여 상대적으로 과일류 비율이 높았고 곡물류 비율은 낮았다(Table 2). 물리적 조성은 시료채취 기간에 따라 함량이 다소 높거나 낮아져서 지자체별 유의미한 결과를 도출하기는 어려웠다. 전체적으로 평균값을 살펴보면 주성분 중 채소류는 56.43 ~ 72.81%로 가장 높았고, 과일류는 5.31 ~ 8.95%, 곡물류는 1.60 ~ 18.73%, 어육류는 4.47 ~ 12.11%, 여액은 1.76 ~ 3.64%의 범위를 나타내었다. 이물질은 플라스틱이 1.37 ~ 3.44%, 종이 0.00 ~ 0.91%, 목재 0.00 ~ 0.11%를 나타내었으며, 조개 및 뼈류가 2.39 ~ 6.82%로 나타났다. 기타 이물질(쇠주걱, 뽕뚜껑 등)은 0.00 ~ 0.49%의 범위를 나타내었다.

1차 채취한 시료는 2차 시료에 비하여 대체적으로 수분함량이 높은 것으로 나타났다(Table 3). 이는 물리적 성상 조사(Table 2)에서 볼 수 있듯이 1차 시료에서 수분이 높은 것으로 알려진 과일 등의 함량이 높았기 때문으로 판단되며, 여액 함량도 1차 시료가 2차 시료보다 더 높은 것으로 나타났다. 5개 지자체 음식물류 폐기물의 평균 수분함량은 69.30 ~ 75.87%, 가연분함량은 22.50 ~ 27.98%, 회분함량은 1.63 ~ 2.48%를 나타내었다. Kim et al. [9]의 연구에서 음식물류 폐기물의 수분,

Table 1. Bulk density and pH of food waste

Item	Area	A	B	C	D	E
Bulk density (g cm ⁻³)	1st	0.823	0.757	0.722	0.731	0.844
	2nd	0.852	0.830	0.795	0.785	0.855
	Average	0.838	0.794	0.759	0.758	0.850
pH	1st	4.40	4.23	4.48	5.16	4.40
	2nd	4.55	4.51	4.09	4.34	4.49
	Average	4.48	4.37	4.29	4.75	4.45

Table 2. Physical composition of food waste (Unit : %, wet weight basis)

Item \ Area		A		B		C		D		E	
		1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd
		Average		Average		Average		Average		Average	
Main ingredient	Vegetable	68.49	74.52	52.09	60.77	72.51	50.54	57.57	62.27	75.37	70.25
		71.50		56.43		61.53		59.92		72.81	
	Fruit	10.97	5.78	7.74	2.98	10.14	3.45	16.63	1.26	4.59	6.03
		8.37		5.36		6.79		8.95		5.31	
	Cereal	4.69	2.84	14.91	21.26	4.29	33.17	0.98	12.96	1.02	2.18
		3.77		18.08		18.73		6.97		1.60	
	Fish & meat	1.78	8.53	13.03	11.19	2.92	6.03	9.08	7.58	8.24	10.55
		5.16		12.11		4.47		8.33		9.39	
	filtrate	5.14	2.14	2.42	1.09	4.01	0.55	2.60	1.64	2.68	2.23
		3.64		1.76		2.28		2.12		2.45	
	Others	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Debris	Plastics	3.11	1.91	5.57	1.31	3.03	1.62	6.60	7.80	1.24	1.51
		2.51		3.44		2.32		7.20		1.37	
	Paper	0.00	0.00	0.00	0.76	0.00	0.00	1.83	0.00	0.00	0.27
		0.00		0.38		0.00		0.91		0.13	
	Wood	0.03	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.11	0.11
		0.02		0.00		0.08		0.00		0.11	
	Shell & bone	4.80	4.28	4.14	0.64	2.92	4.65	4.14	6.49	6.75	6.88
		4.54		2.39		3.79		5.31		6.82	
	Others	0.97	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.58	0.00	0.00	0.00
		0.49		0.05		0.00		0.29		0.00	

Table 3. Moisture, VS, and ash contents of food waste

Item \ Area		A	B	C	D	E
Moisture	1st	79.83	75.58	83.74	77.18	80.59
	2nd	66.73	63.03	68.00	69.23	68.22
	Average	73.28	69.30	75.87	73.20	74.40
VS ¹⁾	1st	18.24	22.67	14.81	21.13	17.76
	2nd	30.24	33.28	30.18	28.02	29.41
	Average	24.24	27.98	22.50	24.58	23.59
Ash	1st	1.93	1.74	1.44	1.70	1.65
	2nd	3.03	3.69	1.82	2.75	2.38
	Average	2.48	2.72	1.63	2.23	2.01
VS ¹⁾	1st	90.58	92.71	91.14	92.57	91.51
	2nd	90.86	90.16	94.29	91.00	92.39
	Average	90.72	91.44	92.71	91.79	91.95
Ash	1st	9.42	7.29	8.86	7.43	8.49
	2nd	9.14	9.84	5.71	9.00	7.61
	Average	9.28	8.56	7.29	8.21	8.05

¹⁾ Volatile solids

가연분, 회분 함량은 각각 74.29%, 24.76%, 0.95%이었으며, 충주시 음식물류 폐기물의 삼성분은 수분 82.7~83.1%, 가연분 14.9~15.4%, 회분 1.92~2.2%이었다[16]. 본 연구결과에서 수분함량을 제외하고 건조질량 기준으로 환산한 가연분과 회분 함량은 1차와 2차 분석에서 서로 큰 차이를 나타내지

않음을 볼 수 있다(Table 3). 건조질량 기준 평균 가연분은 90.72~92.72%, 회분은 7.29~9.28%의 범위를 보이고 있다.

수분을 포함한 음식물류 폐기물에 대하여 BOD₅를 측정된 결과 5개 지자체 1차와 2차에서 각각 21,810.8~35,745.9 mg L⁻¹와 13,569.7~33,045.5 mg L⁻¹의 범위를 보였으며, 평균 범

Table 4. BOD₅, COD_{Cr}, COD_{Mn} of food waste

Item		Area	A	B	C	D	E
BOD ₅	Wet weight basis (mg L ⁻¹)	1st	21,810.8	29,239.7	22,736.7	35,745.9	22,270.3
		2nd	13,569.7	27,034.0	33,045.5	30,563.9	24,853.3
		Average	17,690.3	28,136.9	27,891.1	33,154.9	23,561.8
COD _{Cr}		1st	135,670.9	139,849.6	111,672.2	123,542.9	128,143.3
		2nd	127,698.6	106,212.3	114,239.0	124,486.8	128,695.5
		Average	131,684.8	123,031.0	112,955.6	124,014.8	128,419.4
COD _{Mn}		1st	80,467.0	85,858.8	69,614.7	69,149.9	68,286.3
		2nd	31,189.6	40,993.9	43,244.4	33,382.4	34,479.1
		Average	55,828.3	63,426.3	56,429.5	51,266.1	51,382.7

Table 5. Cl⁻ and NaCl content of food waste (Unit : %, wet weight basis)

Item		Area	A	B	C	D	E
Cl ⁻	1st	0.70	0.50	0.39	0.35	0.41	
	2nd	0.71	0.59	0.61	0.64	0.63	
	Average	0.71	0.55	0.50	0.49	0.52	
NaCl	1st	1.15	0.83	0.65	0.58	0.67	
	2nd	1.18	0.98	1.01	1.05	1.04	
	Average	1.17	0.90	0.83	0.81	0.85	

위는 17,690.3 ~ 33,154.9 mg L⁻¹의 범위를 나타내었다(Table 4). COD는 Cr법과 Mn법의 두 가지를 이용하여 측정하였다. 수분을 포함한 음식물류 폐기물에 대하여 COD_{Cr}를 측정할 결과 5개 지자체 1차 조사 평균값은 111,672.2 ~ 139,849.6 mg L⁻¹, 2차 조사 평균값은 106,212.3 ~ 128,695.5 mg L⁻¹의 범위를 나타내었으며(Table 4), 1차와 2차 조사의 전체 평균값은 112,955.6 ~ 131,684.8 mg L⁻¹의 범위를 보였다. COD_{Mn}에서는 1차 조사 평균값은 69,149.9 ~ 85,858.8 mg L⁻¹, 2차 조사 평균값은 31,189.6 ~ 43,244.4 mg L⁻¹의 범위를 보였고(Table 4), 1차와 2차 조사의 전체 평균값은 51,266.1 ~ 63,426.3 mg L⁻¹의 범위를 나타내었다. 충주시 음식물류 폐기물 분석결과에서 BOD₅는 134,800 ~ 153,000 mg L⁻¹의 범위를 나타내었으며, COD_{Mn}과 COD_{Cr}은 각각 평균 78,806 mg L⁻¹와 225,120 mg L⁻¹을 나타내었다[16].

이온크로마토그래피로 분석한 Cl⁻ 함량은 습윤질량 기준으로 볼 때 1차에서 0.35 ~ 0.70%, 2차에서 0.59 ~ 0.71%의 범위를 나타내었다(Table 5). 1차와 2차 평균값의 범위는 0.49 ~ 0.71%인 것으로 나타났다. Cl⁻ 함량을 NaCl로 환산하면 1차와 2차의 평균값은 0.81 ~ 1.17%에 해당한다. 또한 수분을 제외한 건조질량 기준으로 환산하면 1차와 2차의 NaCl 함량 평균값은 0.81 ~ 1.17%를 나타낸다(데이터 미제시). Kim et al. [9]은 음식물류 폐기물의 염도 범위는 1.0 ~ 1.1%로 평균 1.05% 정도라고 보고하였다.

각 지자체별 시료의 원소분석 결과를 Table 6에 나타내었다. 원소분석은 시료를 건조 후 분쇄하여 C, H, N, S를 분석하였으며, O는 계산식으로 구하였다. VS 100% (가연분 건조질량 기준)에서 C, H, N, S 함량을 뺀 값이 O함량에 해당되며,

이 때 Cl 등 다른 성분은 고려하지 않았다. 5개 지자체에서 채취한 음식물류 폐기물의 1차와 2차 평균 C, H, O, N, S 함량은 각각 48.16 ~ 44.87%, 7.12 ~ 7.57%, 40.13 ~ 43.78%, 3.22 ~ 4.14, 그리고 0.00 ~ 0.02%를 나타내었다. 본 원소분석 결과는 다음 절에서 이론적 메탄가스 생성량 산출에 활용되었다. Kim et al. [9]의 연구에서 음식물류 폐기물의 C와 N 함량은 각각 46.16%와 3.09%를 나타내었으며, 충주시 음식물류 폐기물 원소분석 결과 건조질량 기준으로 C가 42.50%, H 6.29%, O 30.10%, N 3.27%, S 0.22%라고 보고된 바 있다[16].

3.2. 메탄가스 발생가능량

BMP 시험은 총 5개 지자체(A, B, C, D, E)에서 1차 시료채취한 음식물류 폐기물을 대상으로 하였으며, 각 시료마다 2개의 반응기를 준비하여 실험을 실시하였다. Figure 1과 Table 7은 각 지자체별 시료에 대한 평균 누적메탄수출을 나

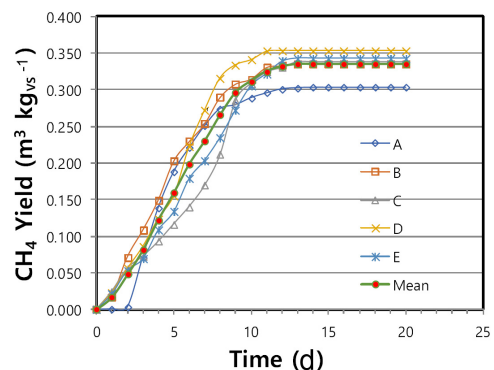


Figure 1. Cumulative methane yield by BMP test.

Table 6. Chemical composition of food waste (Unit : %, VS weight basis)

Area	Item	C	H	O	N	S
A	1st	41.14	7.14	48.23	3.49	0.00
	2nd	48.59	7.50	39.34	4.57	0.00
	Average	44.87	7.32	43.78	4.03	0.00
B	1st	44.37	7.16	45.31	3.16	0.00
	2nd	51.95	7.97	34.97	5.11	0.00
	Average	48.16	7.57	40.13	4.14	0.00
C	1st	44.26	7.44	45.24	3.06	0.00
	2nd	47.77	7.29	41.57	3.37	0.00
	Average	46.01	7.36	43.41	3.22	0.00
D	1st	46.51	7.47	42.00	3.98	0.04
	2nd	44.93	6.78	44.38	3.91	0.00
	Average	45.72	7.12	43.19	3.95	0.02
E	1st	44.60	7.53	44.67	3.18	0.02
	2nd	47.28	7.28	40.41	5.03	0.00
	Average	45.94	7.40	42.54	4.11	0.01

Table 7. Comparison of methane yield from BMP test and chemical composition analysis

Area	Item	Total ultimate methane yield by BMP test			Value calculated by chemical composition analysis		X/Y ratio	X/Z ratio
		Reactor (1)	Reactor (2)	X ¹⁾	Y ²⁾ : Theoretical methane production	Z ³⁾		
A		0.318	0.288	0.303	0.394	0.294	0.769	1.030
B		0.323	0.348	0.336	0.437	0.326	0.768	1.029
C		0.319	0.358	0.339	0.445	0.332	0.761	1.020
D		0.345	0.363	0.354	0.472	0.352	0.749	1.005
E		0.347	0.340	0.344	0.452	0.337	0.760	1.019
Mean ⁴⁾		0.330	0.339	0.335	0.440	0.328	0.761	1.020

¹⁾ Average value for reactor (1) and (2)
²⁾ Theoretical methane production yield calculated by equation (3.4)
³⁾ Z = Y (theoretical value) × 0.746 (biodegradable factor of food waste) [17]
⁴⁾ Mean value of 5 areas, where is A, B, C, D, and E

타낸 것이다. 1~2일차에 메탄가스가 발생되기 시작하면서 꾸준히 증가하였고 약 2주 후에는 모든 반응기에서 더 이상 메탄이 발생되지 않았다. 5개 지자체 음식물류 폐기물에서 발생된 메탄가스 발생누적량은 0.303 ~ 0.354 mCH₄³ kg_{VS}⁻¹의 범위를 나타내었으며, 전체 평균값은 0.335 mCH₄³ kg_{VS}⁻¹이었다. Park et al. [17]은 음식물류 폐기물에 대한 BMP 시험에서 최종 메탄수율이 0.451 ~ 0.458 mCH₄³ kg_{VS}⁻¹라고 보고하였다. 음식물류 폐기물 바이오가스화시설 기술지침서(2015)에 따르면 표준상태(0 °C, 1기압)에서 수분이 제거된 건가스의 시설 설계 기준은 0.30 ~ 0.48 mCH₄³ kg_{VS}⁻¹ (음식물류 폐기물)로 나타났으며[18], 순간 부하율 변동을 고려하여 최대치를 권장하고 있다[18]. 가스발생량은 BMP 시험을 통하여 적정 값을 선정할 것을 권장하고, 시공 후 소화가스저장조의 용량 부족과 같은 문제가 없도록 면밀한 검토가 필요하다[18].

메탄가스 발생량(생성물)은 유기물 분해율과 혐기성소화의 효율을 파악하는데 가장 명확한 인자이다[18]. 소화가 원

활하게 이루어지는 경우의 습윤가스, 배관 내 실온도 기준 바이오 가스량은 평균 0.48 mCH₄³ kg_{VS}⁻¹ 정도이나 실제 운전시 0.5 ~ 0.6 mCH₄³ kg_{VS}⁻¹ 이상의 가스발생량이 발현되는 경우가 많다[18]. 따라서 최소 설계기준은 습윤가스, 배관내 실온도 기준으로 0.48 mCH₄³ kg_{VS}⁻¹이고, 시설 설계기준은 0.48 ~ 0.65 mCH₄³ kg_{VS}⁻¹가 적정하다[18]. VS 기준 이론적 메탄생성물(건가스, 표준상태 0 °C, 1 기압 기준)은 아래의 산술식으로 구할 수 있다[18].

$$C_a H_b O_c N_d + \left(\frac{4a - b - 2c - 3d}{4}\right) H_2O \rightarrow \left(\frac{4a + b - 2c - 3d}{8}\right) CH_4 + \left(\frac{4a - b + 2c + 3d}{8}\right) CO_2 + dNH_3 \quad (1)$$

$$STP m^3 \cdot CH_4 / kg \cdot VS = \frac{22.4 \left(\frac{4a + b - 2c - 3d}{8}\right)}{12a + b + 16c + 14d} \quad (2)$$

유기물 원소조성(C, H, O, N 함량)을 이용하여 이론적 메탄 가스 생성량을 계산한 결과를 Table 7에 나타내었다. BMP 시험결과와 비교하기 용이하도록 3회 반복(triplicate) 분석한 평균 원소조성 값을 Equation (1)에 대입하여 a, b, c, d 값을 구하고 이를 Equation (2)에 대입한 후 메탄가스 발생량을 계산하였다. 원소조성으로 예측된 이론적 메탄가스 발생량은 0.394 ~ 0.472 $\text{mCH}_4^3 \text{kgvs}^{-1}$ 의 범위를 나타내었으며, 전체 평균값은 0.440 $\text{mCH}_4^3 \text{kgvs}^{-1}$ 이었다. 유기물이 모두 분해되어 메탄 가스 생성에 기여하는 것은 아니므로 여기에 생분해도 계수 0.746을 곱하여 최종 이론적 메탄가스 발생량을 산출하였다 [18]. 생분해율은 유기성 폐기물 종류에 따라 다를 수 있으며, 본 연구에서는 음식물류 폐기물 바이오가스화시설 기술지침서(2015)[18]에 언급된 수치를 이용하였다. 생분해율을 고려한 이론적 메탄가스 발생량은 0.294 ~ 0.352 $\text{mCH}_4^3 \text{kgvs}^{-1}$ 의 범위를 나타내었으며, 전체 평균값은 0.328 $\text{mCH}_4^3 \text{kgvs}^{-1}$ 이었다.

지자체별 음식물류 폐기물의 VS 단위질량당 메탄수율을 비교하여 살펴보면 BMP 시험에 의한 메탄가스 발생량(0.303 ~ 0.354 $\text{mCH}_4^3 \text{kgvs}^{-1}$)이 원소조성과 생분해율을 반영하여 예측한 결과(0.294 ~ 0.352 $\text{mCH}_4^3 \text{kgvs}^{-1}$) 보다 약간 높았으나 큰 차이는 없었다. BMP 시험에 의한 메탄가스 발생량은 5개 지자체 중 A지역이 0.303 $\text{mCH}_4^3 \text{kgvs}^{-1}$ 으로 타 지역에 비하여 상대적으로 낮았다. 이는 원소조성으로 예측한 결과에서도 동일한 경향을 보이는 것으로 보아 원소성분 차이 때문인 것으로 판단된다. 타 지역과 비교할 때 A지역 음식물류 폐기물의 탄소함량은 상대적으로 다소 낮았으며, 산소함량은 상대적으로 높게 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 강원도 5개 지자체에서 발생하는 음식물류 폐기물의 삼성분, pH, 염분농도, 원소분석 등을 분석하여 특성을 파악하고 BMP (biochemical methane potential) 시험과 원소조성을 이용한 계산방법을 통하여 메탄가스 발생가능량을 평가하고자 하였다. 시료는 2017년 7월과 9월에 걸쳐 총 2회 채취하여 분석하였다. 음식물류 폐기물의 겉보기밀도는 평균 0.758 ~ 0.850 g cm^{-3} , pH는 4.29 ~ 4.75의 범위를 나타내었다. 물리적 조성은 전체적으로 평균값을 살펴보면 주성분 중 채소류는 56.43 ~ 72.81%로 가장 높았고, 과일류는 5.31 ~ 8.95%, 곡물류는 1.60 ~ 18.73%, 어육류는 4.47 ~ 12.11%, 여액은 1.76 ~ 3.64%의 범위를 나타내었다. 이물질은 플라스틱이 1.37 ~ 3.44%, 종이 0.00 ~ 0.91%, 목재 0.00 ~ 0.11%를 나타내었으며, 조개 및 뼈류가 2.39 ~ 6.82%로 나타났다. 기타 이물질(쇠주걱, 뽕뚜껑 등)은 0.00 ~ 0.49%의 범위를 나타내었다. 삼성분 분석결과 평균 수분함량은 69.30 ~ 75.87%, 가연분함량은 22.50 ~ 27.98%, 회분함량은 1.63 ~ 2.48%를 나타내었다. 또한 BOD_5 는 17,690.3 ~ 33,154.9 mg L^{-1} , COD_{Cr} 은 106,212.3 ~ 128,695.5 mg L^{-1} , 그리고 COD_{Min} 은 51,266.1 ~ 63,426.3 mg L^{-1} 의 범위를 나타내었다. NaCl 함량 평균값은 0.81 ~ 1.17%의 범위를 보였다. 원소분석 결과 C, H, O, N, S

함량은 각각 44.87 ~ 48.16%, 7.12 ~ 7.57%, 40.13 ~ 43.78%, 3.22 ~ 4.14%, 그리고 0.00 ~ 0.02%를 나타내었다. BMP 시험 결과 메탄가스 발생누적량은 0.303 ~ 0.354 $\text{mCH}_4^3 \text{kgvs}^{-1}$ 의 범위를 나타내었으며, 전체 평균값은 0.335 $\text{mCH}_4^3 \text{kgvs}^{-1}$ 이었다. 원소조성과 생분해율을 고려하여 예측된 이론적 메탄가스 발생량은 0.294 ~ 0.352 $\text{mCH}_4^3 \text{kgvs}^{-1}$ 의 범위를 나타내었으며, 전체 평균값은 0.328 $\text{mCH}_4^3 \text{kgvs}^{-1}$ 이었다. 음식물류 폐기물의 VS 단위질량당 메탄수율을 비교하여 살펴보면 BMP 시험에 의한 메탄가스 발생량은 원소조성과 생분해율을 이용하여 예측한 결과와 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

감사

본 연구는 (주)도화엔지니어링과 2017년도 강원대학교 대학회계 학술연구구성비(관리번호-620170059)로 연구하였으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Kang, B. M., Hwang, H. U., Kim, J. H., Yang, Y. W., and Kim, Y. J., "Study on Reutilization with Aerobic Microbes of Organic Food Waste Leachates," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **33**(1), 54-59 (2011).
2. Lee, S.-A., "The Study on Improving Methods for Food Waste Recycling Policy," Ph.D Dissertation, Sungshin Women's University, Seoul (2005).
3. Ahn, S.-S., "Study on the Support Policy for the Efficient Recycling System of Food Wastes," Ph. D. Dissertation, Kangwon National University, Chuncheon (2005).
4. Ryu, S.-H., "Policy Direction about Food Garbage Reutilization Technology Process," Master's Dissertation, Dongshin University, Naju (2007).
5. Kim, J.-H., Park, J.-S., and Phae, C.-G., "Evaluation of Performance Index for Optimization of Food Waste Treatment and Recovery Facility," *Clean Technol.*, **22**(3), 181-189 (2016).
6. Daegu-Gyeongbuk Development Institute, Feasibility Study for Installation of Food Waste Treatment Facility, Report (2007).
7. Ministry of Environment · Korea Environment Corporation, Generation and Treatment Status of Municipal Solid Waste in Nationwide, Annual Report (2013, 2017).
8. Oh, J., and Lee, H., "An Exploration on Food Waste Management of Local Governments," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **38**(3), 101-109 (2016).
9. Kim, N. C., Kim, Y. T., Lee, H. J., Kim, M. A., Moon, Y. C., and Paik, S., "A Study on the Characteristic Analysis of Composting of Food Waste Added with Wood Biomass Generated in City," *J. Korean Soc. Environ. Analysis*, **17**(4), 215-222 (2014).
10. Seo, J. Y., "Vermicomposting of Sludge from Milk Processing Industry (MPS)," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **34**(7), 488-494

- (2012).
11. <https://news.v.daum.net/v/20190725000002482>, Can't feed leftovers to livestock from today (news input date : July 25, 2019).
 12. <http://library.me.go.kr/>, 2018 White Paper of Environment (assessed date : July 5, 2019).
 13. Ministry of Environment, Korean Analytical Method for Solid Waste (2016).
 14. Ministry of Environment, Korean Analytical Method for Wastewater (2014).
 15. Lee, N.-H., Park, J.-K., Jeong, S.-R., Kang, J.-H., and Kim, K., "Statistical Evaluation of Sigmoidal and First-Order Kinetic Equations for Simulating Methane Production from Solid Wastes," *J. Korea Org. Resour. Recycl. Assoc.*, **21**(2), 90-98 (2013).
 16. Chungbuk National University, Basic design service for installation of organic waste biogas plant in Chungju city.
 17. Park, J.-K., Kang, J.-H., Kim, E.-C., Kim, K., Yoon, S.-P., and Lee, N.-H., "Estimation of Methane Production Rates of Municipal Solid Wastes," *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **30**(1), 52-59 (2013).
 18. Ministry of Environment · National Institute of Environmental Research, Technical Guidelines for Food Waste Biogasification Facilities, Report (2015).