

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2018.4.2.179

JCCT 2018-5-23

## 미생물제재를 이용한 혐기성소화조 바이오가스 생산 극대화과 실증화에 관한 연구

### Study on maximization and demonstration of biogas production in an anaerobic digester using a microbial agent

배상대\*

Sang-Dae Bae\*

**요약** 요즘 음식물쓰레기를 혐기성소화조에서 바이오가스와 유기성 퇴비를 생산하고자 하는 연구가 늘어나고 있다. 본 연구에서는 음식물쓰레기를 미생물제재로 발효시켜 바이오가스와 퇴비를 생산하기 위한 기초실험을 행하였다. 먼저, 각종 미생물을 조합하여 미생물제재를 개발하고, 이를 음식물쓰레기 Batch실험에서 발생하는 바이오가스 발생량을 확인하였다. 또한 실증플랜트에서 바이오가스 발생량과 퇴비화를 통해 혐기성소화조 바이오가스 생산 극대화과 실증화를 확인하였다.

**주요어** : 음식물쓰레기, 미생물제재, 혐기성소화조, 바이오가스, 퇴비화

**Abstract** Recently, several studies have been conducted on biogas and organic compost production using food waste in an anaerobic digester. In this study, basic experiments were conducted to produce biogas and compost by fermenting food wastes with microbial agents. First, a microbial agent was developed by combining various microorganisms. Then, the amount of generated biogas was identified through a food waste batch experiment. Further, we could maximize and demonstrate biogas production in an anaerobic digester by examining biogas production and composting in a pilot plant.

**Key words** : Food waste, microbial agent, anaerobic digester, biogas, composting

## 1. 서론

우리나라에서 발생하는 유기성폐자원은 음식물 쓰레기, 축산 분뇨, 그리고 하수슬러지가 대표적이다[1]. 음식물쓰레기와 축산분뇨는 사료화 또는 퇴비화 방식으로 처리되었으나 이 또한 생산되는 퇴비나 사료는 품질이 낮고 판로가 한정되어있어서 실제 재활용 효과가 크지 않으며 하수슬러지와 축산 분뇨는 2012년부터 음식

물쓰레기폐수는 2013년부터 해양투기가 금지되어 유기성폐자원에 대한 새로운 처리 방안이 시급한 실정이다.

현재 국내에서 운영 중인 55개 바이오가스화시설 처리현황을 보면 바이오가스 생산효율이 평균 13 m<sup>3</sup>/ton에 그치는 것으로 나타났다. 음식물 처리시설 2개소의 평균 가스 생산효율은 평균 127.6 m<sup>3</sup>/ton 로 비교적 높으나, 음 폐수 처리시설(9개소) 27 m<sup>3</sup>/ton, 병합처리시설(17개소), 13.4 m<sup>3</sup>/ton, 하수슬러지 처리시설(20개소)

\*정회원, 신라대학교 화학공학과  
접수일: 2018년 2월 26일, 수정완료일: 2018년 3월 18일  
게재확정일: 2018년 4월 9일

Received: February 26, 2018 / Revised: March 18, 2018

Accepted: April 9, 2018

\*Corresponding Author : baesd@silla.ac.kr

Dept. of Chemical Engineering, Silla Univ, Korea

10.6 m<sup>3</sup>/ton, 가축분뇨처리시설(7개소) 5.5 m<sup>3</sup>/ton 등은 매우 저조한 가스 생산효율을 나타내고 있으며, 기타 7개소는 3 m<sup>3</sup>/ton 에도 미치지 못하고 있다.

환경부는 바이오 가스시설의 가스 생산량 목표치를 설정 할 때 음식물 처리시설은 100 m<sup>3</sup>/ton, 음폐수 처리 시설은 50 m<sup>3</sup>/ton,을 기준으로 하고 있다. 이것은 바이오 가스화 시설이 달성해야 하는 최저 기준을 설정한 것인데, 이를 기준으로 판단하더라도 현재 운영 중인 55개 시설의 바이오가스 생산효율이 매우 저조하다는 것을 알 수 있다. 바이오가스화 시설에 대한 정부의 재정 지원에도 불구하고 유기성폐자원 바이오가스화 사업이 폐기물 처리 및 에너지 생산 효율 면에서 타당성이 높지 않아 바이오가스화 산업이 외면당하고 있는 실정이다.

음 폐수, 축산 분뇨, 하수슬러지 등의 해양 투기가 금지된 상황에서 유기성폐자원을 처리할 대안이 시급하게 필요[2, 3]하지만 확실히 바이오가스화 시설을 도입하는 것은 지양해야한다. 그러므로 유기성폐자원 발생량과 처리시설의 처리용량을 고려하여 실증화하기 위한 연구가 필요하다. 매일 발생하고 있는 유기성폐자원 중 음식물 쓰레기는 그 발생량이 줄어들고 있지만 아직도 처리가 필요하다. 이 음식물 쓰레기를 바이오 가스화하고 퇴비화하여 실질적으로 사용이 가능하다고 하면, 에너지 절감은 물론 환경보호에도 큰 일조를 하게 된다[4]. 또한 바이오가스를 생산하고 남은 것을 퇴비화 함으로써 전혀 쓰레기가 남지 않는 zero-emission의 순환형 산업시스템의 적용도 생각해 볼 수 있다[5].

비료화를 위해서는 농촌진흥청 비료의 품질검사방법 및 시료채취기준 제10조 제1항의 규정에 따라 공정 분석법의 항목(유기물, 유기물대 질소의 비, 수분, 부숙도, 염산불용해물, 염분, 비소, 카드뮴, 수은, 납, 크롬, 구리, 니켈, 아연)과 병원성 미생물(병원성 대장균 (*Escherichia coil* O157:H7)와 병원성 살모넬라 (*Salmonella spp.*)) 검사가 필요하다[6].

본 연구에서는 미생물제제를 개발하고 혐기성소화조에서 바이오가스 생산 극대화를 위해 Batch 실험에서 적합한 실험조건을 도출하고, 기초 데이터를 바탕으로 실증플랜트 실험을 통해 발생하는 바이오 가스량과 퇴비화 결과를 통해 실증화를 확인하고자 한다.

## II. 연구방법

### 1. 실험방법

#### 1) 반응조 배양세균 제조

본 연구를 위해 *Cellulosimicrobium cellulans*, *Empedobacter breve*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus subtilis* 및 *Clostridium butyricum*을 사용하였다. *C. cellulans*은 Sporulation Agar, *B. amyloliquefaciens*은 Spizzen Potato Agar, *C. butyricum*은 Reinforced Clostridial Medium에서, *F. breve*, *B. licheniformis* 및 *B. subtilis*는 Nutrient 배지에서 밤샘 진탕배양 및 도말배양 후, 탁도 0.5로 희석하여 발효조 투입할 균액을 제조하였다.

#### 2) 가수분해 및 발효세균의 생육조건

과쇄된 음식물쓰레기 약 3kg이 포함된 반응조에 탄수화물, 지방, 단백질 등을 가수분해 할 수 있는 *C. cellulans*, *E. breve*, *B. amyloliquefaciens*, *B. licheniformis*, *B. subtilis* 등의 미생물 균주를 첨가하였다. 미생물에 의한 음식물쓰레기의 신속한 분해를 위해 반응조 하단부위부터 impeller를 이용하여 교반하였다. *C. butyricum*을 동시, 2일후, 7일후로 투입시기를 달리하여 약 37°C에서 배양하였다. 각 미생물의 배양 조건은 표 1과 같다.

표 1. 미생물의 종류별 사용배지 및 배양온도  
Table 1. Usage of Microorganism Species Media and Culture Temperature

Species	Media	Temp. (°C)
<i>Cellulosimicrobium cellulans</i> (호기성)	Sporulation Agar	26
<i>Empedobacter breve</i> (호기성)	Nutrient Agar	30
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> (호기성)	Spizzen Potato Agar	37
<i>Bacillus licheniformis</i> (호기성)	Nutrient Agar	37
<i>Bacillus subtilis</i> (호기성)	Nutrient Agar	30
<i>Clostridium butyricum</i> (혐기성)	Reinforced Clostridial Medium	37

#### 3) 음식물쓰레기 Batch실험

앞에서 배양한 호기성 미생물 5종과 혐기성 미생물 1종을 배양하여 음식물 Batch 실험을 하였으며, 약 3kg

의 음식물에 조건(표 2.)을 Run1-3으로 나누어 실험을 하였다.

표 2. Batch 실험 조건  
Table 2. Condition of Batch experiment

운전	미생물	투입시기	비고
Run1		동시	동시
Run2	호기성 5종 혐기성 1종	2일후 혐기성만	가수분해 후
Run3		7일후 혐기성만	산발효 후

그림 1.에는 Batch 실험 장치와 반응조 도면을 나타냈다. 이 장치는 전기컨트롤부와 반응조로 나누어져 있으며 컨트롤부에서 반응조의 온도와 교반속도를 표시하고, 반응조에는 교반을 위한 모터와 온도 유지를 위한 열선으로 구성되어 있다. 반응조에 약 3kg의 음식물 쓰레기를 투입하고 각 미생물의 배양온도(26-37℃) 맞추어 실험을 하였으며 배양기간 31일간을 유지한 다음, 발생가스를 포집하였다.

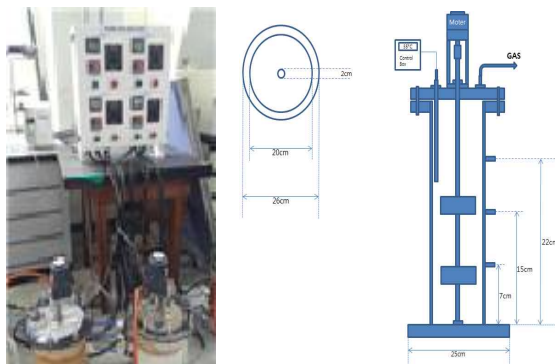


그림 1. Batch 실험 장치와 반응조 도면  
Figure 1. Batch experiment equipment and reactor plots

#### 4) 음식물 쓰레기 실증플랜트 실험

파쇄된 음식물쓰레기 30kg을 파쇄기에서 파쇄를 거쳐 혼합조에서 미생물재제와 혼합을 한 다음 혐기성 소화조로 이송하였다. 혐기성소화조에서는 약 19-23일 발효를 시키면서 발생하는 바이오가스를 바이오가스 저장탱크에 저장하였다. 발효가 끝나면 발생한 바이오가스를 포집하여 분석을 의뢰하였으며, 발효가 끝난 음식물쓰레기는 고속발효기로 옮겨져 호기성 상태에서 15-20일 경과 후 퇴비를 진행하였다. 퇴비화가 끝나면 퇴비성분 분석과 병원성 미생물 분석을 의뢰하였다. 그림 2.에 실증플랜트의 모형도와 설계도를 나타냈다. 전기컨트롤부, 파쇄기, 혼합조, 공급펌프, 혐기성소화조,

바이오가스 저장조, 고속발효기, 퇴비저장소로 구성되어 되어있다.

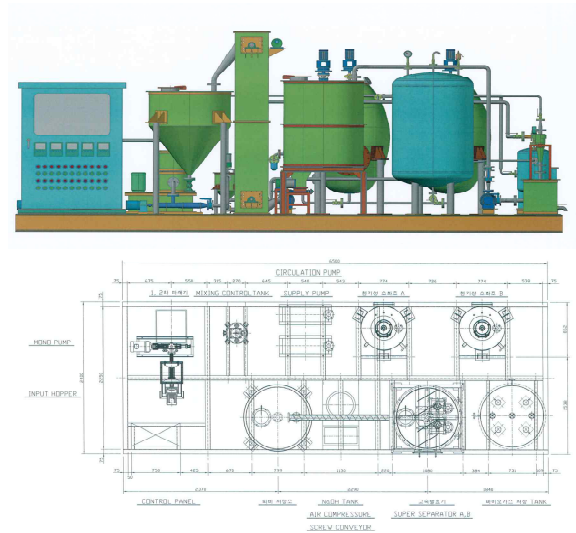


그림 2. 실증플랜트 모형도와 설계도  
Figure 2. Demo-scale plant model and design

## 2. 분석방법

### 1) Batch 실험 발생가스

GC/FID(HP 5890A II, Hewlett packard, USA)를 사용하여 Run1-3에서 발생한 가스를 측정하여 발생량(면적)을 분석하였다.

### 2) 실증플랜트 발생가스와 퇴비화

외부의 공인시험기관에 의뢰하여, 발생가스( $CH_4$ ,  $CO_2$ )는 GC/FID로, 퇴비는 농촌진흥청 비료의 품질 검사방법 및 시료채취기준 제10조 제1항의 규정에 따라 공정분석법과 병원성 미생물(병원성 대장균(*Escherichia coil* O157:H7)와 병원성 살모넬라(*Salmonella spp.*))로 분석한 결과를 사용하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 분석결과

#### 1) Batch 실험 발생가스

GC/FID(HP 5890A II, Hewlett packard, USA)를 사용하여 Run1-3에서 발생한 가스를 측정하여 발생량(면적)을 분석한 결과를 그림 3.에 나타냈다.

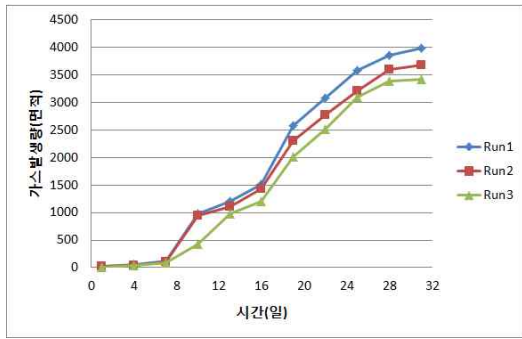


그림 3. 시간에 따른 발생가스의 변화  
Figure 3. Changes in the amount of gas generation over time

그림 3.과 같이 조건 Run1의 경우 발생 가스량이 많아 실증플랜트실험에서 호기성과 혐기성 미생물을 동시에 넣는 조건을 선택하였다.

## 2) 실증플랜트 발생가스와 퇴비화

실증플랜트 실험에서 음식물 쓰레기를 약 30kg을 파쇄하고 혐기성소화조로 옮겨 미생물과 함께 투입한 후 각 실험기간에 따라 발효를 진행하였다.



음식물 쓰레기 수거 및 선별 (Food waste collection and selection)



음식물쓰레기 투입 (Food waste input)



음식물 쓰레기 파쇄(32 $\mu$ m) (Shredding food waste)



바이오가스 채취(0.2kg/cm<sup>2</sup>) (Biogas extraction)

그림 4. 실증플랜트의 각 공정별 결과  
Figure 4. Results of each process of demo-scale plant

약 20일 후에 바이오가스를 채집하여 공인인증기관에 의뢰하였다. 각 공정을 그림 4.에 나타냈으며, 실증플랜트의 바이오가스 실험 결과를 표 2.에 나타냈다. 소화효율은 산업안전인성서를 받은 가스저장탱크 1.5m<sup>3</sup>을

기준으로 배관 및 혐기성소화조의 잔여 가스양을 15%로 가스저장탱크의 실 용량을 1.73m<sup>3</sup>으로 계산하였다. 그리고 실측한 가스저장탱크의 압력과 바이오가스 성분분석 시험성적서의 CH<sub>4</sub>와 CO<sub>2</sub>의 발생 결과(%)로 음식물쓰레기 소화효율(%)을 산출하였다. 또한 바이오가스 생산량을 투입한 음식물 쓰레기양으로 나누어 바이오가스 생산량(단위환산)을 추산하였다. Run1과 2의 바이오가스 생산량은 같으나 Run1 소화효율이 높고 특히 CH<sub>4</sub>의 발생량이 많아 앞으로의 바이오가스 발생에 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

표 2. 실증플랜트 실험 결과

Table 2. Results of Domo-scale Plant Experiment

운전	가스 종류	결과 (%)	소화효율 (%)	바이오가스 생산량 (m <sup>3</sup> /ton, 단위환산)
Run1	CH <sub>4</sub>	37.0	68.3	189.8
	CO <sub>2</sub>	15.5		
Run2	CH <sub>4</sub>	26.7	55.4	189.8
	CO <sub>2</sub>	15.8		
Run3	CH <sub>4</sub>	17.5	45.8	143.8
	CO <sub>2</sub>	15.2		

그와 동시에 고속발효기로 발효된 음식물쓰레기를 옮겨 호기성 상태에서 퇴비화를 진행하였다. 퇴비화의 공정시험법 결과는. Run1은 기준치를 모두 만족하였으나, Run2와 3은 유기물 함량이 기준치(30이상)보다 약간 낮았으며, 유기물과 질소의 비는 기준치(45이하)보다 높은 것으로 나타났다. 퇴비화의 병원성 미생물 검사 결과는 병원성 대장균과 병원성 살모넬라 (Salmonella spp.)가 Run1-3에 모두 검출되지 않아 기준치를 만족하였다. 병원성 대장균의 검사 결과 청록색 colony가 검출되지 않아 병원성 대장균 음성으로 판정하였소, 병원성 살모넬라의 검사 결과 검은색 colony가 검출되지 않아 병원성 살모넬라 음성으로 판정하려 병원성 미생물 기준도 만족한 것으로 나타났다.

## IV. 결 론

본 연구에서는 미생물제제를 이용한 혐기성소화조 바이오가스 생산극대화과 실증화를 위하여 미생물제제를 배양하고 Batch 실험을 처친 후 실증플랜트에서 바이오가스 발생량과 비료화 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 호기성 미생물 5종과 혐기성 미생물 1종을 배합하여 미생물재제를 만들었으며 이를 Batch 실험 장치에 적용시켜 바이오가스가 많이 발생하는 조건으로 Run1이 결정되었다.

2. 실증플랜트 실험 중 바이오가스의 결과, 조건 Run1의 경우에서 CH<sub>4</sub> 37.0%, CO<sub>2</sub> 15.5%, 소화효율 68.3%, 바이오가스 생산량(단위환산) 189.8m<sup>3</sup>/ton으로 가장 높은 결과를 나타냈다.

3. 실증플랜트 실험 중 퇴비화 결과, 농촌진흥청의 비료의 품질검사 방법 및 시료채취기준의 규정에 따라 공정분석법으로 분석하였고, 조건 Run1의 경우가 모든 항목에 적합한 것으로 나타났다. 또한 병원성 미생물 분석 결과는 Run1-3 모두 음성으로 판정되었다.

4. 이와 같은 실험결과를 바탕으로 음식물쓰레기를 바이오가스 생산과 퇴비화를 위한 미생물재제가 개발되었으며, 이를 실증플랜트에 적용시킴으로써 앞으로의 바이오가스 생산 산업에 더 효율적이고 실질적이고 필요한 공정이 개발의 중요한 인자로 인용될 것으로 판단된다.

to Different Scenarios of Zero Food Waste Residential Buildings”, J. Korean Soc. Environ. Eng., 38(7), pp. 353-363, 2016

[6] Establishment and designation of fertilizer process standards [Implementation 2016.6.25.] [Rural Development Administration Notice 2016-26]

※ 이 논문은 중소벤처기업부 창업성장 기술개발사업(2016년)으로 수행된 연구임

## References

- [1] H.S. Shin, H.W. Kim, and S.T. Kang, “Degradation characteristics in anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste”, NARS, J. Org. Res. Recycling Assici., 10(1) pp. 96-101, 2002
- [2] E.I. Alexiou, G.K. Anderson and L.M. Evison, “Design of preacidification reactors for the anaerobic treatment of industrial wastewater”, Water Sci. Technol., 29, pp. 199-204, 1994
- [3] A.H. Yoon, N.B. Park, J.H. Bae, H.B. Jun and Y.B. Kwon, “Treatment of food waste leachate using pure-oxygen jet loop reactor(JLR)”, J. Korean Society Waste Water, 24(6) pp. 763-773, 2010
- [4] S. Tafdrup, “Viable energy production and waster recycling from anaerobic digestion of manure and other biomass materials”, Biomass Bioenergy, 9(5) pp. 1-14, 1995
- [5] J.I. Oh, E.J. Yoon, I. Park and Y.M. Kim, “Analysis of Greenhouse Gas Reduction according