

# 돈분과 유기성 부산물을 혼합한 혐기소화에서 바이오가스 생산

김운걸 · 오인환 · 양상엽 · 이경민 · 이승일\*

건국대학교 자연과학대학 생물산업기계공학전공

## Biogas Production from Anaerobic Co-digestion Using the Swine Manure and Organic Byproduct

W. G. Kim, I. H. Oh, S. Y. Yang, K. M. Lee and S. I. Lee\*

Dept. of Biosystems Engineering, Konkuk University

### Summary

Animal manure is produced annually 43.7 million tonnes in Korea. Among them, about 85.6 % are used as compost or liquid fertilizer to the agricultural land. The animal manure can be effectively utilized by mixing with organic byproducts that result in generation of biogas from anaerobic co-digestion process. This study aimed to optimize the content of total solid materials (TS) and determine the effect of organic byproduct on the co-digestion process. Prior to the byproduct treatments, determination of proper content of TS was conducted by controlling at 5 or 10 %. For the byproduct treatments, swine manure without adding the byproduct was used for control treatment, and swine manure mixed with either corn silage or kitchen waste was used for other treatments. Volume of biomethane (CH<sub>4</sub>) generated from digested materials was quantified before and after byproduct treatments. In result, a 1.4-fold higher biomethane, about 0.556 L/L·d, was produced when the content of TS was controlled at 10 %, compared at 5 %, about 0.389 L/L·d. When the swine manure was mixed with the corn silage or kitchen waste, a two-fold higher biomethane was produced, about 1.0 and 1.06 L/L·d, respectively, compared to the control treatment. Biogas production from organic dry matter (odm) was 3.36 and 2.6 L/kg odm·d for control, corn silage, and kitchen waste treatment, respectively. The lower biogas production in the treatment of kitchen waste than that of corn silage is associated with its relatively high odm contents. The methane concentration during the whole process ranged from 40 at the beginning to 70 % at the end of process for both the control and kitchen waste treatments, and ranged from 52 to 70 % for the corn silage treatment. Hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) concentration ranged between 350 and 500 ppm. All the integrated results indicate that addition of organic byproduct into animal manure can double the generation of biogas from anaerobic fermentation process.

**(Key words :** Anaerobic co-digestion, Swine manure, Organic byproduct, Biogas, Methane)

---

본 연구는 충북지역환경기술개발센터의 연구지원으로 수행되었습니다.

\* 건국대학교 세계와 지역연구원 (Global and local Research Institute, Konkuk University)

Corresponding author : Oh, I. H., Department of Biosystems Engineering, Konkuk University, Danwoldong 322, Chungju, Chungbuk, 380-701 Republic of Korea.

Tel: +82-43-840-3553, E-mail: [ihoh@kku.ac.kr](mailto:ihoh@kku.ac.kr)

2010년 12월 10일 투고, 2011년 3월 1일 심사완료, 2011년 3월 3일 게재확정

## 서 론

가축분뇨 발생량은 연간 약 4,370만톤 수준이며, 그 대부분인 85.6%가 퇴액비로 자원화 되고 있으며, 정화처리는 주로 양돈의 경우에 해당되는데 2.7%, 공공처리 6.8%, 그리고 약 2.7%의 물량이 해양배출되고 있는 실정이다 (신, 2010). 2012년부터는 가축분뇨의 해양배출이 전면 금지될 전망이어서 대안을 마련하고자 공동자원화 시설 등을 설치하고 있다.

가축분뇨자원화 방안의 일환으로 저장액비화 사업이 전국적으로 실시되어 있으나 호기성 처리를 함으로 냄새가 발생하며 암모니아 가스가 휘산되는 문제가 있다. 이용 가능한 물질이 풍부한 가축분뇨를 단순 액비화 하는 것 보다는 지역에서 발생하는 유기성 부산물을 활용하는 혐기성소화를 통하여 메탄가스를 생성시켜 에너지로 이용하고 혐기소화 후의 여액은 악취가 감소된 액비로 이용한다면 부가가치를 높이며 민원을 줄이는 효율적 처리가 될 수 있다. 오스트리아에서 40기의 바이오가스 플랜트를 조사한 바에 의하면 거의 대부분의 양축농가에서 에너지 작물을 혼합하는 것으로 알려져 있다 (Hopfner-Sixt, 2006). Misi (2001)는 시험에서 가축분뇨에 당밀을 40% 혼합하여 가스 발생량을 조사하였다. 유럽의 경우에는 대부분의 바이오가스 플랜트에서 열병합발전기를 돌려 생산된 전기를 판매함으로써 양축농가에 제2의 소득원이 되고 있다 (Besgen et al. 2007). 일반적인 처리공정은 가축분뇨혼합물을 메탄발효시켜 소화액은 액비로 농경지에 이용하고, 바이오가스로는 발전기를 가동시켜 열과 전기를 이용하는 시스템이다 (Aschmann et al. 2006, Hartmann 2007, Klages et al. 2005).

본 연구는 질소함량이 높은 가축분뇨와 탄소원이 많은 옥수수사일리지, 음식물쓰레기와 같은 지역에서 발생하는 유기성 부산물을

연계하여 혐기성소화시스템을 구축하여서 축산농가에서 현실적으로 이용 가능한 혐기소화모델을 제시하고자 고형물함량과 유기물 종류에 따른 바이오가스의 발생량을 규명하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 재료

혐기성 소화조 6조를 설계 제작하였다. 소화조의 직경은 내경이 20.6 cm, 길이가 68.5 cm인 수평원통형으로 하였으며, 내부에는 교반기를 설치하였고 교반회수를 자동으로 조절이 가능하도록 하였다. 교반회수는 1시간에 15분 주기로 교반하도록 하였다. 원통주위를 열선으로 감아서 온도가 35~40℃를 자동으로 유지하도록 하였다. 발생하는 가스는 호스로 연결하여 가스팩에 저장되도록 하였다. Fig. 1은 설치된 소화조의 겉모양과 측면 단면도이다. 생산되는 가스는 습식가스메타(W-NK-1A, Sinagawa, Japan)를 이용하여 가스량을 측정하였다. 바이오가스는 CH<sub>4</sub>와 CO<sub>2</sub>가 거의 대부분이나 수분을 많이 함유하고 있어 이에 습식가스메타를 선택하였다. 또한 생산되는 가스의 메탄함량을 부피로 측정하기 위해 복합가스 측정기(PGM-7800, VRAE, USA)를 사용하였다. 이 기기는 메탄을 부피로 100%까지 측정이 가능한 기기이며, 그 외에도 NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S를 측정할 수 있다. 소화조 내부의 pH를 측정하기 위해 pH 메타(Cyberscan pH1500, EUTECH, Singapore)를 사용하였다. pH 메타는 주기적으로 보정을 하여 최대한 오차를 줄일 수 있도록 하여 사용하였다.

### 2. 방법

돈분은 충주시 가금면에 소재한 B농장에

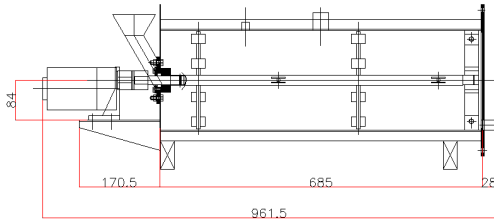
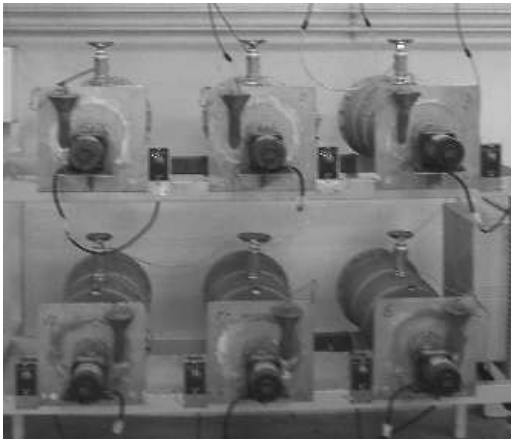


Fig. 1. Elevation view (above) and sectional side view (below) of the reactor.

서 신선한 모돈분을 가져다가 물로 희석하여 고형물함량(TS)이 5%, 10%가 되도록 조절하여 고형물함량에 따른 바이오가스 발생량을 규명하였다. 초기에 메탄균을 접종하기 위하여 1차 실험에서 발효가 잘 되었던 소화조의 소화액을 각각의 소화조에 4.5 L와 TS 5%와 10%로 만든 돈분 13.5L를 혼합하였다. 혐기 소화에서 C/N의 최적비율은 25:1로 돈분에 부족한 탄소성분을 첨가시키기 위해 옥수수 사일리지 또는 음식물쓰레기를 첨가하였으며, 이 2차실험은 고형물함량 10%에서 수행되었다. 소화조의 총 용량은 22.8 L이며 실용량은 18 L이었다. 2차 시험에서는 이틀에 한 번씩 대조구에는 돈분 1.2 L 를 투입하였으며 시험구에는 1.15 L의 돈분과 100 g의 옥수수 사일리지를 혼합하여 고형물함량이 10%가 되도록 하였다. 음식물쓰레기 혼합의 실험에서도 같은 조건으로 투입하였으며, 유

기성 부산물과 돈분의 혼합비율은 부피로 25:75로 하였다. 온도는 약 35℃를 유지하도록 하였다. 체류기간은 30일로 하였으며, 재료의 성분분석은 제일분석센터에 의뢰하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 소화조의 온도변화

혐기 발효에 중요한 요인 중 하나인 온도는 중온으로 35~40℃를 고정하여 맞추는 것이 좋으나 겨울철에는 한파로 인하여 소화조의 온도가 적정 수준보다 약간 떨어진 것을 볼 수 있다. 그 이유는 보온에서 약간 문제가 있었던 것으로 판단된다. Fig. 2는 대조구(Ms)와 시험구(Ms+Wk, Ms+Sc)의 온도변화를 보여준다.

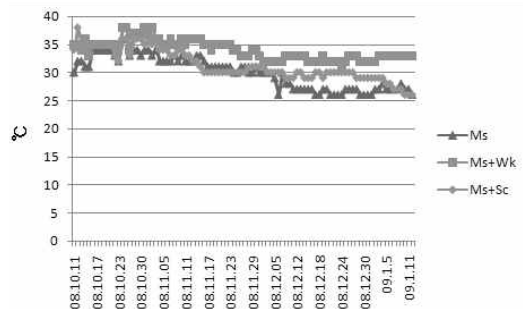


Fig. 2. Variation of temperature inside the selected reactors during the fermentation process.

Ms : Swine Manure(control)

Wk : Kitchen Waste

Sc : Corn Silage

### 2. 돈분에서의 바이오가스 발생량

Fig. 3은 대조구에서 나온 가스량을 내용물 용적대비 하루 기준으로 하여 나타내었다. Fig. 3은 고형물함량(TS) 5%, 유기건물함량(ODM)이 4.05%인 돈분을 사용하여 나타낸

대조구의 가스량과 TS 10%, 유기건물함량 (ODM)이 8.25%인 돈분을 사용하여 얻은 가스량을 함께 나타내었다. 이틀간격으로 6주 동안 측정된 자료를 토대로 통계처리를 하였으며 막대는 표준에러를 나타낸다.

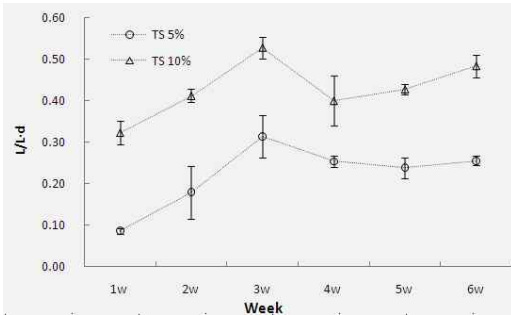


Fig. 3. Biogas production from swine manure with different TS.

고형물함량 5%에서 가스발생량이 최대 7 L/d, 내용물 용적대비 0.389 L/L · d 이었으며, 고형물 10%에서는 최대 10L/d, 0.556L/L · d 이었다. 위 그림에서 알 수 있듯이 TS 10% 일 때 최대 가스발생량이 TS 5% 보다 약 1.4배가 되었다. 돈분만을 사용시 C/N 비율은 최적 C/N 비율인 25~30:1에 못미치는 12:1의 비율을 가진다. Adolph et al. (2004)은 중온에서 가스발생 0.86 L CH<sub>4</sub>/L · d로 보고하여 비슷한 경향을 보인다.

### 3. 유기성부산물 혼합에서의 바이오가스 발생량

시험구는 소화조에 대조구와 같은 돈분에 유기성 부산물인 옥수수사일리지와 음식물쓰레기를 첨가하여 고형물 함량 10%로 하여 실험을 진행하였다. 시험구의 초반 가스 발생량은 대조구 보다 낮았으나 옥수수사일리지의 첨가로 낮아진 pH를 Ca(OH)<sub>2</sub>를 첨가하여 약 7 정도로 높여준 후 가스 발생량이 급격히 증가하였다. TS 10%인 돈분에 옥수수사일리지를 첨가한 시험구에서 투입돈분에

대한 가스발생량은 1.11L/L · d으로 대조구의 가스 발생량 0.556L/L · d의 약 2배 가까이 되었다. 이틀간격으로 5주 동안 측정된 자료를 토대로 통계처리를 하였으며 막대는 표준에러를 나타낸다.

돈분에 옥수수사일리지를 첨가한 재료의 유기건물함량 (ODM)은 8.8%이었다. Fig. 4는 건물함량 10%인 돈분과 옥수수사일리지 및 음식물쓰레기를 사용한 시험구에서의 가스발생량을 내용물 용적대비 5주간에 걸쳐 분석한 자료를 하루 기준으로 비교하였다.

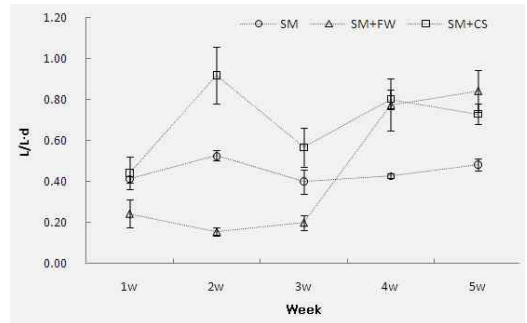


Fig. 4. Comparison of biogas production in different treatments.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 옥수수사일리지를 첨가한 소화조에서 대조구보다 약 2배 정도 많은 가스를 생성하였다. 음식물쓰레기를 첨가한 시험구는 늦게 시작을 하였으며 가스발생이 본격적으로 이루어진 후에는 옥수수사일리지를 첨가한 시험구의 가스발생량을 초과하였다. 본 실험에서는 소량이고 한 식당으로부터 가져와 별다른 처리를 하지 않았으나 음식물쓰레기에는 다양한 미생물이 혼재하여 있기 때문에 현장에서는 반드시 살균과정을 거치도록 하여야 한다.

유기건물함량 대비 가스발생량은 모든분만을 사용한 대조구에서 최대 203 L/kg odm · d, 음식물쓰레기를 첨가한 시험구에서 최대 216 L/kg odm · d, 옥수수사일리지를 첨가한 시험구에서 최대 362 L/kg odm · d로 나타

났다.

메탄가스의 농도는 대조구가 초반 40%에서 후반 70% 정도였으며 옥수수사일리를 첨가한 시험구에서 초반 52% 후반 70%, 음식물쓰레기를 첨가한 시험구에서 초반 40% 후반 70%로 일반적인 농도 60% 보다 높았다. 황화수소 농도는 대부분의 소화조에서 350~500 ppm 정도가 검출되었다. Adolph et al. (2004)의 시험에서도 메탄농도가 초기에 30~40%, 그리고 후기에 가서는 60~70%로 상승하였다고 하였다.

#### 4. 투입 재료와 소화액의 성분분석

혐기소화에 있어 중요한 C/N의 비율을 알기 위해 투입 재료의 성분분석을 하였으며 결과는 다음과 같다.

Table 1. Components of influent (Unit: % w.b.)

Item	Swine manure	Corn silage	Kitchen Waste
Crude protein	0.74	1.86	3.59
Crude fat	0.59	0.80	2.78
Crude fiber	0.56	6.12	0.84
Crude ash	0.84	1.87	1.20
Nitrogen	0.12	0.30	0.58

표 1에서 알 수 있듯이 돈분은 혐기소화에 중요한 C/N가 개략적으로 12로 혐기소화에 최적인 C/N 비율이 25:1에 못 미치는 것을 알 수 있으며, 또한 음식물쓰레기를 투입한 시험구에서 음식물의 C/N 비율이 3.5:1로 되어 초반 발효가 잘 되지 않았다. 옥수수사일리는 C/N 비가 27:1로 적정한 범위에 있으며 옥수수 사일리의 첨가로 탄소 부족분을 보완해 줄 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한 소화액 역시 돈분만을 사용한 것과 옥수수사일리를 첨가한 소화조의 것과 성분상 큰 차이를 보이지 않는다 표 2는 대조구와 시험

구에서 가스 생산이 양호한 소화조의 소화액을 분석하였다.

Table 2. Components of effluent (Unit: % w.b.)

Item	Swine manure	Ms+Sc	Ms+Wk
Crude protein	0.68	0.70	1.37
Crude fat	0.61	0.67	0.98
Crude fiber	0.42	0.62	0.89
Crude ash	0.67	0.68	1.69
Nitrogen	0.11	0.11	0.22

표 3은 소화액을 액비로 사용할 수 있는지의 여부를 알기 위해 대조구, 옥수수사일리 혼합구, 음식물쓰레기 혼합구 소화조의 소화액의 인산과 가리를 분석한 결과를 나타내었다.

Table 3. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O concentration in effluent (Unit: %w.b.)

Item	Swine manure	Ms+Sc	Ms+Wk
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.19	0.18	0.40
K <sub>2</sub> O	0.07	0.10	0.13

소화액의 비료성분은 표 4와 같다. 일반적으로 인산이 약간 높은 편이나 소화액은 작물이 필요로 하는 영양소를 골고루 함유하고 있다. 완전히 발효된 안정적인 액비 상태를 보여주고 있다. 음식물 쓰레기 혼합물에서 질소, 인산성분이 다른 시험구보다 2배 정도 높게 나타났다.

Table 4. Fertilizer components in the effluent (Unit: %w.b.)

	N <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Ms	0.11	0.19	0.07
Ms+Sc	0.11	0.18	0.10
Ms+Wk	0.22	0.40	0.13

적 요

인 용 문 헌

가축분뇨와 유기성 부산물의 혼합형태가 바이오가스 발생에 미치는 영향을 규명하고 자 시험을 수행한 결과는 다음과 같다.

1. 모든분을 원료로 했을 때 가스발생량은 건물함량 5%에서 최대 7 L/d, 내용물 용적대비 0.389 L/L · d 이었으며, 고형물 10%에서는 최대 10 L/d, 0.556 L/L · d 이었다. TS 10% 일 때 최대 가스발생량이 TS 5%의 약 1.4배 가 되었다.

2. 유기성 부산물을 혼합하였을 때 옥수수 사일리지에서 고형물 함량을 10%로 한 시험구에서 가스발생량은 1.11 L/L · d이다. 대조구의 가스 발생량 0.556 L/L · d과 비교하면 약 2배 가까이 되었다. 또한 음식물쓰레기를 첨가하였을 때 고형물 함량 10%에서 최대 18.17 L/d, 용적대비 1.01 L/L · d로 나타났다.

3. 유기건물함량 대비 바이오가스 발생량은 모든분만을 사용한 대조구에서 최대 203 L/kg odm · d, 음식물쓰레기를 첨가한 시험구에서 최대 216 L/kg odm · d, 옥수수사일리를 첨가한 시험구에서 최대 362 L/kg odm · d 로 나타났다.

4. 메탄가스의 농도는 대조구가 초반에 40%가 나왔고 후반에 약 70% 정도였으며 옥수수사일리를 첨가한 시험구에서 초반에 52% 후반에 약 70%, 음식물쓰레기를 첨가한 시험구에서 초반에 약 40% 후반에 약 70%로 일반적인 농도보다 높았다.

5. 소화액의 성분분석결과 모든 시험구의 소화액은 작물이 필요로 하는 영양분을 골고루 함유하고 있어 액비로 이용할 수 있으리라 판단된다.

1. Adolph, J., J. Beck, M. Mukengele and T. Jungbluth. 2004. Monofermentation of Nutritional Waste in Biogas Plants. Agrartechnische Foschung 10 (2004) Heft 1, S. E 16-E 22.
2. Aschmann, V., R. Kissel and A. Gronauer. 2006. Abags- und Leistungsverhalten biogasbetriebener BHKW an Praxisanlagen. Agricultural Engineering research 12 (2006) 46-52.
3. Besgen S., Kempkens K., Lammers P. 2007. Energieumsetzung in Biogasanlagen. Agricultural Engineering Research 13 57-66.
4. Hartmann, K., 2007. Oekobilanz Biogas. 62 LANDTECHNIK 2/2007 96-97.
5. Hopfner-Sixt K., Amon Th., Bodiroza V., Kryvoruchko V., Milovanovic D., Zollitsch W., Boxberger J. 2006. Biogaserzeugung aus agrarischen Rohstoffen. Landtechnik 61 148-149 3/2006.
6. Klages, S., P. Jager, A. Niebaum, H. Dohler, H.-W. Schneichel, M. Helm, and W. Philipp, 2005. Biogas. 60 LANDTECHNIK 1/2005 38-39.
7. Misi, S. N. and C. F. Forster. 2001. Batch co-digestion of multi-component agro-wastes. Bioresource Technology 80 (2001) 19-28.
8. 신현관. 2010. 한국의 가축분뇨 에너지화 정책방향. 가축분뇨 이용 바이오가스 생산의 산업화 방안 국제심포지엄. 국립축산과학원, 한국축산시설환경학회 15-31.