

우리나라 음식물 쓰레기의 혐기성소화 가스 성분과 발열량 예측

장호남^{1,2,*} · 홍원희¹ · 이태용¹ · 장승택² · 정창문² · 박영숙³

¹ 한국과학기술원 생명화학공학과, 대전시 유성구 구성동 373-1 (우)305-701

² 이원바이오텍(주), 한국과학기술원 동문창업관 5105호 (우) 305-400

³ 순천향 대학교 식품영양학과, 충남 아산시 신창면 읍내리 646 (우)336-745

(접수일자 : 2003. 2. 19 / 채택일자 : 2003. 3. 20)

Estimation of Sludge Gas Composition and Heating Value from Anaerobically Digested Korean Food Wastes

Ho Nam Chang^{1,2} · Won Hi Hong¹ · Tai-yong Lee¹ · Seung Teak Chang² · Chang Moon Chung² · Young-Sook Park³

¹ Dept of Chemical and Biomolecular Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), 373-1 Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea

² E1biotech, Ltd. 5105 Alumni Venture Center, KAIST, Daejeon 305-400, Korea

³ Dept of Food Science and Nutrition, Soonchunhyang University, 646 Eupnae-ri, Asan-si, Chungnam-do 336-745, Korea

요 약

우리나라에서 발생하는 음식물쓰레기는 연간 410만톤으로 이는 82만톤의 유기물에 해당한다. 이를 사료 혹은 퇴비로 사용하려는 노력은 최근 한계에 달하고 있어 본 연구에서는 혐기성 발효로 메탄을 생산하는 것을 고려하여 메탄합량, 총에너지 생산량 등을 산출하였다. 음식물 쓰레기를 전부 혐기성으로 처리하면 호기성 방법 보다 연간 약 3,000억원의 이득이 있으며 이 때 생산되는 메탄량은 4.4억톤 m³로 우리나라에서 연간 사용하는 총 도시가스 128억톤 m³의 3.43%에 해당한다. 특히 주방에서 발생하는 음식물 쓰레기를 현장 처리하여 생기는 메탄은 주방용 도시가스의 28.9%에 해당하는 양이다.

keywords : 음식물 쓰레기, 혐기성 발효, 메탄 합량, 총에너지 생산량

ABSTRACT : The generation of food waste in Korea amounts to 4.10 million per year, which corresponds to 820,000 dry ton of organic waste. This has been used traditionally as animal feed or soil conditioner, but its efficacy has remained doubtful in recent years. In this study as an alternative we considered methane production by anaerobic treatment, which has an advantage of 200 million US dollars over aerobic methods. The production of methane amounts to $4.40 \times 10^8 \text{ m}^3$, 3.43% of $1.28 \times 10^8 \text{ m}^3$, total natural gas used in Korea. Furthermore the methane from household kitchen food waste amounts to 28.9% of the total gas used in the kitchen.

keywords : Food waste, Anaerobic treatment, Methane amount, Energy production

1. 서 론

우리나라의 음식물 쓰레기는 매일 11,237톤으로 배출원별로 보면 가정에서 66.2%, 음식점에서 20.8%, 재래시장 5.7%, 구내식당 4.8%, 대형유통업소가 2.5%를 차지하고 있다[1]. 성분별로는 곡류가 30.58%, 채소가 40.74%, 육류가 12.97%, 과일이 9.27%, 나무젓가락, 종이류, 뼈, 조개껍질 등 이 물질이 5.99%를 차지하고 있다. 삼성분계로 분석하면 수분이 79.36%, 가연분이 17.65%, 회분이 2.99%이다[2]. 음식물 쓰레기량은 공동주택이 단독주택보다 1.2배, 계절별로는 여름철이 1.4-1.6배 높았고, 결보기 밀도는 서울지역이 대략 0.93-0.99 ton/m³이었으나 대구 경산지역은 주택과 식당이 각각 0.754, 0.685 ton/m³이었다[3,4].

음식물쓰레기의 성분 중 수분과 회분을 제외하면 활용 가능한 가연분(combustibles)은 17.65%에 불과한데 톤당 현행 처리비 8만원을 가연분으로 환산하면 1kg당 453원의 “-”값을 가지게 되나 대부분 수거비와 처리비로 소요되므로 “-”의 값의 이점은 없어진다. 또 수분함량이 높아 이를 건조시키는 데는 kg 가연분당 4.49kg의 물을 증발시켜야 하며 이를 열로 환산하면 11,013kJ 혹은 2630kcal가 된다. 따라서 건조한 상태로 이용하려면 높은 부가가치를 가지는 제품의 원료가 되어야 하며 아니면 액상상태로 활용하는 것이 바람직하다. 이제까지 자원 재활용 측면에서 사료나 퇴비로 활용되어 왔으나 최근 사료로는 위생문제로 퇴비로는 염분문제 등으로 수요처를 발견하는 데 상당한 어려움을 겪고 있다.

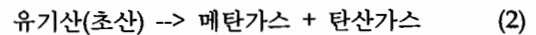
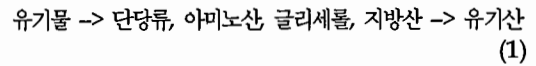
우리나라에서 연간 발생하는 음식물 쓰레기량은 연간 410만 톤으로 이를 여러 가지 방법으로 처리하는 것이 바람직하다. 현재까지 알려진 방법으로는 호기성퇴비화, 혐기성퇴비화, 습식사료, 건식사료, 하수합병처리가 있으며 처리비가 가장 많이 드는 공정은 건조사료화로 톤당 처리비가 83,237원이고 가장 적게 드는 공정은 습식파쇄사료로 27,989원이다[5]. 박순철 [6]은 음식물 쓰레기만 가지고 안양시, 의왕시, 파주시에 파이로트를 건설하여 운영한 적이 있다. 위의 공정 중 하수합병처리와 도시형 혐기성 음식물 처리 시스템은 메탄가스를 발생시켜 유기물을 감소시키는 시스템으로 우리나라에서도 널리 보급될 가능성

이 있다.

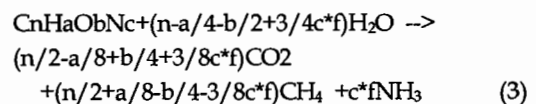
본 연구에서는 음식물쓰레기가 다양한 성분으로 구성되어 있고 또 성분별 분해속도도 각각 달라 실험 결과를 기준으로 처리공정이 설계되고 있음을 감안하여 주성분이 CH₄ 와 CO₂로 구성된 슬러지 가스의 탄수화물, 지방, 단백질, 균체 등 원료별 가스 성분과 발열량을 이론적으로 분석 예측함으로써 고효율 처리공정을 개발하는 데 기초로 삼고자 한다.

2. 원료별 슬러지 가스의 성분 예측

음식물 쓰레기와 같은 유기물은 자연계에서 공기가 잘 공급되지 않는 혐기성 조건하에서 자체 혹은 외부 미생물에 의해 가수 분해 되어 초산, 프로피온산, 부틸산 등의 유기산이 발생하며 이들 유기산은 다시 메탄가스와 탄산가스로 분해 된다. 즉



상기 공정 중 율속 제한되는 곳은 가수분해와 메탄생성 공정이다. 유기물의 구성원소별 메탄가스와 탄산가스 발생비율은 아래 식에 따라 예측할 수 있는데 [7]



여기서 f는 질소성분 중 암모니아로 변환 비율로 1/10정도로 보면 된다.

전분이나 셀룰로즈는 (C₆H₁₀O₅)_m으로 표시되므로 3CH₄ 와 3CO₂가 발생되어 슬러지가스의 성분이 50:50이 됨을 쉽게 알 수 있다. 지방은 구성성분이 CHO로 되어 있으나 C, H의 성분이 높고 O의 비중이 낮아 [1]식을 바로 이용할 수가 있다. 단백질은 N과 S가 추가로 포함되어 있어 “N”은 암모니아로 “S”는 H₂S로 변환한다. 그러나 암모니아는 pH 10.8이상에서 기상으로 스트리핑을 할 수 있어 대부분 액상으로

존재하게 된다. 25°C에서 기체상태의 암모니아 백분율은 다음과 같다[8].

$$NH_3(\%) = \frac{100}{(1 + 1.75 \times 10^9[H^+])} \quad (4)$$

암모니아는 혐기성 반응조가 운전되고 있는 pH=7 근처에서는 0.56% 만 기상에 존재하나 pH=10.8에서 97.3%가 기상에 존재한다. 축산분뇨 등 "N"의 함량이 높은 경우는 액상농도가 1,500-3,000ppm 정도로 메탄균 증식에 영향을 주나 음식물 쓰레기는 "N" 함량이 훨씬 낮아 크게 문제가 되지 않는다[9]. 예를 들어 박종용 등[4]에 의하면 음식물쓰레기의 "N" 농도는 T-N과 NH₄+N이 3,401-4,429mg/L, 267-362mg/L

로 pH=7에서 기상의 암모니아 농도는 1.4-1.8mg/L에 불과하다. 따라서 메탄가스나 탄산가스의 농도에 비해 무시할 만 하다. 참고로 액상의 T-P는 286-388mg/l로 나타났다.

다음 표 1은 탄수화물, 단백질, 지방산, 하수슬러지, 에탄올, 메탄올, 벤조산의 구성원소식 [12]을 이용하여 이들을 혐기성 메탄의 원료로 사용했을 경우 식[3]에 의해 계산된 CH₄와 CO₂비를 나타낸다. 또한 0°C, 25°C, 35°C에서 BOD 1kg당 발생하는 바이오가스(슬러지 가스)의 부피를 보여주고 있다.

다음 표 2에는 최철용 등[10]이 대학식당 음식물 쓰레기를 이용한 바이오 가스 실험결과를 분석한 분석식 과 최동원[11]이 KAIST식당 음식물 쓰레기의 원소분석 결과식을 식(3)을 이용하여 메탄가스 함량과

Table 1. Biogas composition and volume(m³) by raw material

molecular formula [MW]	CH ₄	CO ₂	Temp, (0°C) H ₂ O(v), 0.58%	Temp, (25°C), H ₂ O(v), 3.12%	Temp,(35°C), H ₂ O(v), 5.54%
C ₆ H ₁₀ O ₅ carbohydrate[162]	50%	50%	0.829/0.834	0.905/0.934	0.935/0.994
C ₁₆ H ₂₄ O ₅ N ₄ protein[352]	60.5%	39.5%	1.210/1.217	1.321/1.364	1.366/1.450
C ₁₆ H ₃₂ O ₂ fatty acid[256]	71.8%	18.2%	1.400/1.408	1.528/1.577	1.579/1.677
activated sludge C ₁₀ H ₁₉ O ₃ N[201]	65.8%	34.2%	1.197/1.204	1.307/1.349	1.351/1.435
ethanol CH ₃ CH ₂ OH[46]	75%	25%	0.973/0.979	1.063/1.097	1.098/1.167
benzoic acid C ₆ H ₅ COOH[122]	53.5%	46.5%	1.285/1.292	1.402/1.448	1.450/1.540

Note: biogas shows dry/wet volume in m³/kg substrate.

Table 2. Experimental and estimated values of methane content and volume based on empirical formula of food wastes.

	CH ₄ (%)	vol(wet) m ³ /kgVS	vol(dry) m ³ /kgVS	empirical formula of foodwaste
exp.values [10]	57.2	1.4(1.17)	1.32(1.10)	
est1[4]	60.0	1.21	1.13	C _{3.95} H _{7.4} O _{2.05} N _{0.3}
est2[11]	56.1	1.13	1.07	C _{4.02} H _{7.02} O _{2.46} N _{0.28}
est3[2]	59.1	1.18	1.11	C _{3.89} H _{7.20} O _{2.12} N _{0.17}
activated sludge[8]	55-75	0.75-1.05	0.70-1.05	
est[12]	65.8	1.435	1.351	C ₁₀ H ₁₉ O ₃ N

The numbers in [] refer to literature numbers that shows data.

바이오가스 발생량을 예측 비교하였다. 최철웅 등[10]과 박종웅 등[4]이 대구 경산지방의 음식물 쓰레기를 원소 분석한 결과는 $C_{3.95}H_{7.4}O_{2.05}N_{0.3}$ 였다. 이를 기준으로 메탄함량을 예측하면 60.0%였고 최동원[11]이 실험한 대상은 둘 다 대학의 음식물 쓰레기를 이용한 연구결과라 실험과 예측이 모두 57% 내외로 유사한 값을 가짐을 알 수 있다. 박종우 등[4]이 얻은 곡물, 채소, 육류의 원소 분석식을 주홍수 등[12]의 식당의 음식물 쓰레기 성분을 곡류, 채소, 육류가 차지하는 비율을 가중 평균하여 메탄 함량을 예측하였을 때는 59.1%를 나타내었다. 이는 주홍수 등[12]과 박종우 등[4]의 연구결과는 서로 유사성을 보였다. 유기물은 균체, 생성물인 메탄가스, 그리고 대사를 유지하는 에너지원으로 사용된다. 위의 예측식에서 균체생성에 사용되는 기질을 고려하지 않은 것은 생성된 균체가 바깥으로 나가지 못하게 하는 폐쇄형 시스템에서는 생성된 균체 역시 분해 되어 메탄생성 원재료로 사용되기 때문이다.

기상으로 나오는 가스에는 미량의 H_2S 가 포함되어 있다. 보통 부피비로 0.015% 정도 혹은 500-2,000ppm으로 존재한다고도 한다. 혐기성상태에서 "S"는 궁극적으로 HS^- , S^{2-} 로 혹은 H_2S 의 형태로 기체로서 시스템을 빠져 나간다. 음식물쓰레기에 포함된 0.1%의 황은 음식물 쓰레기를 하루에 3kg (dry mass)/ m^3 을 메탄 발효조에 투입할 때 0.1%이면 3g/ m^3 혹은 3mg/L가 된다. 35°C에서 기체상의 H_2S 의 분포는 아래 식 (5)에 의해

$$H_2S, \% = \frac{[H_2S] \times 100}{1 + 2.0 \times 10^{-7} / [H^+]}$$
 (5)

가 되며, 높은 pH에서는 모두 액상에 존재하며 낮은 pH에서는 모두 기상에 존재하게 된다 [13]. pH7에서 "S"가 모두 H_2S 로 바뀌고 이중 33%가 기상에 존재한다고 하면 1mg/L가 된다. 표준상태(STP)에서 기상에 존재하는 기체의 총질량이 1.2g/L라고 하면 황의 농도는 820ppm으로 문헌에 보고된 H_2S 의 농도 500-2,000ppm안에 들어 있음을 알 수 있다. 여기서 ppm은 mg/L가 아니며 기체 1L에 포함된 기체들의 "질량의 합" 혹은 "몰수의 합"에 대한 분율(fraction)을

나타낸다. 무게로 표시된 H_2S 1ppm을 몰분율 혹은 부피 분율로 표시하면 $1ppm \times 26.7/32 = 0.834ppm$ 이 된다. 여기서 26.7은 메탄함량을 60%, 수분함량을 5.5%로 가정하여 계산한 것이다. 즉 $0.055 \times 18 + 0.945(0.6 \times 16 + 0.4 \times 44) = 26.7$ 이 된다. "1g몰"은 22.4L의 부피를 가지며 밀도는 1.19g/L가 된다.

3. 슬릿지 가스의 정제 와 열량

슬릿지 가스는 수분, 메탄, 탄산가스가 섞여 있고 이중 수분은 35°C에서 포화되어 있고 이는 5.54%에 해당한다. 따라서 순수한 메탄의 양은 바이오 가스량을 1.00으로 보면 $(1 - 0.0554) \times (M\%/100)$ 가 되며 여기서 M는 메탄가스 함량이다. 대략 바이오 가스 1 m^3 당 순수한 메탄가스량은 M을 60%로 하면 0.567 m^3 에 달한다. 메탄가스 열량은 35850KJ/ m^3 (표준상태) = $35850 \times 0.2388 = 8560$ kcal/ m^3 이다. 수분을 포함한 바이오 가스의 열량은 $8560 \times 0.567 = 4853$ kcal/ m^3 이며 수분을 포함하지 않은 경우는 5130 kcal/ m^3 이다. 수분과 CO_2 를 제거하는 자세한 방법은 문헌 [9]에 잘 소개되어 있다.

4. 혐기성 처리와 호기성 처리의 에너지 소모 비교

4.1 총 발생량 기준

우리나라에서 발생하는 음식물 쓰레기를 전량 완전 소멸형 혐기성 소화방식으로 처리할 경우와 호기성 방식으로 처리할 경우의 에너지 소모를 비교하였다. 하루에 발생하는 음식물 쓰레기양은 11,237톤/일로 365일 동안은 연간 4.10 $\times 10^6$ 톤이다 호기성 처리 방식은 이들을 공기 중의 산소로 산화시켜 CO_2 와 H_2O 로 분해하는 방식이다. 혐기성 방식은 에너지가 남는 반면 호기성 방식은 에너지를 소모한다.

쓰레기 발생량	: 11,237톤/일, 4.101 $\times 10^6$ 톤/년, 수분함량 80%
건조 중량	: 8.202 $\times 10^8$ kg, 총 BOD(kg) = 7.38 $\times 10^8$ kg, 90% 가정함
전력소모	: 1kwh/kgBOD, (2kgO ₂ /kgBOD), kwh/(2kgO ₂)

호기성처리비 : $7.38 \times 10^8 \text{kwh} \times 100 \text{원/kwh}$
= 738억원/년

혐기성 발효 : 총 BOD(kg) = $7.38 \times 10^8 \text{kg}$

총 발생량 : $7.38 \times 10^8 \text{kg} \times 0.60$
= $4.43 \times 10^8 \text{m}^3 \text{CH}_4$

혐기성 이득 : $4.43 \times 10^8 \text{m}^3 \text{CH}_4 \times 500 \text{원/m}^3$
= 2215억원

합계(차액) : 738억(비용)+2215억(이득)
= 2953억원

우리나라에서 연간 사용되는 도시가스는 2001년도 128억 m^3 로 용도별로는 가정용 60.4%, 일반용 6.7%, 업무용 9.6%, 산업용 21.5%, 열병합발전용 2.8%, 운송용 0.1%의 점유율을 나타내고 있다[14]. 음식물쓰레기의 메탄화에 의해 발생하는 4.43억 m^3 은 이의 3.46%에 해당 한다.

4.2 서울 강남구 J 아파트 90가구 한 동 기준

음식물 쓰레기 발생량 : $90 \times 3.5 \text{인} \times 0.23 \text{kg}/(\text{일.인})$
= 72.45kg/일

건조 중량 : $72.45 \text{kg} \times 0.2 = 14.49 \text{kg}/\text{일}$

메탄 발생량 : $14.49 \text{kg} \times 1.00 \times 0.60 = 8.69 \text{m}^3/\text{일}$

월 발생량 : $8.69 \times 30 = 260.83 \text{m}^3/\text{월}$

세대.월 : $260.82/90 = 2.89 \text{m}^3/(\text{월.세대})$

세대별 도시가스 사용량(주방용) : $10 \text{m}^3/\text{월}$

메탄가스(음식물)로 가구당 주방용 도시가스 사용량의 28.9%가 충당 가능하다[15]. 우리나라 일가구당 연간 도시가스 사용량은 1000만 가구를 기준으로 하면 $128 \text{억} \text{m}^3 \times 0.604/10^7 = 773 \text{m}^3$ 가 된다. 이중 120m^3 은 주방연료로 나머지 653m^3 은 난방연료로 쓰인다. 음식물쓰레기로 생산되는 메탄가스는 총 가구당 도시가스 사용량의 4.5%에 해당하기도 한다. 참고로 메탄 발효조 보온에 사용되는 메탄가스는 발생량의 약 20%에 불과하다.

5. 결 론

1) 음식물쓰레기의 메탄가스 함량과 바이오가스의 부

피를 예측한 값은 메탄함량이 탄수화물이 50%인 데 비해 단백질은 60.9%, 지방산은 71.8%로 나타났다. 수분을 포함한 바이오가스의 부피는 35°C에서 탄수화물이 kg당 0.994 m^3 , 단백질은 이의 1.46배, 지방산은 1.68배의 부피를 보여주었다.

2) 음식물쓰레기의 메탄함량 실험치와 예측치와의 비교는 성분에 있어서 많은 차이가 있음을 알 수 있지만 원소분석을 통하여 메탄가스 함량은 57%와 60%의 근사한 값을 보였다. 하수슬러지의 실험결과와 예측치와의 비교는 실험결과의 메탄 함량이 많은 변화를 가졌으나 평균치와는 잘 일치하고 있었다.

3) "질소"는 암모니아 형태로 대부분 액상에 존재하며 "황"은 H_2S 형태로 대부분 기상을 통하여 배출된다.

4) 우리나라에서 발생하는 410만 톤의 음식물 쓰레기를 모두 호기성 처리하였을 때는 738억원에 해당하는 에너지비가 소요되고 반면 혐기성으로 처리하였을 경우는 모두 2215억원의 이득이 있어 2953억원의 차이가 있음을 알 수 있었다.

5) 90세대 아파트에 발생하는 음식물 쓰레기를 현장에 처리하였을 경우 발생하는 메탄가스 양은 월세대당 2.89 m^3 이었으며 주방에서 월 사용되는 도시가스의 양은 10 m^3 로 가정하면 28.9%에 해당하는 양이다.

참 고 문 헌

- [1] 2001년 전국 폐기물 발생 및 처리현황, 환경부 (2002)
- [2] 주홍수, 류재영, 황진우, 배재근, 음식물쓰레기의 자원화를 위한 배출업종별 성상 및 특성의 비교 분석, 유기성 자원학회 <http://www.kowrec.org/journal/9-4/9-4-03.gif>
- [3] 윤하연, 김경미, 이광표, 유명진, 음식물쓰레기 배출원별 원단위 배출량 및 물리적 성상 분석, 한국 폐기물학회지, 19권 4호, 503-509 (2002)
- [4] 박종웅, 김민철, 송주형, 임정호, 음식물쓰레기의 계절별 특성에 관한 연구, 한국 폐기물학회지 18권 7호, 595-603 (2001)
- [5] 유기영, 이소라, 공정부산물인 음식물쓰레기 처리비용에 미치는 영향분석, 유기성 폐자원학회 <http://www.kowrec.org/updata/10-3/07-1.gif>

- [6] 박순철, 유기성 폐기물 혐기소화 가스의 활용, 바이오 에너지 기술연구회 workshop 자료집 21-24, 한국생물공학회 (1999).
- [7] 장호남, 서진호, 생물화학공학, 제2판 p431 (2001)
- [8] 서명교외 4인 공역, "폐수처리 단위조작", T.D. Reynolds, P.A. Richards 원저, SciTech Media (1998) p.324.
- [9] 김남천, 유기영, 안중우, 김영준, 허관, 정연구, 배재근, 혐기성 소화공정에 의한 바이오 가스화의 기술원리 및 응용, J. of KOWREC, vol.10, No.1, pp.7-23 (2002)
- [10] 최철웅, 고대중, 백수진, 손보연, 최월매, 이정진, 소멸시 혐기성 소화에 관한 기초연구, pp.255-258, 한국 폐기물학회 추계 학술연구발표회 논문집 (2002)
- [11] 최동원, 우리나라 주방폐기물의 혐기성소화의 모델링 연구, KAIST 석사논문 (1998).
- [12] Rittmann, B.E., McCarty, P.L., Environmental Biotechnology, 번역자: 배우근, 배재호, 양지원, McGraw-Hill, Korea (2002)
- [13] Metcalf and Eddy, Wastewater Engineering (Treatment, Disposal, Reuse), McGraw-Hill International Editions, pp.992-996, 4th ed (2003), revised by G. Tchobanglous, F.L. Burton
- [14] <http://www.enn.co.kr/enn>, 가스산업신문
- [15] 장호남, 김도윤, 김문일, 류철희, 이우기, 집단 주거 및 취사 시설의 음식물 쓰레기를 발생현장에서 처리하는 방법, 한국특허출원 제 10-2001-0052630 (2001.8. 29)